

Kvantifikacija vlage i sitnih zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju kolničke konstrukcije primjenom georadara

Bezina, Šime

Doctoral thesis / Disertacija

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:965059>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-30**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Šime Bezina

**KVANTIFIKACIJA VLAGE I SITNIH ZRNA
U MEHANIČKI ZBIJENOM NOSIVOM
SLOJU KOLNIČKE KONSTRUKCIJE
PRIMJENOM GEORADARA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Šime Bezina

**KVANTIFIKACIJA VLAGE I SITNIH ZRNA
U MEHANIČKI ZBIJENOM NOSIVOM
SLOJU KOLNIČKE KONSTRUKCIJE
PRIMJENOM GEORADARA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Josipa Domitrović

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

Faculty of Civil Engineering

Šime Bezina

**QUANTIFICATION OF MOISTURE AND
FINES IN PAVEMENT UNBOUND
GRANULAR LAYER BY GROUND-
PENETRATING RADAR**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Assoc. prof. Josipa Domitrović

Zagreb, 2024.

***„Conta ciò che si può contare, misura ciò che è misurabile
e rendi misurabile ciò che non lo è.“***

Galileo Galilei

Roditeljima, sestri i kumčadi.

IZJAVA O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj doktorski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Šime Bezina, univ. mag. ing. aedif.

O MENTORICI

Josipa Domitrović rođena je 1984. godine u Ogulinu gdje je stekla osnovnoškolsko i srednjoškolsko obrazovanje. Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu diplomirala je 2009. godine, a doktorirala je 2015. godine. Od srpnja 2015. godine do danas zaposlena je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Trenutno je u znanstveno-nastavnom zvanju izvanredna profesorica. U okviru znanstvene djelatnosti istraživački rad je usmjerila prvenstveno na proučavanje ponašanja kolničkih konstrukcija, posebice na mogućnosti optimalizacije i racionalizacije projektiranja, građenja, sustavnog upravljanja i održavanja kolničkih konstrukcija te primjenu nerazornih metoda za ocjenu stanja kolničkih konstrukcija. Pored navedenog dio znanstvenog rada orijentirala je na segment zaštite okoliša prije svega istraživanje mogućnosti uporabe recikliranih materijala u cestogradnji. Od travnja 2013. do listopada 2017. godine sudjelovala je na međunarodnom projektu COST Action TU1208, „Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar“, na području istraživanja primjene georadara i drugih nerazornih metoda ispitivanja u svrhu ocjene stanja prometne infrastrukture. Od studenog 2021. godine, kao suradnica je uključena u rad na nacionalnom projektu „Sustav senzora za kontinuirano praćenje ponašanja kolničke konstrukcije pod opterećenjem. U koautorstvu je objavila 8 radova u časopisima te 21 rad u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom. Na Zavodu za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu uključena je u izvođenje nastave iz predmeta Ceste, Kolničke konstrukcije, Aerodromi, Metode poboljšanja tla, Gospodarenje kolnicima, Održavanje kolnika i Kruti kolnici.

ZAHVALA

Najdublju zahvalnost izražavam mentorici Josipi Domitrović za vodstvo i podršku tijekom doktorskog studija. Iskazana stručnost, predanost i susretljivost bile su od presudne važnosti za moj akademski i profesionalni razvoj. Bez njene pomoći i smjernica zacrtani ciljevi bili bi daleko teže ostvarivi. Iskreno se nadam i veselim budućoj suradnji i projektima.

Zahvaljujem profesorici Tatjani Rukavini na stručnim savjetima, konstruktivnim kritikama, osiguravanju financijskih sredstava i neumornoj provjeri stupnja dovršenosti doktorskog rada. Njezina poznanstva i kontakti omogućili su pristup pojedinim tvrtkama i laboratorijima.

Želim se zahvaliti kolegi Ivici Stančeriću s kojim sam započeo ovo putovanje i koji mi je odškrinuo vrata znanosti. Njegova pomoć, posebno u provođenju terenskih istražnih radova, bila je neprocjenjiva.

Veliko hvala kolegama Sanji Lopuh i Manuelu Uzelac na izdvojenom vremenu i pomoći u provođenju laboratorijskih ispitivanja. Podijeljeno znanje i iskustvo te pružena obuka nesumnjivo su doprinijeli kvaliteti doktorskog rada.

Od srca zahvaljujem gospodi Oliveru Aleksiću, Vladimiru Fiketu, Marinu Uzelcu i Domagoju Zrinskom koji su nebrojno puta po ljetnom zvizdanu spremno zasukali rukave te su se u maniri Alije Sirotanovića primili lopate i dali neizmjeran obol u izradi uzoraka.

Veliko hvala gospodinu Stipanu Didaku koji je usprkos rekordnoj proizvodnji i obujmu posla unutar asfaltne baze Donja Lomnica osigurao prostor za smještaj materijala, opreme za ispitivanje i uzoraka te svakodnevno u prolazu udijelio pokoji savjet iz prakse.

Zahvaljujem se dobrom duhu asfaltne baze Donja Lomnica Krešimiru Lendiću, na uslugama transporta materijala i opreme.

Veliko hvala prijatelju Ivanu Nuiću na donaciji i obradi materijala za izradu kalupa.

Od srca zahvaljujem dragim kolegicama i prijateljicama, Tamari Džambas, Saši i Maji Ahac, što su tijekom mog boravka na fakultetu uvijek imale vremena i strpljenja za sva moja pitanja i ideje te što su dijelile svoja iskustva i savjete.

Također, zahvaljujem tvrtkama: TPA održavanje kvaliteta i inovacija d.o.o.; Strabag Hrvatska d.o.o.; Strabag BMTI d.o.o., Kamenolom Gorjak d.o.o.; Dilj d.o.o. u sklopu Nexa grupe, Proizvodnja alata i uređaja P.S.G., Krah d.o.o., CSS d.o.o. te Institut IGH d.d. na ustupanju infrastrukture, strojeva, uređaja, materijala, izradi potrebne opreme i provođenju pojedinih ispitivanja. Bez njihove nesebične pomoći provedba ispitivanja i istraživanja bila bi gotovo neizvediva.

Ovaj doktorat ne bi bio isti bez potpore mojih prijatelja: Ojdanića, Banovića, Govorušića, Jurčića, Kaće, Šeparovića, Omrčena, Tamare, Janka, Tonija, Lare, Madžarca, Ivora i Bašića. Iako nisu direktno sudjelovali u istraživanju, bili su uz mene tijekom cjelokupnog procesa. Hvala im na velikodušnoj podršci i pomoći u održavanju balansa između predanosti poslu, posvećenosti izradi doktorskog rada i uživanja u životu.

Svoju duboku zahvalnost izražavam Ireni na njezinom neizmjernom strpljenju, stalnoj podršci i razumijevanju koje je pokazivala tijekom protekle godine.

Naposljetku, najveću zahvalu upućujem svojim roditeljima. Zahvalan sam im na bezuvjetnoj ljubavi, ohrabrenju i potpori te što su mi vlastitim primjerom pokazali da se predanošću, poštenjem i poštivanjem radne etike mogu ostvariti svi zacrtani ciljevi.

SAŽETAK

Cestovne mreže ključne su za prometno povezivanje i prosperitet pojedine države. Sigurno i nesmetano odvijanje prometa, odnosno zadržavanje propisane tehničke i uporabne razine ceste, zahtjeva pravovremeno te redovito provođenje postupaka i mjera održavanja. Jedan od glavnih uzroka površinskih oštećenja kolničke konstrukcije je promjena svojstva mehanički zbijenog nosivog sloja uslijed povećanja udjela vlage i sitnih zrna. Dosadašnja istraživanja pokazuju tendenciju da spomenuta povećanja utječu na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti koju je moguće detektirati elektromagnetskim metodama, a među njima se ističe metoda koja koristi georadar. Cilj ovog rada je razvoj novog postupka za određivanje udjela vlage i sitnih zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju kolničke konstrukcije učinkovitim analizom vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti utvrđene georadarom s air-coupled antenama. Za ostvarivanje ovog cilja provedena su opsežna laboratorijska ispitivanja i brojna terenska istraživanja. Analizom rezultata dobivena su nova saznanja o utjecaju udjela vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Jedan od glavnih doprinosa istraživanja je razvoj modela za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti temeljem udjela vlage i sitnih zrna. Također, predložen je postupak za kvalitativnu ocjenu i kvantifikaciju udjela vlage i sitnih zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju primjenom georadara s air-coupled antenama. Daljnjim istraživanjima i poboljšanjima predloženog postupka omogućilo bi se lociranje kritičnih dionica te osigurala tehnička podloga za donošenje odluka o provedbi odgovarajućih postupaka sanacije kolnika.

Ključne riječi: georadar; mehanički zbijeni nosivi sloj; relativna dielektrična permitivnost; udio sitnih zrna; udio vlage; tube suction test; percometer; reflektometar u vremenskoj domeni

EXTENDED ABSTRACT

Road networks are crucial to the European Union's transport links and prosperity. Safe and smooth traffic flow, i.e. the maintenance of the prescribed technical and functional level of the road, requires the timely and regular implementation of maintenance procedures. One of the main causes of surface damage to the pavement structure is the change in the properties of the unbound granular layer (UBG) due to the increase in moisture and fines. In this doctoral dissertation, the possibility of quantifying moisture and fines in the UBG of pavement structures was investigated using ground penetrating radar (GPR) with air-coupled antennas based on relative permittivity. In recent decades, GPR has been increasingly used for pavement condition assessment due to its non-destructive nature and versatility. It is based on the calculation of the velocity of reflected electromagnetic (EM) waves, from which the values of relative permittivity in a single layer of the pavement structure are calculated. The results of some researchers indicate that there is a strong correlation between variations in the value of the relative permittivity and changes in the proportion of moisture and fines. This doctoral dissertation presents results of tests and investigations designed to evaluate the effectiveness of the GPR in determining the moisture and fines content in UBG.

The aim of this work was to develop a new method to quantify moisture and fines in UBG by efficiently analysing the relative permittivity value obtained by GPR. This would enable the timely implementation of maintenance measures and thus prevent the occurrence of structural damage. An attempt was made to achieve this objective in three steps:

1. Investigation of the influence of changes in the proportion of moisture and fines on the value of the relative permittivity of the UBG.
2. Evaluate the sensitivity of the UBG to the presence of moisture with variable fines content based on the correlation of the relative permittivity value obtained by using GPR with air-coupled antennas with the values obtained by using a percometer;
3. Correlation of the relative permittivity value obtained by using GPR with air-coupled antennas in the field and in the laboratory.

Laboratory tests, field research and analysis of the results were carried out to confirm the following hypothesis: *By establishing correlations between the relative permittivity values obtained by GPR with air-coupled antennas in the field and in the laboratory, it is possible to quantify the moisture and fines content in the unbound granular layer of the pavement.*

The research itself was carried out in four interlinked phases. In the first phase, the scientific

and technical literature on methods for determining the relative permittivity of UBG using non-destructive methods was reviewed in detail: GPR, Time domain reflectometry (TDR) and percometer.

The second phase involves preparing the samples and the performance of laboratory tests to determine the value of their relative relative permittivity. Preliminary laboratory tests were carried out before the main tests were performed. The preliminary laboratory tests were used to determine the geometric characteristics as well as the physical-mechanical and chemical properties of the stone material, the additional material and the mixtures of stone and additional material. In addition, the compaction parameters for the production of the samples were determined for the defined test mixtures. Crushed rock of nominal size 0/31.5 mm was used as the main material, the grain size curve of which lies within the limit range for UBG specified in the ordinance. The additional material was obtained by crushing dried tiles. The proportion of crushed stone was constant, the proportion of additional material varied. The additional material was dosed in a mass proportion of 3 to 15%, step 3%, resulting in a total of six test mixtures. The moisture content varied in each mixture so that six different steps were used. Three samples were prepared for each specific ratio of moisture and fines content, so that a total of 108 samples being tested. Mould was made of waterproof panels, which are mainly used to make formwork for reinforced concrete structures. After the material mixture had been placed in the mould, it was compacted with a vibrating plate. Value of the relative permittivity was determined using GPR with air-coupled antennas with a centre frequency of 1 and 2 GHz. In addition, the tube suction test (TST) was used to evaluate the moisture sensitivity of the test mixtures in relation to the increase in the fines content.

In the third phase, the results of the laboratory tests were statistically analysed and presented with the corresponding data-statistical parameters. Models were created to predict the value of the relative permittivity as a function of the moisture and fines content. In addition, models were developed for the correlation of relative permittivity values, which were determined using a percometer and GPR with an air-coupled antennas. This created the prerequisite for the implementation of a procedure that enables the qualitative assessment of UBG and the quantification of moisture and fines content based on the value of the relative permittivity.

The fourth phase comprised field investigations. At 30 sites, the value of the relative relative permittivity of UBG on existing pavements was determined by GPR using air-coupled antennas at a nominal frequency of 1 GHz. The UBG material was taken from the test pits at the GPR

measuring point. The moisture and fines content of the sampled material was analysed in the laboratory. By correlating the results of the field research and the laboratory tests, the possibility of using GPR to quantify moisture and fines in the UBG of the pavement based on relative permittivity was evaluated.

The doctoral dissertation is organised into ten chapters. The introductory chapter lays the foundations for the research and clearly defines the questions and aims of the dissertation. By presenting the current state of the road infrastructure, the importance of road maintenance is emphasised, particularly in relation to the change in the properties of UBG due to the increase in the proportion of moisture and fines. The problem is concretised by the need to develop new procedure for non-invasive, i.e. non-destructive, monitoring of these changes to enable timely road maintenance. The study recommends the use of GPR as a key tool for quantifying moisture and fines content and emphasises the advantages of this method over conventional destructive testing methods such as core drilling. The research hypotheses are clearly defined and include the identification of correlations between the value of relative relative permittivity obtained with the percometer and GPR and the actual moisture and fines content in the UBG. The research objectives were formulated with a particular focus on developing a procedure that would allow the condition of UBG to be effectively analysed in terms of moisture and fines content.

The second chapter provides a detailed overview of the current state of knowledge on the role and importance of UBG in pavement. The most important functions of UBG were highlighted, such as the transfer of traffic loads into the subgrade, the adaptability of the layer to different settlements of the underlying soil and the resistance to permanent deformations. By analysing the influence of the granulometric composition, in particular the proportion of fines and moisture, it was shown how decisive changes in these parameters are for the stability and bearing capacity of the UBG. It is concluded that an excessive proportion of fines and an increase in moisture can significantly deteriorate the mechanical properties of UBG, leading to damage to the pavement structure such as potholes, cracks and rutting. This finding emphasises the need for careful monitoring of UBG to ensure the longevity of pavement structures.

The third chapter is dedicated to GPR as a key tool for assessing the condition of transport infrastructure. The historical development of GPR, the principle of operation and the parameters that influence the propagation of electromagnetic waves through the medium are explained. The importance of the choice of antenna frequency for measurement accuracy is

particularly emphasised. The analysis of previous research work has shown that GPR has considerable potential not only for layer determination of thickness, but also for the detection of moisture and fines in layers. However, the application of the GPR needs to be further adapted and researched to increase its accuracy under real field conditions.

In the fourth chapter, TST is presented as an important method for assessing the quality of materials in terms of their moisture resistance. It describes in detail how the test is performed and how the materials are categorised according to their relative permittivity. The results of previous studies confirm that materials with a higher fines content are more sensitive to moisture, which can lead to significant problems with UBG, such as reduced bearing capacity and increased sensitivity to freezing. Based on previous research, it was concluded that the TST method is reliable in assessing potential moisture problems in UBG and that it can be useful for the qualitative categorisation of materials.

The fifth chapter deals with the application of TDR. TDR enables the volumetric determination of moisture content in unbound fine-grained materials. Various design solutions of the device are presented and the basic principles of its operation are explained. The limitations of the application in practise are pointed out, with particular emphasis on the placement of the probes in the sample. Some of the most suitable empirical, theoretical-empirical and physical models for determining the moisture content as a function of the relative permittivity are listed. In addition, the use of TDR in UBG is documented in detail.

The sixth chapter refers to the realisation of the previous laboratory tests. The previous laboratory tests comprised the determination of the geometric characteristics as well as the physical-mechanical and chemical properties of crushed stone, additional material and material mixtures of crushed stone and additional material. The tests were carried out with the aim of evaluating the material properties that influence the performance of GPR data acquisition and to ensure the reproducibility of the results and the possibility of comparison with the results of other research.

The seventh chapter presents the main laboratory tests. The procedure for selecting the moulds and the methods for determining the moisture content as well as the method for preparing the samples are described in detail. The collection and processing of GPR data is introduced and the results are presented. The main laboratory studies were carried out with the aim of determining the influence of changes in fines content and moisture content on the value of the relative relative permittivity of UBG. In order to achieve this goal, the values of the relative

relative permittivity of UBG at different fines and moisture contents were determined using GPR.

The eighth chapter describes the procedure for conducting the field research. The aim of the field research was to test the proposed method in a real environment. The results of field tests are shown, in which the value of the relative permittivity was determined on real pavements using GPR. In addition, the moisture and fines content were determined in laboratory tests.

In the ninth chapter, additional statistical analyses of the results of laboratory tests and field research are carried out. The mathematical models developed are presented, which make it possible to determine the value of the relative permittivity as a function of the moisture and fines content. In addition, a model for the correlation of the relative permittivity determined with GPR and percometer is presented. The developed model has the potential to quantify the moisture and fines content in the UBG of the pavement structure based on the relative permittivity, but additional research is needed.

The final chapter summarises the most important findings and results of the research work. The research objectives achieved are presented and the scientific and practical contributions are emphasised. Finally, the shortcomings and limitations identified are listed and recommendations and guidelines for future research are given.

Key words: *ground-penetrating radar; unbound base layer; relative permittivity; particles; moisture; tube suction test; percometer; time domain reflectometer*

SADRŽAJ

IZJAVA O IZVORNOSTI.....	a
O MENTORICI.....	b
ZAHVALA.....	c
SAŽETAK.....	e
EXTENDED ABSTRACT.....	f
1 UVOD	1
1.1 Obrazloženje odabrane teme	1
1.2 Cilj i hipoteze istraživanja	4
1.3 Metodologija i plan istraživanja	5
1.4 Struktura doktorskog rada	7
2 MEHANIČKI ZBIJENI NOSIVI SLOJ.....	10
2.1 Utjecaj sitnih zrna na svojstva MNS-a	13
2.2 Utjecaj vlage na svojstva MNS-a	17
3 GEORADAR.....	23
3.1 Povijesni razvoj	23
3.2 Principi rada GPR-a.....	25
3.2.1 Frekvencija i valna duljina	26
3.2.2 Parametri koji utječu na širenje EM valova	27
3.3 Primjena GPR-a na prometnoj infrastrukturi.....	30
3.4 Utjecaj vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti	37
4 TUBE SUCTION TEST.....	52
5 REFLEKTOMETAR U VREMENSKOJ DOMENI	58
6 PRETHODNA LABORATORIJSKA ISPITIVANJA	71
6.1 Drobljeni kameni materijal	71

6.1.1	Analiza granulometrijskog sastava.....	71
6.1.2	Stupanj neravnomjernosti.....	75
6.1.3	Određivanje oblika zrna	76
6.1.4	Procjena sitnih zrna metilenskim modrilom.....	77
6.1.5	Određivanje ekvivalenta pijeska	78
6.1.6	Određivanje sadržaja humusa.....	79
6.1.7	Određivanje gustoće zrna i upijanje	79
6.1.8	Ispitivanje otpornosti na smrzavanje.....	81
6.1.9	Određivanje otpornosti na drobljenje	82
6.1.10	Određivanje najveće suhe gustoće i optimalnog udjela vlage.....	83
6.1.11	Ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti	84
6.2	Dodani materijal	85
6.2.1	Analiza granulometrijskog sastava.....	85
6.2.2	Atterberg-ove granice tečenja i plastičnosti	87
6.3	Mješavine drobljenog kamenog i dodanog materijala.....	88
6.3.1	Analiza granulometrijskog sastava.....	89
6.3.2	Određivanje najveće suhe gustoće i optimalnog udjela vlage.....	89
6.3.3	Ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti	90
7	GLAVNA LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA	91
7.1	Odabir kalupa	91
7.2	Odabir metode za određivanje vlage	94
7.3	Postupak izrade uzoraka	95
7.4	Prikupljanje i obrada GPR podataka	97
7.5	Određivanje dinamičkog modula deformacije i stupnja zbijenosti	101
7.6	Provođenje Tube suction test-a.....	102

7.7	Rezultati glavnih laboratorijskih istraživanja	103
7.7.1	Fizikalno-mehanička svojstva mješavina materijala	103
7.7.2	Elektromagnetska svojstva mješavina materijala	104
7.7.3	Elektromagnetska svojstva mješavina materijala- utjecaj vlage	106
7.7.4	Elektromagnetska svojstva mješavina materijala- utjecaj sitnih zrna	110
7.7.5	Rezultati Tube suction test-a	112
8	TERENSKI ISTRAŽNI RADOVI	114
9	DISKUSIJA	119
10	ZAKLJUČAK	132
	LITERATURA	136
	Prilozi	I
	Prilog 1: Analiza granulometrijskog sastava uzoraka (prethodna laboratorijska ispitivanja) ...	II
	Prilog 2: Rezultati Proctorovog pokusa i CBR (prethodna laboratorijska ispitivanja)	IV
	Prilog 3: Analiza granulometrijskog sastava uzoraka (glavna laboratorijska ispitivanja)	VIII
	Prilog 4: Udio vlage, stupanj zbijenosti i dinamički modul deformacije	XXXII
	Prilog 5: Brzina EM vala u sloju	XXXV
	Prilog 6: Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti	XLII
	Prilog 7 Rezultati terenskih istražnih radova	XLIX
	Popis slika	LXXXI
	Popis tablica	LXXXVI
	Životopis s popisom objavljenih djela	LXXXVIII

1 UVOD

U okviru doktorskog rada istražena je mogućnost kvantifikacije vlage i sitnih zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju (MNS-u) kolničke konstrukcije primjenom georadara (eng. ground-penetrating radar- GPR) s air-coupled antenama na temelju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Brojna dosadašnja iskustva iz domene gospodarenja kolnicima ukazuju na drastično pogoršanje mehaničkih svojstva cjelokupne kolničke konstrukcije uslijed povećanje udjela vlage i sitnih zrna u MNS-u. GPR je posljednjih desetljeća sve više zastupljen u procjeni stanja kolničke konstrukcije zbog svoje nedestruktivnosti i mogućnosti primjene za različite svrhe. Njegov rad se zasniva na odašiljanju EM valova, mjerenju vremena potrebnog da se reflektirani EM val vrati do antene, izračunavanju brzine EM valova temeljem koje se određuje vrijednost relativne dielektrične permitivnosti u pojedinom sloju kolničke konstrukcije. Rezultati pojedinih istraživača upućuju na postojanje čvrste veze između varijacije vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti i promjene udjela vlage i sitnih zrna. Ovaj rad prikazuje postupak i rezultate ispitivanja i istraživanja kojima je procijenjena učinkovitost georadara u određivanju sadržaja vlage i sitnih zrna u MNS-u.

1.1 Obrazloženje odabrane teme

Kako bi se omogućilo sigurno i nesmetano odvijanje prometa, odnosno održala propisana tehnička i uporabna razina ceste, moraju se provoditi postupci i mjere održavanja. Važan dio održavanja čitave cestovne mreže čini sustavno održavanje kolnika. Nedovoljna ulaganja u redovno održavanje kolnika, zbog intenzivne izgradnje novih cestovnih dionica, rezultirala su lošim stanjem javnih cesta [1]. Ovo se posebno odnosi na ceste niže kategorije koje čine glavninu cestovne mreže [2]. Zbog navedenog pojavila se potreba za značajnim ulaganjem sredstava u održavanje kolnika [3]. Poznavanje stvarnog stanja kolnika je osnovni preduvjet za pravovremeno poduzimanje mjera održavanja, a ostvaruje se periodičnim vizualnim pregledima, terenskim mjerenjima i laboratorijskim ispitivanjima.

Iako su danas dostupne brojne nerazorne metode [4] kojima se mogu uspješno prikupiti podaci o stanju kolnika, ponajprije o površinskim svojstvima i nosivosti, te metode se ne primjenjuju u dovoljnoj mjeri zbog kompleksnosti njihove provedbe, cijene i potrebe za visoko osposobljenim osobljem. U praksi su se uvriježile nerazorne metode ispitivanja površinskih svojstva kolnika (ravnost, hvatljivost i sl.), dok se nerazorne metode ispitivanja nosivosti primjenjuju rijetko i to samo na problematičnim dionicama cesta više kategorije. Na cestama nižih kategorija podaci o stanju kolnika prikupljaju se tradicionalnim metodama, vizualnim pregledom i vađenjem jezgara. Vađenjem jezgri nije moguće dobiti cjelovitu sliku stanja

kolnika jer prikupljeni podaci vrijede isključivo za lokaciju vađenja jezgre. Ekstrapolacija izvan područja lokacije vađenja jezgri može dovesti do pogrešne ocjene stanja kolnika. Nadalje, sama metoda je destruktivna, iziskuje obustavu prometa za vrijeme vađenja jezgre kao i sanaciju dijela kolnika iz kojeg je izvađena jezgra. Zbog svega navedenog postoji potreba za svođenjem broja ovih ispitivanja na najmanju moguću mjeru. Kada su u pitanju ceste niže kategorije održavanju se najčešće pristupa bez saznanja o stvarnom uzroku oštećenja. Uobičajeno se održavanje ovih cesta svodi na sanaciju vidljivih površinskih oštećenja. Ovim pristupom se osigurava uporabivost kolnika na kraći vremenski period budući da se samo privremeno, uklanjaju posljedice oštećenja, a ne sanira se uzrok njihova nastanka.

Jedan od mogućih uzroka nastanka površinskih oštećenja kao što su udarne rupe, kolotrazi, lokalna ulegnuća, izdizanje kolnika te uzdužne, mrežaste i pukotine u tragovima kotača je promjena svojstva MNS-a kolničke konstrukcije [5]. Na svojstava MNS-a izrazito negativan utjecaj može imati povećanje udjela vlage [6,7]. Povećanje udjela vlage rezultira smanjenjem nosivosti i vrijednosti rezilijentnog modula te ubrzanom pojavom trajnih deformacija [7,8]. Budući da je udio vlage važna informacija za praćenje stanja kolnika razvijene su brojne nerazorne metode utvrđivanja istog [9]. Među njima se ističe metoda u kojoj se primjenjuje reflektometar u vremenskoj domeni (eng. time domain reflectometry- TDR) čiji se princip rada zasniva na refleksiji EM valova [10]. Brzina prolaska EM valova obrnuto je proporcionalna vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti promatranog medija [11]. Na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti slojeva kolničke konstrukcije utječu: vrsta materijala, njegova zbijenost, temperatura, udio vlage te frekvencija mjernog uređaja. Među navedenim parametrima najznačajniji utjecaj na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti ima udio vlage. Naime, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti cestograđevnih materijala, u suhom stanju, kreće se između 2 i 10, a vode između 80 i 81 [11]. Povećanje udjela vlage dovodi do povećanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. TDR-om nije moguće direktno odrediti udio vlage već se on izračunava na temelju izmjerene vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti [12,13]. Topp i suradnici su razvili jednadžbu za izračunavanje vlažnosti tla koju su Baran te Ekblad i Isacsson unaprijedili i prilagodili primjeni kod zbijenog drobljenog kamenog materijala [12]. TDR-om se mogu prikupljati podaci na određenoj lokaciji jer zahtjeva postavljanje sonde u sloj koji se ispituje te na taj način dobivamo točkastu informaciju o udjelu vlage. Alternativa TDR-u u pogledu određivanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti je GPR koji omogućava kontinuirano prikupljanje podataka pri uobičajenoj brzini vožnje [4]. Prvotno se GPR, s aspekta održavanja kolnika, primjenjivao za određivanje debljine slojeva što mu je i dalje primarna namjena [4,14]. Danas se istražuju i

unaprijeđuju mogućnosti primjene GPR-a za otkrivanje armature i podzemnih instalacija, određivanje stupnja zbijenosti sloja te detekciju pukotina, šupljina, delaminacije i vlage [14–18].

Muller i suradnici [10] su korelirali vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene GPR-om s i TDR-om za uzorke izrađene od kamenog agregata s različitim udjelima vlage. Zaključili su da vrijednosti znatno razlikuju kod uzoraka s nižom gustoćom i udjelom vlage. U istraživanju Grote-a i suradnika [19] utvrđeno je da se primjenom GPR-a s ground-coupled antenama frekvencije 900 i 1200 MHz može odrediti udio vlage zbijenog drobljenog kamenog materijala s točnošću 21 l/m^3 u usporedbi s gravimetrijskim mjerenjem.

Na promjenu udjela vlage posebno je osjetljiv MNS s povećanim udjelom sitnih zrna. U tehničkim specifikacijama država EU veličina sitnih zrna kao i njihov najveći dopušteni udio su različito definirani. Ovisno o pojedinoj državi, sitnim zrnima se smatraju zrna promjera manjeg ili jednakog od 0,02 mm, 0,063 mm, 0,074 mm, 0,075 mm, odnosno 0,08 mm, a najveći dopušteni udio od 3% pa do čak 30% [20]. Povećanjem udjela sitnih zrna smanjuje se nosivost MNS-a [21], a uz prisutnost povećanog udjela vlage značajno opada i vrijednost rezilijentnog modula [22].

Tosti i suradnici [23] su ispitali utjecaj povećanja udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Ispitivanje je provedeno na tri vrste materijala koji se primjenjuju u cestogradnji: šljunku (4-8 mm), krupnozrnatom pijesku (1-2 mm) i sitnozrnatom pijesku (0,125-0,250 mm). Promjer sitnih zrna bio je manji od 0,125 mm, a njihov udio je povećavan od 0 do 25%. Povećanjem udjela sitnih zrna za 25%, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti povećala se za približno: 50% (šljunak), 40% (krupnozrnat pijesak) i 45% (sitnozrnat pijesak). Tosti i suradnici su također potvrdili da povećanje udjela vlage rezultira dodatnim povećanjem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti mješavina sa sitnim zrnima [24] te da na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti utječe oprema koja se koristi prilikom ispitivanja kao i korištena metoda obrade GPR podataka.

Istraživanja o utjecaju povećanja udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti provedena su i na materijalu zastorne prizme. Prema Leng-u i Al-Qadi-u, povećanjem udjela sitnih zrna povećava se vrijednost relativne dielektrične permitivnosti mješavine i taj odnos je gotovo linearan. Povećanjem udjela sitnih zrna za 50% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti se poveća za 11% u slučaju agregata eruptivnog podrijetla, odnosno 22% u slučaju agregata karbonatnog podrijetla [25]. Clark i suradnici [26], su ustanovili da se povećanjem udjela sitnih zrna povećava vrijednost relativne dielektrične permitivnosti za 39%. Pri povećanju udjela vlage s 0 na 5% kod uzorka sa sitnim zrnima

vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti se povećala za 160% u odnosu na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti suhog uzorka. Osjetljivost znatog kamenog materijala na promjenu udjela vlage ispituje se Tube suction test (TST) metodom [27,28]. Ispitivanje se temelji na promjeni vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uslijed pojave kapilarnog uzdizanja vlage, koje je posebno izraženo na materijalima s povećanim udjelom sitnih zrna. Tijekom ovog ispitivanja vrijednost relativne dielektrične permitivnosti se mjeri percometerom. S obzirom na izmjerenu vrijednost relativne dielektrične permitivnosti razlikujemo tri kategorije znatog kamenog materijala: dobre kvalitete, upitne kvalitete i loše kvalitete. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti veće od 16 dobar su pokazatelj potencijalnih problema MNS-a kao što je niska posmična čvrstoća, osjetljivost na pojavu trajnih deformacije i povećana osjetljivost na smrzavanje [27,29]. Saarenketo i suradnici [30] su metodom TST-a na uzorcima znatog kamenog materijala ispitali utjecaj povećanja udjela sitnih zrna ($<0,074$ mm) na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Rezultati su pokazali da udio sitnih zrna većih od 5% rezultira povećanjem udjela vlage i prekoračenjem vrijednost relativne dielektrične permitivnosti za agregat dobre kvalitete (9-10). Dosadašnja su istraživanja pokazala da s povećanjem udjela sitnih zrna negativan utjecaj vlage na fizikalno mehanička svojstva MNS-a postaje izraženiji. S druge strane uočeno je da promjena udjela vlage i sitnih zrna utječe na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti materijala, što otvara mogućnost primjene određenih nerazornih metoda prilikom ocjene stanja MNS-a. Mogućnost primjene vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti kao parametra ocijene ovisi o točnosti kojom ju je moguće odrediti, a to u velikoj mjeri ovisi o odabranoj metodi i opremi.

Provedena istraživanja o utjecaju promjene udjela vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti MNS-a bila su uglavnom usmjerena na laboratorijska ispitivanja koja su provedena na pojedinačnim frakcijama, a ne na mješavini prikladnoj za izradu MNS-a. Kako su ispitivanja provedena u laboratoriju korištena je oprema koja nije prikladna za teren pa tako i za istraživanja u okviru sustava održavanja kolnika.

1.2 Cilj i hipoteze istraživanja

Cilj ovog rada bio je razvoj novog postupka za kvantifikaciju vlage i sitnih zrna u MNS-u učinkovitom analizom vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti utvrđene na temelju podataka prikupljenih GPR-om. Time bi se omogućila pravovremena provedba postupaka održavanja kolnika te bi se na taj način spriječio nastanak strukturalnih oštećenja. Do navedenog cilja se pokušalo doći kroz četiri koraka:

- ispitivanjem utjecaja promjene udjela vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne

dielektrične permitivnosti MNS-a primjenom GPR-a u kontroliranim uvjetima;

- ocjenom osjetljivosti MNS-a s promjenjivim udjelom sitnih zrna na prisutnost vlage primjenom percometer-a, odnosno provedbom TST-a;
- uspostavom matematičkih modela za kvalitativnu ocjenu MNS te kvantifikaciju vlage i sitnih zrna;
- ocjenom mogućnosti primjene predloženog matematičkog modela u realnim uvjetima na terenu.

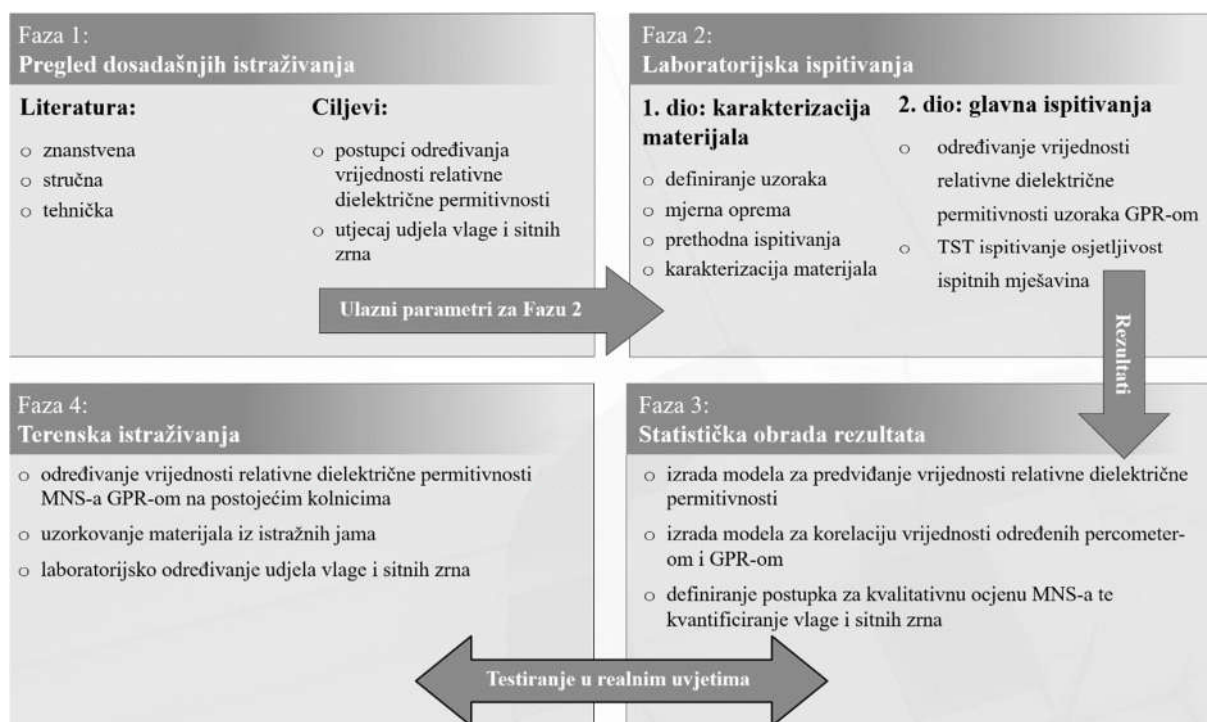
Provedenim laboratorijskim ispitivanjima i terenskim istraživanjima te analiziranjem rezultata provjerena je sljedeća hipoteza: *Uspostavom korelacijskih odnosa između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti dobivene georadarom s air-coupled antenama na terenu i u laboratoriju moguće je kvantificirati vlagu i sitna zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju kolničke konstrukcije.*

1.3 Metodologija i plan istraživanja

Doktorski rad bio je usmjeren na kvantifikaciju vlage i sitnih zrna u MNS-u primjenom GPR-a s air-coupled antenama na temelju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, a proveden je kroz četiri faze (Slika 1-1). Prva faza istraživanja obuhvaćala je detaljan pregled znanstvene i stručne literature o postupcima određivanju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti MNS-a primjenom nerazornih metoda: GPR-a, TDR-a i percometer-a.

Druga faza obuhvaćala je izradu uzoraka i provedbu laboratorijskih ispitivanja s ciljem određivanja vrijednosti njihove relativne dielektrične permitivnosti. Prije realizacije glavnih ispitivanja provedena su prethodna laboratorijska ispitivanja. Prethodna laboratorijska ispitivanja imala su za cilj određivanje geometrijskih karakteristika te fizikalno-mehaničkih i kemijskih svojstava kamenog materijala, dodanog materijala i mješavina kamenog i dodanog materijala. Nadalje, za definirane ispitne mješavine materijala određeni su tehnološki parametri zbijanja koji su korišteni pri izradi uzoraka. Glavni materijal bio je drobljeni kamen nazivne frakcije 0/31,5 mm čija se granulometrijska krivulja nalazi unutar graničnog područja za izradu MNS-a definiranog općim tehničkim uvjetima. Dodani materijal dobio se usitnjavanjem osušenog nepečenog glinenog crijepa. Udio drobljenog kamena bio je konstantan, a variran je udio dodanog materijala. Dodani materijal doziran je u masenom udjelu od 3 do 15%, korak 3%, čime je dobiveno ukupno šest ispitnih mješavina materijala. Na svakoj mješavini je variran udio vlage na način da je korišteno šest različitih razina. Za određeni udio vlage i sitnih zrna izrađena su po tri ispitna uzorka te je u konačnici ispitano ukupno 108 uzoraka. Temeljem inicijalnog pregleda literature u fazi prijave tema, predviđena je ugradnja uzoraka s određenim

udjelom vlage i sitnih zrna u kalup izrađen od ploča polimetakrilata dimenzija 50 x 80 x 30 cm. Nadalje, planirano je postavljanje po tri TDR sonde u svaki kalup kako bi se mogla pratiti eventualna promjena udjela vlage po dubini uzorka. Od navedenog se odustalo nakon probnih ispitivanja, detaljnog pregleda literature te konzultacija s proizvođačima opreme. Spomenute dimenzije kalupa bile su neadekvatne s obzirom na veličinu otiska antena. Stoga je izrađen kalup od oplatnih ploča unutarnjih dimenzija 110 x 120 x 30 cm. Nedovoljni razmak između šipki sonde TDR-a s obzirom na granulometrijski sastav mješavina materijala prouzročio je segregaciju materijala koja je rezultirala netočnim očitanjima udjela vlage. Zbog toga je izabrana gravimetrijska metoda za određivanje udjela vlage. Nakon ugradnje mješavine materijala u kalup ista je zbijena vibro pločom. Primjenom GPR-a s air-coupled antenama nazivne frekvencije 1 i 2 GHz određene su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti u uzdužnom i poprečnom smjeru. Dodatno, metodom TST-a ocijenjena je osjetljivost ispitnih mješavina na vlagu s obzirom na povećanje udjela sitnih zrna.



Slika 1-1 Shematski prikaz faza istraživanja

U trećoj fazi rezultati laboratorijskih ispitivanja obrađeni su statistički i prikazani s pripadnim statističkim parametrima. Uspostavljeni su matematički modeli za predviđanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti s obzirom na udio vlage i sitnih zrna. Također, razvijeni su modeli za korelaciju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene percometer-om odnosno GPR-om s air-coupled antenom. Time je ostvaren preduvjet za implementaciju postupka koji omogućuje kvalitativnu ocjenu MNS-a te kvantifikacija vlage i sitnih zrna temeljem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti.

Četvrta faza obuhvatila je provedbu terenskih istraživanja s ciljem testiranja predloženih matematičkih modela u realnim uvjetima. Na postojećim kolnicima na 30 lokacija, GPR-om s air-coupled antenama nazivne frekvencije 1 GHz, određene su vrijednost relativne dielektrične permitivnosti MNS-a. Na lokaciji prikupljanja podataka GPR-om, iz istraţnih jama uzorkovan je materijal MNS-a. U laboratoriju su određeni udjeli vlage i sitnih zrna u uzorkovanom materijalu. Usporedbom rezultata terenskih istraživanja i laboratorijskih ispitivanja faze četiri s rezultatima faze dva i tri ovog doktorskog rada testirana je mogućnost primjene GPR-a za kvantifikaciju vlage i sitnih zrna u MNS-u kolničke konstrukcije na temelju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti.

1.4 Struktura doktorskog rada

Doktorski rad je strukturalno podijeljen, uz uvodne napomene, literaturu i priloge, na deset poglavlja. Uvodno poglavlje postavlja temelje za istraživanje i jasno definira problematiku te ciljeve doktorskog rada. U ovom je poglavlju naglašena važnost održavanja kolnika, posebno u kontekstu promjene svojstava MNS-a uslijed povećanja udjela vlage i sitnih zrna. Istaknuta je potreba za razvojem novih postupaka nerazornog praćenja tih promjena kako bi se omogućilo pravovremeno poduzimanje radova u okviru sustava održavanja kolnika. Korištenjem GPR-a kao ključnog alata za kvantifikaciju vlage i sitnih zrna ostvaruju se određene prednosti ove metode u odnosu na tradicionalne destruktivne metode ispitivanja. Jasno je definirana hipoteza istraživanja, koja podrazumijeva uspostavu korelacijskih odnosa između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti dobivene GPR-om s air-coupled antenama na terenu i u laboratoriju s ciljem kvantifikacije vlage i sitnih zrna u MNS-u. Formulirani su ciljevi istraživanja s posebnim naglaskom na razvoj metode koja će omogućiti učinkovitu analizu stanja MNS-a u pogledu udjela vlage i sitnih zrna.

Drugo poglavlje daje detaljan pregled dosadašnjih saznanja o ulozi i značaju MNS-a u kolničkim konstrukcijama. Istaknuta je ključna funkcija MNS-a, preuzimanje i prijenos prometnog opterećenja na posteljicu kao i ostvarivanje dostatne ukupne debljine kolničke konstrukcije. Kroz analizu utjecaja sitnih zrna i vlage, naglašeno je koliko su promjene u tim parametrima važne za stabilnost i nosivost MNS-a. Zaključuje se da prekomjerni udio sitnih zrna i povećanje udjela vlage mogu značajno utjecati na degradaciju MNS-a, što vodi do oštećenja kolničke konstrukcije. Ova spoznaja ukazuje na potrebu za pažljivim praćenjem stanja MNS-a kako bi se osigurala dugotrajnost kolničkih konstrukcija.

Treće poglavlje posvećeno je GPR kao ključnom alatu u procjeni stanja prometne infrastrukture. Objašnjen je povijesni razvoj georadara, princip rada i parametri koji utječu na

širenje EM valova kroz medij. Posebno se ističe važnost odabira frekvencije antene na raspon prikupljanja podataka. Kroz analizu dosadašnjih istraživanja, zaključeno je da GPR ima značajan potencijal ne samo u određivanju debljine slojeva, već i u detekciji vlage i sitnih zrna u nevezanim slojevima izrađenim od drobljenog kamenog materijala. Ipak, GPR zahtijeva dodatne prilagodbe i istraživanja kako bi se povećala točnost prikupljanja podataka u stvarnim uvjetima na terenu.

U četvrtom poglavlju prikazan je TST kao važna metoda za ocjenu kvalitete materijala s obzirom na njihovu osjetljivost na pojavu vlage. Detaljno je opisana provedba samog ispitivanja i kvalitativna kategorizacija materijala prema njihovoj relativnoj dielektričnoj permitivnosti. Rezultati dosadašnjih istraživanja potvrđuju da materijali s većim udjelom sitnih zrna pokazuju veću osjetljivost na pojavu vlage, što može dovesti do pojave značajnih negativnih posljedica u MNS-u, poput smanjene nosivosti i povećane osjetljivosti na smrzavanje. Temeljem dosadašnjih istraživanja zaključeno je da je TST metoda pouzdana u procjeni potencijalnih problema s vlagom u MNS-u te da može biti korisna za kategorizaciju materijala u kvalitativnom smislu.

U petom poglavlju obrađuje se primjena uređaja TDR. TDR omogućava volumno određivanje udjela vlage u nevezanim sitnozrnatom materijalima. Prikazana su različita konstruktivna rješenja uređaja te su objašnjeni osnovni principi njegova rada. Istaknuta su ograničenja u primjeni na terenu, gdje je potrebno posebnu pažnju posvetiti postavljanje sonde u uzorak. Navedeni su neki od najprimjenjivijih empirijskih, teorijsko-empirijskih i fizikalnih modela za određivanje udjela vlage s obzirom na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Osim toga, detaljno je opisano korištenje TDR-a u slojevima od nevezanog kamenog materijala.

Šesto poglavlje odnosi se na provedbu prethodnih laboratorijskih ispitivanja. Prethodna laboratorijska ispitivanja obuhvaćala su određivanje geometrijskih karakteristika te fizikalno-mehaničkih i kemijskih svojstava drobljenog kamenog materijala, dodanog materijala te mješavina materijala sačinjenih od drobljenog kamena i dodanog materijala. Ispitivanja su provedena s ciljem procjene svojstva materijala koja imaju utjecaj na provedbu prikupljanja podataka GPR-om te osiguranje ponovljivosti rezultata i mogućnosti usporedbe rezultata s rezultatima drugih istraživanja.

U sedmom poglavlju prikazana je provedba glavnih laboratorijskih ispitivanja. Detaljno je opisan postupak odabira kalupa i metode za određivanje udjela vlage kao i način izrade uzoraka. Prikazano je prikupljanje i obrada GPR podataka te su predloženi rezultati. Glavna laboratorijska istraživanja provedena su s ciljem određivanja utjecaja promjene udjela sitnih zrna i vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti MNS-a. Kako bi se ostvario ovaj

cilj određene su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti MNS-a pri različitim udjelima sitnih zrna i vlage na temelju podataka prikupljenih GPR-om. Na kraju ovog poglavlja prikazani su rezultati TST-a.

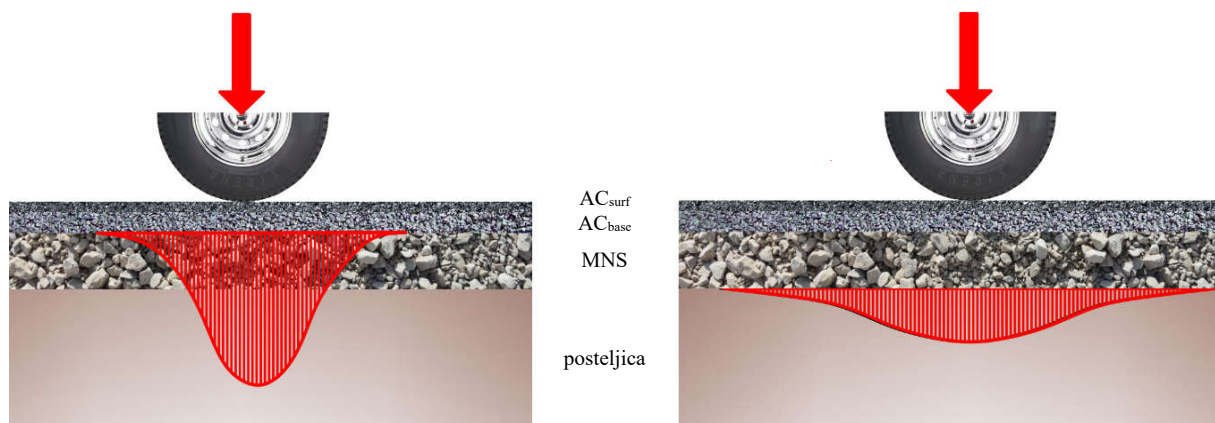
U osmom poglavlju predložen je postupak provedbe terenskih istraživanja. Prikazani su rezultati terenskih istraživanja prilikom kojih je GPR primijenjen za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti na stvarnim kolnicima. Na uzorcima uzorkovanim na lokacijama prikupljanja podataka GPR-om, laboratorijskim ispitivanjem utvrđeni su udjeli vlage i sitnih zrna.

U okviru devetog poglavlja provedene su dodatne statističke analize rezultata laboratorijskih ispitivanja i terenskih istraživanja. Prikazani su razvijeni matematički modeli koji omogućuju određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti s obzirom na udio vlage i sitnih zrna. Također, predstavljen je model za korelaciju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene GPR-om i percometer-om. Razvijeni model ima potencijal za kvantifikaciju vlage i sitnih zrna u MNS-u kolničke konstrukcije na temelju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, ali potrebna je provedba dodatnih istraživanja.

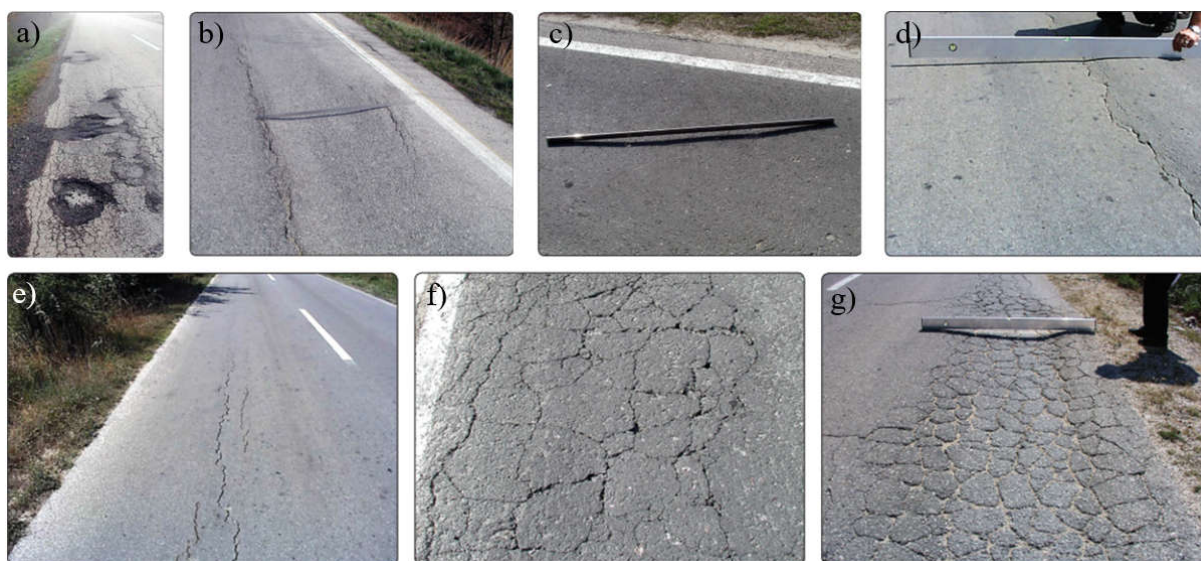
U desetom poglavlju rekapitulirana su najvažnija saznanja i rezultati istraživanja. Prikazani su ostvareni istraživački ciljevi te su istaknuti znanstveni i praktični doprinosi. Naposljetku, navedeni su uočeni nedostaci i ograničenja te su dane preporuke i smjernice za buduća istraživanja.

2 MEHANIČKI ZBIJENI NOSIVI SLOJ

Mehanički zbijeni nosivi sloj (MNS) kolničke konstrukcije je nevezani sloj izrađen od zrnatih materijala. Za izradu MNS-a tradicionalno se primjenjuje drobljeni kameni materijali te šljunak i pijesak. U posljednje vrijeme, jačanjem svijesti o zaštiti okoliša i potrebi za racionalnijim gospodarenjem prirodnim resursima, sve više se koriste reciklirani materijali te nusproizvodi iz industrijske proizvodnje poput šljake [31–33]. Reciklirani materijali dobivaju se preradom anorganskih materijala korištenih u izgradnji objekata kao što su: asfalt, beton, cigla, crijep, keramika i sl. MNS se izvodi na posteljici te pruža potporu i stabilnost gornjim slojevima kolničke konstrukcije. Ključna prednost izrade MNS-a od nevezanih zrnatih materijala ogleda se u njegovoj sposobnosti prilagođavanja deformacijama nastalim slijeganjima temeljnog tla. Budući da MNS nije povezan s posteljom, može se prilagoditi manjim slijeganjima temeljnog tla sprječavajući pojavu značajnijih oštećenja gornjih slojeva kolničke konstrukcije. U kolničkoj konstrukciji MNS ima prije svega nosivu funkciju. Preuzima opterećenje od gornjih nosivih slojeva, prenosi ih na postelju na način da naprezanja koja se u njima stvaraju pod djelovanjem vertikalnih sila ne premaše dozvoljena naprezanja u postelji (Slika 2-1). Osim nosive funkcije MNS služi kao privremeni kolnik bez vezanog zastora, sloj u funkciji zaštite od smrzavanja, sloj srednje krutosti, između vezanih slojeva kolničke konstrukcije i postelje [20]. Mehanička stabilnost sloja mora biti u najvećoj mogućoj mjeri nepromjenjiva tijekom uporabnog vijeka i neovisna o klimatskim uvjetima osobito uslijed promjena udjela vlage u materijalu. Povećanje udjela sitnih zrna i vlage može značajno utjecati na mehanička svojstva MNS-a. Prema katalogu oštećenja asfaltnih kolnika [5] upravo je promjena mehaničkih svojstva MNS-a jedan od mogućih uzrok nastanka oštećenja kolnika kao što su: udarne rupe, kolotrazi, lokalna ulegnuća, izdizanje kolnika te uzdužne, mrežaste i pukotine u tragovima kotača (Slika 2-2). Najznačajnija mehanička svojstva su: otpornost na pojavu trajnih deformacija, krutost i nosivost. Pod djelovanjem prometnog opterećenja u MNS-u se javljaju

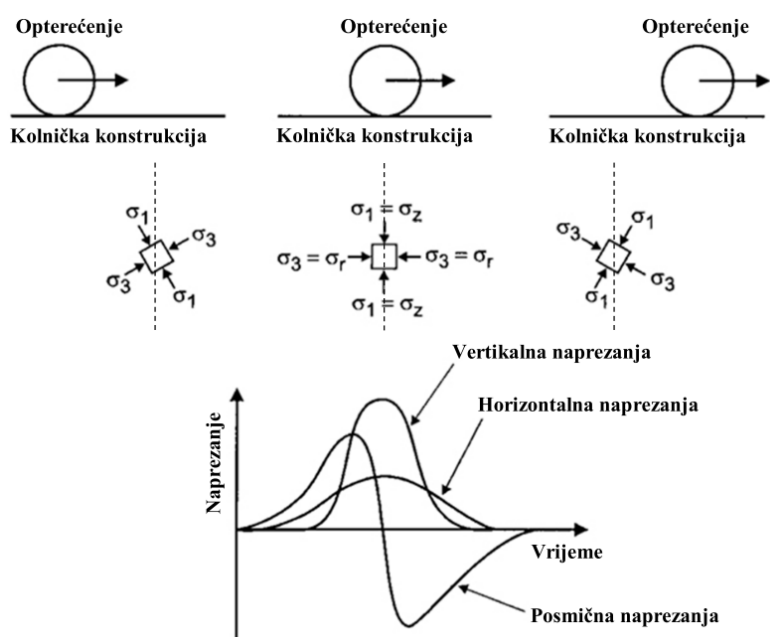


Slika 2-1 Prijenos opterećenje u kolničkoj konstrukciji



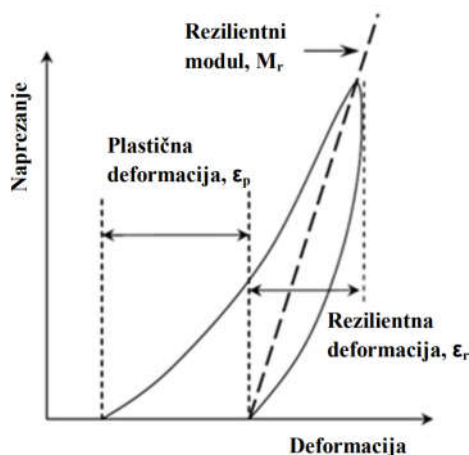
Slika 2-2 Oštećenja površine kolnika [5]: a) udarne rupe; b) kolotrazi; c) lokalna ulegnuća; d) izdizanje kolnika; e) uzdužne pukotine, f) mrežaste pukotine; g) pukotine u tragovima kotača

ciklička naprezanja koja se sastoje od vertikalnih, horizontalnih i posmičnih komponenti (Slika 2-3). Na slici 2-3 σ_1 , σ_2 i σ_3 predstavljaju glavna naprezanja, a σ_z je okomito naprezanje [34]. U MNS-u vertikalna i horizontalna naprezanja su tlačna, a posmično naprezanje nakon prolaza vozila može promijeniti predznak pri čemu dolazi do rotacije glavnih osi naprezanja [35]. Glavna naprezanja djeluju vertikalno i horizontalno na element kolničke konstrukcije samo kada su posmična naprezanja jednaka nuli, odnosno neposredno ispod centra opterećenja [20]. Veličina naprezanja u kolniku varira s dubinom ovisno o krutosti pojedinih slojeva kolničke konstrukcije [36].



Slika 2-3 Stanje naprezanja elementa MNS-a [37]

MNS je anizotropan te elasto-plastičan sloj čije se deformacijsko ponašanje može opisati rezilijentnim (elastičnim) i trajnim (plastičnim) deformacijama (Slika 2-4) [34]. Deformacije koje se javljaju u MNS-u rezultiraju promjenom oblika zrna uslijed njihova lomljenja i drobljenja te klizanja i kotrljanja pojedinih zrna. Prema Werkmeister-u [38] rezilijentne deformacije posljedica su deformacije pojedinačnih zrna, dok su trajne deformacije uzrokovane preslagivanjem (reorijentacijom) zrna. Obično je rezilijentna deformacija mnogo veća od trajne deformacije [34].



Slika 2-4 Stanje naprezanja u MNS-u [20]

Krutost MNS-a odnosi se na njegovu sposobnost da se odupre vertikalnim deformacijama pod prometnim opterećenjem. Krući sloj ima veći rezilijentni modul i otporan je na prekomjerno savijanje. U literaturi je uobičajeno da se, kada se piše o nevezanim zrnatim materijalima, pojam modul elastičnosti (E) zamjenjuje se pojmom rezilijentni modul (M_r) kako bi se opisalo elastično ponašanje materijala [39]. Rezilijentnim modulom opisuje se krutost nevezanih slojeva kolničke konstrukcije, a određen je jednačbom [40]:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.1)$$

gdje su: M_r rezilijentni modul (MPa); σ_d devijatorsko naprezanje (MPa); ϵ_r rezilijentna deformacija. Devijatorsko naprezanje određeno je jednačbom [41]:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.2)$$

gdje su: σ_1 glavno osno naprezanje (MPa); σ_3 bočni pritisak (MPa). Ovi se parametri obično određuju dinamičkim triaksijalnim ispitivanjem [42–44].

Nosivost MNS-a odnosi se na sposobnost sloja da može podnijeti promjenjiva prometna opterećenja bez pojave pretjeranih deformacija ili sloma. MNS zadovoljavajuće nosivosti omogućuje raspodjelu opterećenja na veću površinu, smanjujući naprezanja na posteljici. Nosivost mješavina ocjenjuje se na temelju laboratorijski određenog kalifornijskog indeksa

nosivosti (eng. California bearing ratio- CBR) [45]. Nosivost izvedenog sloja MNS-a ocjenjuje se ispitivanjem modula stišljivosti [46] i stupnja zbijenosti [47].

2.1 Utjecaj sitnih zrna na svojstva MNS-a

Granulometrijski sastav je najvažnije svojstvo MNS-a jer o njemu ovisi elastično odnosno plastično ponašanje sloja [48]. MNS se izrađuje od mješavine materijala sa zrnima različite veličine. Međusobno ukliještena krupna zrna MNS-a formiraju strukturu koja prenosi opterećenje s gornjih slojeva kolničke konstrukcije na posteljicu. Uloga sitnih zrna je popunjavanje šupljina između krupnih zrna i osiguravanje stabilnosti nosive strukture sprječavanjem relativnih pomaka krupnih zrna [49]. Nedostatak sitnih zrna uzrokovat će nestabilnost nosive strukture te će pod prometnim opterećenjem doći do promjene položaja krupnih zrna. U slučaju prekomjernog udjela sitnih zrna ona u potpunosti obavijaju krupna zrna čime se onemogućuje njihov međusobni kontakt što dovodi do smanjenja nosivosti MNS-a [50]. Trenje koje se ostvaruje kontaktom sitnih zrna je manje od onog koji se razvija na kontaktu krupnih zrna. Promjer kojim se definira sitno zrno kao i najveći dozvoljeni maseni udio sitnih zrna u mješavini materijala koja se koristi za izradu MNS-a varira ovisno o pojedinoj državi (Tablica 2-1). U državama u kojima prevladava hladnija klima stroži su zahtjevi u pogledu najvećeg dopuštenog udjela sitnih zrna. Thompson i Smith [51] napominju da su loša svojstva MNS-a općenito povezana s korištenjem mješavine materijala s udjelom sitnih zrna "blizu" ili "iznad" propisane granične vrijednosti odnosno u slučaju udjela vlage veće od optimalne.

Tablica 2-1 Promjer sitnog zrna i najveći dozvoljeni udio [20]

Država	Promjer sitnog zrna (mm)	Najveći dozvoljeni udio (%)
Belgija	0,063	8
Češka	0,063	5 (12)
Danska	0,074	9
Francuska	0,063	4 (6)
Grčka	0,074	15
Hrvatska	0,020	3
Irska	0,074	8
Island	0,020	3
Mađarska	0,020	0,5
Nizozemska	0,074	6
Norveška	0,074	9
Portugal	0,074	30
Španjolska	0,074	10

Općenito, dobro graduirani materijali s umjerenim sadržajem sitnih zrna imaju više vrijednosti rezilijentnog modula [52], a svako povećanje udjela sitnih zrna rezultirati će smanjenjem vrijednosti rezilijentnog modula [53,54]. S druge pak strane, mješavine slabo graduiranog materijala otvorenog sastava imaju tendenciju da im se značajnije smanji vrijednost

rezilijentnog modula s povećanjem udjela sitnih zrna u usporedbi s mješavinama dobro graduiranog materijala [55,56]. Hicks [49] je otkrio da sitna zrna ($<0,075$ mm) pospješuju pojavu kapilarnog uzdizanja vlage unutar materijala i povećavaju osjetljivost na smrzavanje. Ustvrdio je da se kod mješavina materijala sa udjelom sitnih zrna više od 10% značajno smanjuje nosivost nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Stoga je predložio ograničavanje udjela sitnih zrna na 12%, a u područjima gdje vladaju niske temperature najveći udio sitnih zrna trebao bi biti niži od 10%. Autor je predložio gornju granicu 12% umjesto 10% kako bi se u što većoj mjeri mogao iskoristiti materijal s lokalnih pozajmišta. Bilodeau i Doré [57] proveli su ciklično triaksijalno ispitivanje na 18 mješavina materijala sastavljenih od: djelomično drobljenog gnajsa, drobljenog vapnenca i drobljenog bazalta. Rezultati istraživanja pokazali su da na rezilijentni modul djelomično drobljenog materijala najznačajniji utjecaj ima udio sitnih zrna te da se rezilijentni modul povećava s povećanjem udjela sitnih zrna. Kod drobljenih materijala nisu uočili značajniji utjecaj sitnih zrna na vrijednost rezilijentnih modula. Za razliku od njih Hicks i Monismith [58] uočili su povećanje rezilijentnog modula s povećanjem udjela sitnih zrna ($<0,075$ mm) kod mješavina od drobljenog kamena, ali kod djelomično drobljenog kamena trend je bio suprotan. Rezultati istraživanja Jorenby-a i Hicks-a [59] pokazali su početno povećanje krutosti, a zatim značajno opadanje iste s povećanjem udjela dodane gline (Tablica 2-2) koja je pomiješana s drobljenim kamenim materijalom. Početno poboljšanje krutosti pripisali su povećanju broja kontaktnih točaka između zrna materijala.

Tablica 2-2 Granulometrijski sastav dodane gline [59]

Otvor sita (mm)	2,000	0,425	0,075	0,020	0,002	0,001
Prolaz kroz sito (%)	99,5	97,8	90,2	83,6	54,9	43,4

Iz rezultata istraživanja Gandara i suradnika [60] vidljivo je da optimalni udio sitnih zrna ($<0,075$ mm) u MNS-iznosi između 5 i 10%. Pri tom udjelu sitnih zrna sloj MNS-a ima zadovoljavajuću čvrstoću i vrijednost rezilijentnog modula te dobru otpornost na utjecaj vlage. Yoder i Witczak [61] uočili su da je optimalni udio sitnih zrna pri kojem se dobivaju zadovoljavajuće vrijednosti rezilijentnog modula i najveće vrijednost CBR u rasponu od 6% do 9%. Arnold [62] je ustvrdio da mješavine dobre kvalitete bez dodanih sitnih zrna imaju niži rezilijentni modul u usporedbi s mješavinama s 10% sitnih zrna gline. U svom istraživanju Maree [63] je zabilježila najveću vrijednost rezilijentnog modula pri udjelu sitnih zrna od 9%. Haynes i Yoder [64] proveli su istraživanje na mješavinama drobljenog kamena te šljunka. Udio sitnih zrna ($<0,075$ mm) iznosio je 6,2, 9,1, i 11,5%. Rezultati istraživanja pokazali su da je optimalni udio sitnih zrna 9,1% bez obzira na vrstu materijala. Naime, rezilijentni modul se

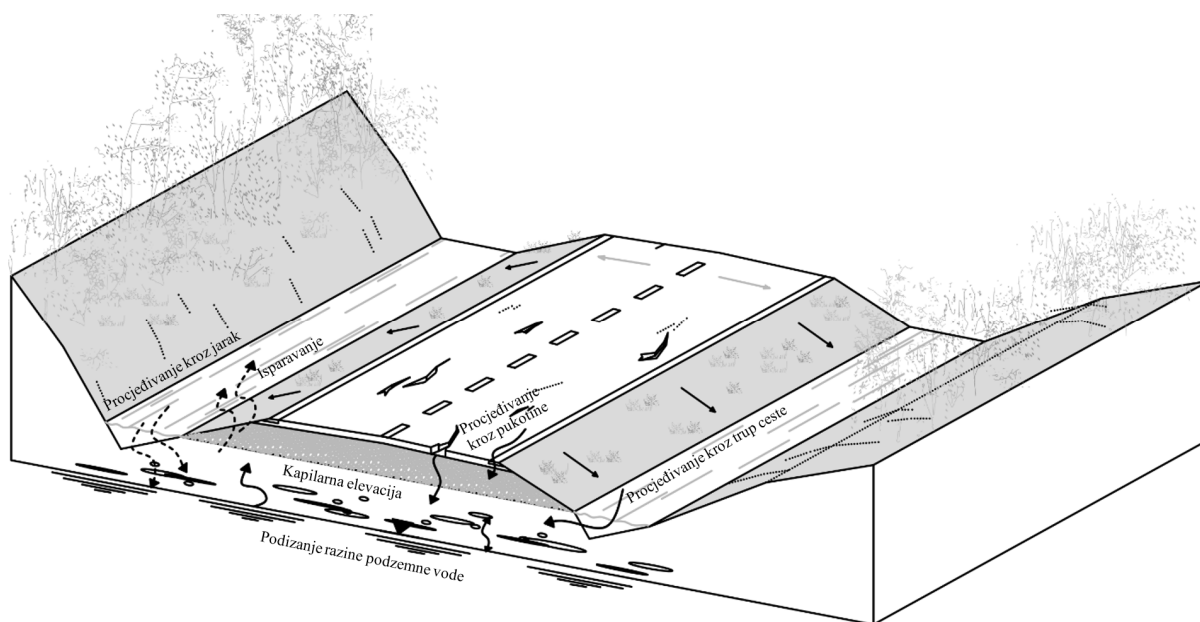
povećavao s povećanjem udjela sitnih zrna do vrijednosti 9,1%, a svako daljnje povećanje udjela sitnih zrna rezultiralo je smanjenjem rezilijentnog modula. Barksdale i Itani [65] otkrili su da se rezilijentni modul smanjuje za približno 60% kako se udio sitnih zrna povećava s 0 na 10%. Također su uočili povećanje plastičnih deformacija s povećanjem udjela sitnih zrna. Istraživanje Di Tulio-a bilo je usredotočeno na utjecaj promjene udjela sitnih zrna ($<0,075$ mm) na čvrstoću MNS-a [39]. Istraživanje je provedeno na četiri mješavine drobljenog kamenog materijala koje su uzorkovane na različitim pozajmištima. Prema klasifikaciji [66], mješavina 1 klasificirana je kao dobro graduirani pijesak s glinom i šljunkom, mješavine 2 i 4 klasificirane su kao dobro graduiran šljunak, a mješavina 3 kao dobro graduirani šljunak s prahom i pijeskom. Dvije vrste sitnih zrna koja su dodavana u mješavine, bile su prašinasta glina ($<0,425$ mm) i glina ($<0,075$ mm). Utjecaj povećanja udjela sitnih zrna na vrijednost CBR-a varirao je za pojedine mješavine. Vrijednosti CBR-a su se smanjile za mješavine 1 i 2 kako se udio sitnih zrna povećao s 0 na 10%, ali vrijednost CBR-a je porasla s povećanjem udjela sitnih zrna za mješavine 3 i 4. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti pokazali su da je za uzorke bez sitnih zrna vodopropusnost mnogo veća od onih sa sitnim zrnima. Autor nije primijetio značajnu promjenu u vodopropusnosti za uzorke u kojima su prirodna sitna zrna zamijenjena sitnim zrnima gline ili u slučaju varijacije hidrauličkog gradijenta. Istraživanje Farooq-a i suradnika [67] imalo je za cilj procijeniti promjenu svojstava mješavina materijala u ovisnosti o tipu i udjelu sitnih zrna. Kao osnovni materijal korišten je drobljeni kamen, a dodavana su mu tri tipa sitnih zrna: niske, srednje i visoke plastičnosti. Sitna zrna dodavana su u promjenjivim masenim udjelima, 5, 10 i 15%. Nakon provedenih istraživanja, autori su zaključili da dodatna sitna zrna nemaju značajniji utjecaj na parametre koji utječu na zbijanje materijala prilikom ugradnje. U slučaju kada je udio dodanog materijala iznosio 15% suha prostorna masa se smanjila za otprilike 4% uz povećanje optimalne vlažnosti za 3%. Vrijednosti CBR-a mješavina smanjile se s povećanjem udjela sitnih zrna. Najviše vrijednosti CBR-a zabilježene su kod uzoraka bez dodatnih sitnih zrna. Povećanjem udjela sitnih zrna niske plastičnosti za 10% vrijednosti CBR-a mješavine bile su veće od 30, ali je vodopropusnost bila loša. Vrijednost CBR-a je bila niža od 30 u slučaju mješavina s udjelom dodanih sitnih zrna niske plastičnosti od 15% odnosno u slučaju mješavina s udjelom dodanih sitnih zrna srednje plastičnosti od 5%. Vodopropusnost je bila vrlo loša te su autori procijenili da ovakav materijal nije adekvatan za primjenu u cestogradnji. U pogledu krutosti dodatak 5% sitnih zrna visoke plastičnosti, odnosno 10% sitnih zrna srednje plastičnosti rezultirao je smanjenjem krutosti mješavina. Babić i suradnici [68] su u mješavine prirodnog šljunka te drobljenog kamenog materijala dodavali sitna zrna ($<0,02$ mm) kamene prašine odnosno gline u promjenjivim masenim udjelima 0, 3, 5, 7 i 10%.

Na svim uzorcima ispitivali su gustoću, veličinu bubrenja nakon smrzavanja, nosivost i vodopropusnost. Nosivost je određena CBR testom. Rezultati ispitivanja pokazali su da uzorci sa šljunkom imaju nižu nosivost u usporedbi sa uzorcima od drobljenog kamena. Povećanjem udjela sitnih zrna kamene prašine (do 10%) povećala se nosivost kod oba tipa mješavina. U slučaju sitnih zrna gline, nosivost se postepeno povećavala do udjela 5% nakon čega je počela naglo opadati. Autori su zaključili da bi se sa stajališta nosivosti mogao dozvoliti udio sitnih zrna u udjelu do 5%. Pri tom udjelu, ukoliko se radi o sitnim zrnima kamenog podrijetla zadovoljeni su svi uvjeti odvodnje, dok u slučaju zrna gline uvjet odvodnje nije zadovoljen. Također, napominju da nosivost ovisi prvenstveno o podrijetlu sitnih zrna, a zatim o vrsti agregata mješavine. Do sličnih zaključaka došli su Uthus i suradnici [69], prema njima svojstva MNS-a ne ovise samo o udjelu sitnih zrna već i o specifičnoj površini zrna, mineraloškom podrijetlu i granulometrijskom sastavu. Caicedo i suradnici [70] proveli su ispitivanje na mješavinama pijeska i šljunka. Cilj istraživanja bio je utvrditi udio sitnih zrna i vrijednosti indeksa plastičnosti na vrijednosti rezilijentnog modula. Iz rezultata istraživanja zaključili su da udio sitnih zrna ima veći učinak na vrijednost rezilijentnog modula nego indeks plastičnosti sitnih zrna. Mishra i Tutumluer [71] prilikom istraživanja koristili su tri različite vrste materijala: drobljeni vapnenac, drobljeni dolomit i nedrobljeni šljunak. Cilj laboratorijskih istraživanja bio je kvantificiranje pojedinačnih učinaka fizičkih svojstava materijala na svojstva sloja. Autori su koristili dva tipa sitnih zrna indeksa plastičnosti 0 te indeksa plastičnosti 8-10, udio sitnih zrna ($<0,075$ mm) varirao je u rasponu od 4 do 16% s korakom 4%. Za različite mješavine u laboratoriju su određeni rezilijentni moduli i vrijednosti trajnih deformacija. Dobiveni podaci su potom korišteni u nelinearnoj analizi konačnih elemenata za izračunavanje vertikalnog tlačnog naprezanja na vrhu sloja. Promjena udjela sitnih zrna na vrijednosti parametara rezilijentnog modula pokazala se zanemarivom s obzirom na rezultate analize varijance. Međutim, autori napominju da je povećanje udjela sitnih zrna imalo značajan utjecaj na parametre koji se koriste za karakterizaciju trajne deformacije. Uočili su drastičnu promjenu u ponašanju dolomita pri trajnoj deformaciji s povećanjem udjela sitnih zrna s 4% na 16%. Rezultati analize varijance naglašavaju da iako povećanje udjela sitnih zrna možda neće dovesti do značajnih razlika u modulu ponašanja ono ipak može dovesti do pojave trajnih deformacija koje mogu prouzrokovati slom. Slično kao i udio sitnih zrna, plastičnost sitnih zrna nije značajno utjecala na parametre modela za procjenu rezilijentnog modula. Međutim, pokazalo se da je učinak na parametre modela trajne deformacije prilično značajan. To znači da iako sitna zrna srednje ili visoke plastičnosti možda neće značajno utjecati na krutost sloja, one će dovesti do velikih posmičnih deformacija unutar sloja, što će rezultirati izraženom dubinom kolotraga.

Varijaciju Poissonovog koeficijenta sa promjenom udjela sitnih zrna istražio je Hicks [58]. On je zaključio da povećanje udjela sitnih zrna općenito rezultira smanjenjem Poissonovog koeficijenta.

2.2 Utjecaj vlage na svojstva MNS-a

Udio vlage u MNS-u neprestano varira između potpuno suhog i zasićenog stanja [72,73], a optimalna vlažnost postiže se u pravilu samo prilikom ugradnje sloja. Varijacije u udjelu vlage su izraženije u blizini rubova kolnika te na mjestima površinskih pukotina zbog izloženosti atmosferilijama [74]. Babić [75], Salour [7] te Chu i suradnici [76] navode da se udio vlage u MNS-u može povećati: procjeđivanjem vode s višeg okolnog tla, podizanjem razine podzemne vode, isparavanjem i kondenziranjem podzemne vode u području MNS-a, prodiranjem površinske vode kroz oštećenu površinu kolnika i bankinu te kapilarnim uzdizanjem vlage iz temeljnog tla (Slika 2-5), dok se udio vlage može smanjiti izvedbom sustava drenaže [73]. Mogućnost procjeđivanja vode ovisi najviše o hidrauličkom gradijentu i koeficijentu vodopropusnosti tla. U slučaju vodonepropusnog tla voda se zadržava na površini odakle otječe ili isparava. Ako je tlo propusno za vrijeme obilnih kiša te nakon otapanja snijega ili leda procjeđuje se znatna količina vode koja može uzrokovati podizanja razine podzemne vode. Podizanje razine podzemne vode ovisi o klimatskim okolnostima i granulometrijskom sastavu tla. S obzirom na razinu podzemne vode temeljno tlo može se podijeliti u dvije zone. Ispod razine podzemne vode nalazi se zona potpunog zasićenja u kojoj su sve pore tla potpuno ispunjene vodom. Zona od razine podzemne vode do površine terena naziva se vadozna zona. Vadozna zona se može dodatno podijeliti u tri zone: kapilarnu zonu, srednju zonu i zonu



Slika 2-5 Shematski prikaz migracije vode unutar kolničke konstrukcije

površinske vode [77]. U kapilarnoj zoni zbog djelovanja kapilarnih sila dolazi do uzdizanja vlage prema površini. Visina kapilarnog uzdizanja ovisi prvenstveno o granulometrijskom sastavu te može iznositi od svega nekoliko centimetara u krupnozrnatim materijalima pa sve do pedesetak metara u sitnozrnatim materijalima [7,72,75]. U srednjoj zoni zadržava se ostatak procijeđene vode, također zahvaljujući kapilarnim silama, a u zoni površinskih voda pore su uglavnom ispunjene zrakom. Prema Sangsefidi-u i suradnicima [78] općenito se smatra da se kolnička konstrukcija nalazi unutar vadozne zone tijekom cijelog uporabnog vijeka. Do isparavanja podzemne vode i kondenzacije ispod kolničke konstrukcije dolazi kada je kolnička konstrukcija hladnija od temeljnog tla [79,80]. Prodiranje vode kroz oštećene slojeve kolničke konstrukcije može prouzročiti lokalnu koncentraciju vode u MNS-u na mjestima oštećenja. Prodiranje vode kroz bankine ima slične posljedice, ali u ovom slučaju ugroženi su rubovi kolničke konstrukcije.

Pojedini autori [7,81–84] navode visoki udio vlage u MNS-u kao glavni razlog ubrzanog propadanja kolnika i smanjenja njegova uporabnog vijeka. Christopher i McGuffey [85] napominju da se uporabni vijek ceste može smanjiti za više od 50% ukoliko se u MNS-u nalazi prekomjerni udio vlage. Christopher i suradnici [86] izvijestili su o 44% povećanju inicijalnih troškova izgradnje savitljive kolničke konstrukcije po jednoj milji prometnog traka u slučaju potrebe za saniranjem oštećenja nastalih kao posljedica loše odvodnje. Saad [83] je procijenio da bi se samo u SAD-u na godišnjoj razini mogle uštedjeti milijarde dolara na održavanju i obnovi kolnika kada bi se sagledali svi negativni utjecaji vode na kolničku konstrukciju i uzeli u obzir u fazi projektiranja. Cedergren [87] ističe važnost drenaže. Prema njegovom mišljenju ako je MNS potpuno zasićen vodom samo 10% uporabnog vijeka ukupni uporabni vijek će se skratiti do 50% u usporedbi s kolnikom koji ima dobru drenažu. Vuong i suradnici [83] su zaključili da povećanje udjela vlage za 5% u usporedbi sa optimalnim udjelom vlage može skratiti uporabni vijek za čak 400%.

Povećanjem udjela vlage u MNS-u smanjuje se njegov rezilijentni modul i otpornost na pojavu deformaciju [88,89]. Andrei je otkrio da je udio vlage imao bitan utjecaj na modul elastičnosti MNS-a, budući da su njegove vrijednosti varirale između 14 i 1380 MPa samo zbog promjene udjela vlage [90]. Rezultati istraživanja Haynes-a i Yoder-a [64] ukazuju na 50 postotno smanjenje rezilijentnog modula MNS-a pri povećanju stupnja zasićenosti sa 70 na 100%. Molina Gomez i suradnici [91] uočili su smanjenje rezilijentnog modula od 3 do 8% kod potpuno zasićenih uzoraka u odnosu na uzorke s optimalnim udjelom vlage. Guan i suradnici [92] pokazali su da je sezonska varijacija udjela vlage od 1,9% (povećanje s 12,6 na 14,5%) uzrokovala smanjenje rezilijentnog modula MNS-a za 27%. Temeljem provedenih izračuna

zaključili su da je potrebno izvesti dodatni sloja asfalta debljine 55 mm kako bi se nadomjestilo smanjenje vrijednosti rezilijentnog modula MNS-a. Chen i suradnici [81] otkrili su da se sa svakim povećanje udjela vlage za 1% vrijednosti rezilijentnog modul MNS-a smanjuje za približno 30%. Kolisoja [93] je proveo troosno ispitivanje cikličkim opterećenjem na pet mješavina materijala različitog granulometrijskog sastava. Najizraženiji utjecaj povećanja udjela vlage zabilježio je kod mješavine s najvećim udjelom sitnih zrna. Kod mješavina s dobrim granulometrijskim sastavom nakon što udio vlage pređe optimalnu vrijednost rezilijentni modul počinje opadati. Haider i suradnici [94] ističu da je udio vlage u MNS-u u korelaciji sa stanjem površine kolnika (prisutnosti pukotina i oštećenja), udjelom sitnih zrna ($\leq 0,075$ mm), razinom podzemne vode, količinom oborina te indeksom smrzavanja. Na temelju razvijenog modela uočili su smanjenje vrijednosti rezilijentnog modula za 41% s povećanjem udjela vlage s 1 na 15%, odnosno smanjenje vrijednosti modula elastičnosti za 175% pri povećanju udjela vlage s 1 na 23%. Dugoročna predviđanja ponašanja kolničke konstrukcije putem modela pokazala su da će zbog smanjenja rezilijentnog modula doći do pojave površinskih pukotina. Rezultati istraživanja Uthus-a [95] pokazuju da su dobro građurani materijali s visokim udjelom sitnih zrna izrazito osjetljiviji na promjene u udjelu vlage. Takvi materijali bez prisutnosti vlage osiguravaju zadovoljavajuću nosivost. Međutim, kada se takav materijal izloži utjecaju vlage značajno mu se smanjuje rezilijentni modul, a samim time i otpornost na pojavu trajnih deformacija. Raad i suradnici [96] zaključili su da se vlaga lakše zadržava u porama dobro građuranog materijala nego u slabo građuranim materijalima otvorenog sastava. Dinamičko opterećenje zasićenih nevezanih slojeva izaziva porast prornog tlaka, čime se smanjuju efektivna naprezanja i odgovarajući otpor trenja između zrna sloja. Kolisoja [93] je uočio da se u mješavinama dobro građuranog materijala s povećanjem udjela vlage povećava vrijednost rezilijentnog modula sve dok mješavina ne dosegne optimalni udio vlage. Nakon toga, uz daljnje povećanje udjela vlage, dolazi do opadanja vrijednosti rezilijentnog modula. Uthus [95] ističe da se ne očekuje značajni utjecaj vlage na deformacijska svojstva jednolično građuranog materijala. Naime, zbog relativno velikih pora u njima voda ne može biti zarobljena. Međutim, s vremenom zbog djelovanja opterećenja ukoliko takav materijal nema adekvatnu čvrstoću može doći do predrobljavanja i lomljenja zrna što rezultira povećanjem udjela sitnih zrna i smanjenjem veličina pora te posljedično do povećanja osjetljivosti takvog materijala na pojavu vlagu.

Prema Korkiala-Tanttu i suradnicima [97] povećanje razine podzemne vode doprinosi povećanju trajnih deformacija u MNS-u. Gidel i suradnici [98] prilikom ispitivanja tri različite mješavine MNS-a u troosnom uređaju uočili su da za svaki tip mješavine postoji udio vlage

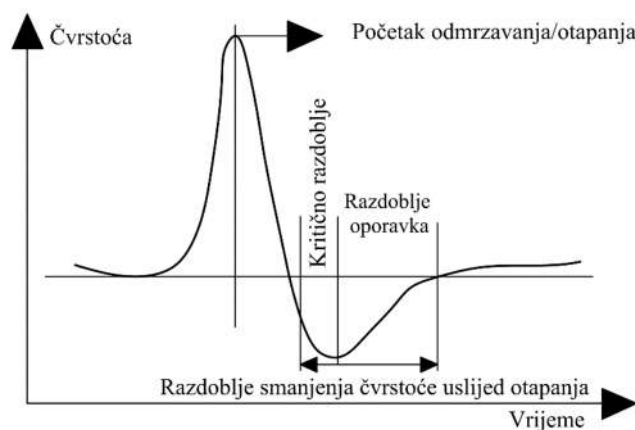
koji, ako se premaši, uzrokuje vrlo brzi rast trajnih deformacija. Haynes-a i Yoder-a [64] izvijestili su o povećanju vrijednost trajnih naprezanje u rasponu od 5 do 10 puta kada se stupanj zasićenja poveća sa 85% na približno 100%. Uthus i suradnici [69] su kod mješavine MNS-a s udjelom sitnih zrna ($<0,02$ mm) od 6,1% primijetili drastično povećanje trajne deformacije nakon što se udio vlage povećao s 4,0% na 5,1%. Charlie i suradnici [99] izradili su modele kolnika te su istraživali odziv kolnika pri različitim udjelima vlage. Zaključili su da se pri povećanje sadržaja vlage s 2,3% na 4,8% vrijednost naprezanja poveća za približno 60%.

Salour, Erlingsson te njihovi suradnici [6,7,77,100–102] brojnim laboratorijskim i terenskim istraživanja odredili su utjecaj varijacije udjela vlage na svojstva MNS-a. Uočili su do šest puta veće vrijednosti defleksije kolnika u proljeće u usporedbi s onima izmjerenim u zimskom ili ljetnom periodom. Također, primijetili su 50 postotno smanjenje krutosti sloja MNS-a i progresivno nastajanje kolotraga na dionicama s visokom razinom podzemne vode. Korkiala-Tanttu i Dawson [103] istraživali su povezanost razine podzemne vode s pojavom kolotraga. Prilikom ispitivanja su koristili simulator kretanja teških teretnih vozila (HVS-Nordic) te senzore kojima su pratili deformacije i promjene vlažnosti. Rezultati su pokazali da se dubina kolotraga povećava između 220 i 250% kada se razina podzemne voda podigne za 500 mm, s dubine 1,0 m ispod površine kolnika. Iz rezultata istraživanja Rokitowskog i suradnika [104] vidljivo je da dugotrajna eksploatacija kolnika u uvjetima visoke razine podzemne vode (30-60 cm ispod površine kolnika) rezultira smanjenjem rezilijentnog modula za 35 do 70%. Kao rezultat toga, u roku od godinu dana, na promatranoj lokaciji dubina kolotraga povećala se između 1,0 i 3,0 mm te je došlo do pojave mrežastih pukotina. Dodatne analize koje su proveli pokazale su da čak i male promjene u udjelu vlage mogu imati značajan učinak na nastanak trajnih deformacija.

Pojava visokog pornog tlaka u MNS-u u kombinaciji s osovinskim opterećenjem i povećanim udjelom vlage u MNS-u može uzrokovati pojavu koja se naziva pumpanje [79]. Pumpanje je karakteristično za krute kolničke konstrukcije i do njega uglavnom dolazi na spojevima betonskih ploča, ali se može pojaviti i kod savitljivih kolničkih konstrukcija u području površinskih pukotina. Očituje se naslagama sitnog materijala na površini kolnika u blizini spojeva ili pukotina. Pumpanjem se voda zajedno sa sitnim zrnima kreće kroz MNS, najprije u smjeru kretanja vozila, a zatim u vertikalnom smjeru [79,105]. Pumpanje uzrokuje pojavu šupljine unutar MNS-a, čime se smanjuje gustoća materijala, povećava poroznost i međuprostorna naprezanja [105,106]. Hansen [107] je zaključio da je pumpanje izraženije u trenutku prolaska teških teretnih vozila nego kod prolaska osobnih vozila. Odredio je da najveća brzina protoka vode kod pumpanja iznosi približno 0,9 m/s. Crovetti i Dempsey [108] predložili

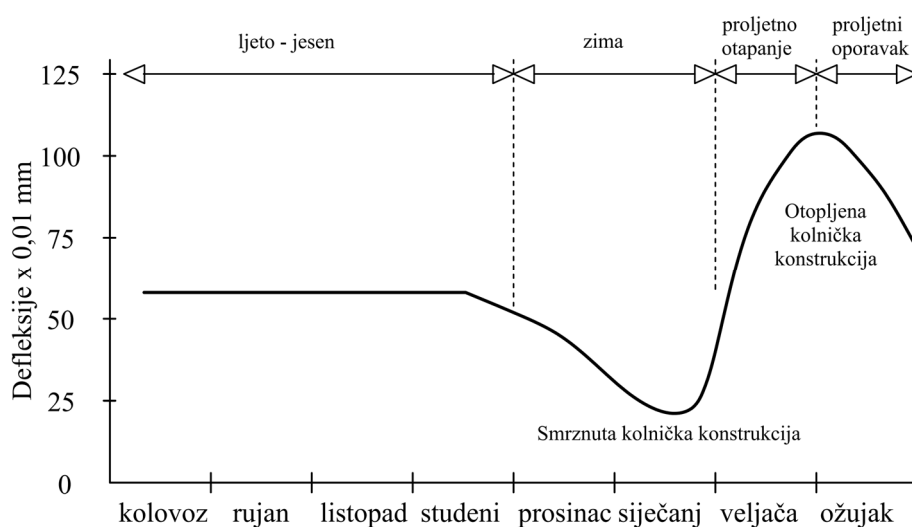
su korištenje MNS-a otvorenog granulometrijskog sastava s ciljem smanjenja pornog pritiska, a time i mogućnosti nastanka pumpanja. Izvedbom adekvatnog drenažnog sustava značajno se smanjuje udio vlage u MNS-u, vrijednost pornog pritiska, a samim time se povećava nosivost cjelokupne kolničke konstrukcije [76].

U kontinentalnim predjelima s izraženim dubinama smrzavanja u zimskom razdoblju može doći do nastanka ledenih leća u posteljici odnosno MNS-u. Osim niske temperature samog sloja, preduvjeti za razvoj ledenih leća su mogućnost pritjecanja vode u zonu smrzavanja kao i osjetljivost materijala na smrzavanje tj. da ima povećan udio sitnih zrna [75,109]. Mehanizam nastanka ledenih leća detaljno su opisali Babić [75] te Sršen i suradnici [109]. Zrna materijala obavijena su vodenim filmom koji migrira prema površini zbog temperaturnog gradijenta tijekom smrzavanja. Istodobno zbog djelovanja snažnih kapilarnih sila povlači se, tj. dotiče voda iz posteljice. Uslijed kontinuiranog dotoka ledena leća povećava volumen te se potiskuje prema površini uzrokujući izdizanje kolničke konstrukcije. Babić [75] napominje da je povoljnije ako smrzavanje nastupi naglo jer se u tom slučaju smrzne samo voda u sloju zahvaćenom smrzavanjem. Postepeno smrzavanje omogućuje neprestani kapilarni dotok vode i povećanje volumena leća. Ukoliko je izdizanje kolnika homogeno ne nastaju značajnija oštećenja, a u slučaju nehomogenog izdizanja kolnika moguća su oštećenja kolnika. Znatna oštećenja kolnika, najčešće mrežaste pukotine, nastaju u proljeće kada dolazi do otapanja leda, a samim time i povećanja udjela vlage koji značajno smanjuje nosivost (Slika 2.6) [110,111]. Ishikawa i suradnici [112,113] razvili su opremu za ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti pri simuliranju procesa smrzavanja i odmrzavanja uzoraka te troosni uređaj srednje veličine kako bi istražili učinke procesa smrzavanja i odmrzavanja i promjene udjela vlage na nosivost i deformacijske karakteristike MNS-a. Procijenjeni uporabni vijek asfaltnih kolnika može se tijekom eksploatacije skratiti za 80% zbog degradacija MNS-a povezanih s ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te promjenom udjela vlage [111]. U skladu s tim Ishikawa [111]



Slika 2-6 Promjena čvrstoće tijekom razdoblja smrzavanja i odmrzavanja [109]

predlaže da se pri razvijanju metoda za projektiranje kolničkih konstrukcija u hladnim područjima razmisli o uzimanju u obzir promjene krutosti MNS-a i temeljnog tla uzrokovane klimatskim uvjetima. Salour i Erlingsson [114] istražili su strukturno ponašanje kolničke konstrukcije županijske ceste 126 u južnoj Švedskoj. Jednogodišnje istraživanje provedeno je primjenom deflektometra s padajućim teretom (eng. falling weight deflectometer- FWD). Zabilježili su da je nosivost kolnika najniža u proljeće za vrijeme otapanja leda u MNS-u i temeljnom tlu (Slika 2-7). Nakon provedbe izračuna unatrag, određivanja rezilijentnih modula i dodatne analize autori su uočili smanjenje vrijednosti rezilijentnog modula MNS-a za 48% tijekom proljetnog otapanja leda u usporedbi s vrijednostima zabilježenim tijekom ljetnog perioda.



Slika 2-7 Shematski prikaz varijacije defleksije kolničke konstrukcije tijekom godine [109]

3 GEORADAR

Georadar (eng. ground-penetrating radar- GPR) je sustav za nerazorno ispitivanja (eng. nondestructive testing- NDT) koji se bazira na principima radarske tehnologije [11,115]. GPR odašilje elektromagnetske (EM) valove. Odašlani EM valovi djelomično se reflektiraju prema površini na granici dvaju medija ili objekata različitih EM karakteristika. GPR registrira reflektirane EM valove te kreira prikaze podzemnih struktura, instalacija i predmeta. Neke od glavnih prednosti GPR-a su: točnost i pouzdanost, kontinuirano prikupljanje velikog broja podataka, brzina prikupljanja podataka te ekonomičnost. Performanse su mu ograničene kada se koristi u područjima s materijalima visoke vodljivosti kao što su gline ili tla bogata solima. Nadalje, za učinkovito osmišljavanje i provođenje ispitivanja potrebna je obučenost i stručnost operatera. Tumačenje rezultata (B-sken) općenito je neintuitivno pa iziskuje posebne kompetencije kako bi se omogućilo pretvaranje rezultata GPR ispitivanja u jasne grafičke prikaze i podatke pogodne za inženjersko odlučivanje [15].

3.1 Povijesni razvoj

Rad GPR-a kao i drugih vrsta radara zasniva se na odašiljanju i prijemu reflektiranih EM valova. Postojanje EM valova prvi je predvidio James Clerk Maxwell. On je 1861. godine postavio teoriju elektromagnetizma, kojom je povezao električno i magnetsko polje u prostoru i vremenu. Četiri Maxwell-ove jednačbe predstavljaju osnove elektromagnetizma [116]:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (3.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (3.4)$$

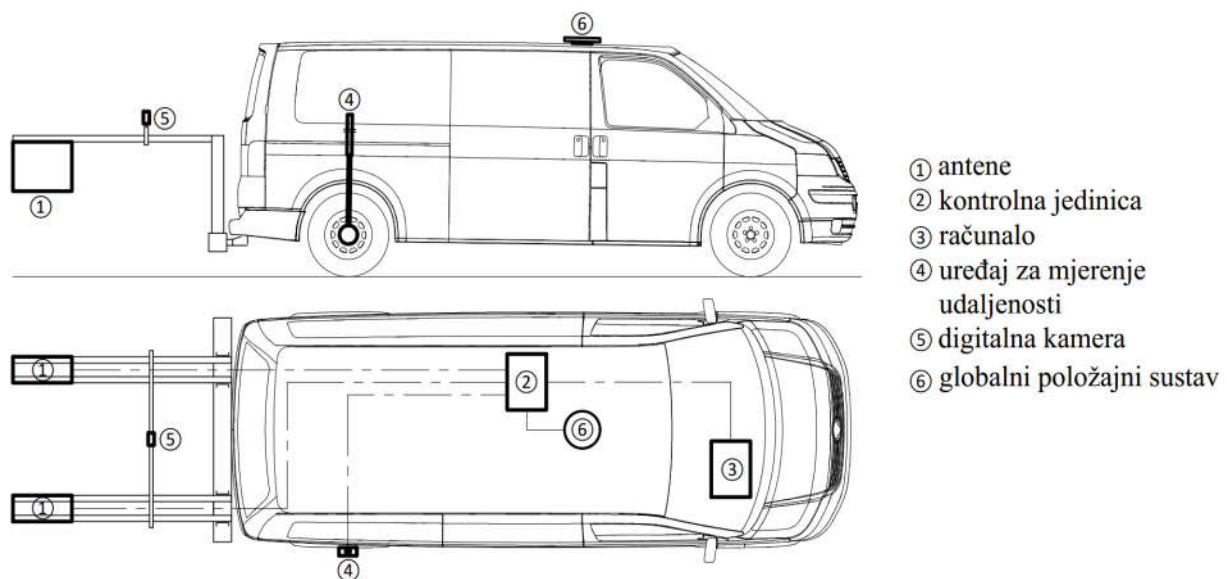
gdje su: $\mathbf{D}$ električna indukcija (C/m^2); ρ gustoća električnog naboja (C/m^3); $\mathbf{B}$ magnetska indukcija (T); $\mathbf{E}$ jakost električnog polja (N/C); t vrijeme (s); $\mathbf{H}$ jakost magnetskog polja (A/m); $\mathbf{J}$ gustoća električne struje (A/m^2). Prema navedenim jednačbama promjene u električnom polju uzrokuju promjene u magnetskome polju i obrnuto te je dovoljno u nekom trenutku poznavati električno i magnetsko polje u prostoru kako bi se jednoznačno mogle odrediti vremenske promjene polja u budućnosti. Prva jednačba (3.1) pokazuje da je električni naboj izvor električnog polja. Druga jednačba (3.2) pokazuje nepostojanje magnetskog naboja. Odnosno, ne postoji izvor magnetskog polja iz kojega bi proizlazio magnetski tok različit od nule. Treća jednačba (3.3) govori o tome kako promjene magnetskog polja u vremenu stvaraju električno polje. Kada magnetsko polje raste ili opada u vremenu, rezultat je rotacija električnog

polja oko magnetskog polja. Četvrta jednadžba (3.4) pokazuje da kada električna struja teče kroz vodič i mijenja svoju jačinu ili smjer, to uzrokuje promjene u električnom polju i inducira magnetsko polje oko vodiča. Heinrich Rudolf Hertz je nizom eksperimenata dokazao 1888. godine postojanje EM valova te je potvrdio Maxwell-ovu teoriju elektromagnetizma [117]. Nadalje, Hertz je razvio tehniku za mjerenje valne duljine i brzine EM valova, opisao je njihovu refleksiju i lom, a dokazao je da se radiovalovi u zraku šire brzinom svjetlosti. Christian Hülsmeier je patentirao 1904. godine uređaj za detekciju udaljenih metalnih objekata pod nazivom "Telemobiloskop" [118]. Ovaj uređaj smatra se prvim radarom, a svrha mu je bila sprječavanja sudara brodova ili vlakova. Šest godina kasnije Gotthelf Leimbach i Heinrich Löwy prijavili su patent za korištenje radarske tehnologije za lociranje zakopanih objekata [119,120]. U ovom patentu, širenje mikrovalova između parova vertikalno ukopanih dipolnih antena korišteno je za otkrivanje zakopanih objekata čije je električna provodnost bila veća od okolnog tla. 1917. godine objavljen je članak Nikole Tesle u kojem je naveden opis radarskog sustava kojim se može odrediti relativni položaj i kurs pokretnog objekta, kao što je brod na moru, udaljenost koju isti prijeđe i njegovu brzinu [118]. Tesla je u članku opisao najvažnije dijelove uređaja te precizirao kako se mora raditi s vrlo kratkim valnim duljinama i u impulsnom režimu, što je kasnije potvrđeno pri uporabi radara [121]. Prva uporaba EM impulsa širokog spektra za određivanje strukture podzemnih objekata pripisuje se dr. Hülsenbecku. Hülsenbeck je tom prilikom 1926. ustvrdio da svaka promjena relativne dielektrične permitivnosti uzrokuje refleksiju EM valova [122]. U Austriji je 1930. godine GPR prvi put korišten za određivanje debljine slojeva leda [123,124]. Tijekom narednih desetljeća značajno je napredovala radarska tehnologija i tehnike, a samim time i mogućnosti upotrebe GPR-a. Međutim, potencijal GPR je ostao neiskorišten uglavnom zbog skepse znanstvene zajednice. Za vrijeme i nakon Drugog svjetskog rata radari su se pokazali korisnim u otkrivanju neprijateljskih zrakoplova i brodova te su promijenili vojnu doktrinu. Razdoblje stagnacije primjene GPR-a potrajalo je do druge polovici Vijetnamskog rata (1955.-1975.) kada ga američka vojska počinje koristiti za lociranje neprijateljskih podzemnih tunela i skrovišta [125]. U slične svrhe GPR je korišten početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća u demilitariziranoj zoni između Sjeverne i Južne Koreje [120]. Američka svemirska agencija National Aeronautics and Space Administration- NASA je 1972. godine razvila prototip GPR kojim su prikupljani podaci o Mjesecu s orbitalne platforme u sklopu misije Apollo 17 [126,127]. Rezultati istraživanja pokazali su da je GPR idealna geofizička metoda za istraživanje Mjeseca. Nakon uspjeha GPR-a u lunarnom programu počinje rasti interes za njim u akademskoj zajednici i vojsci. U razdoblju od 1974. do 1976. GPR je korišten za arheološka

istraživanja na lokalitetu Chaco Canyonu u Novom Meksiku [128]. Ovo se smatra prvom, djelomično uspješnim primjenom GPR-a u arheologiji. Međutim, tih godina GPR tehnologija još uvijek je bila vrlo skupa i nepouzdana pa je primjenjivan uglavnom od strane institucija sa velikim proračunom poput vojske. Tek je 1980-ih godina, kada je GPR postao relativno pristupačan, uveden i usvojen za široku upotrebu. U građevinarstvu se prvenstveno koristio za detekciju i lociranje podzemne komunalne infrastrukture [129–131] te određivanje debljine slojeva kolničke konstrukcije [132,133]. U razdoblju ranih 1990-ih godina počinju se proizvoditi komercijalne verzije GPR-a. Usporedno s tim organiziraju se prve znanstveno-stručne konferencije na kojima se prezentiraju mogućnosti GPR-a [16]. Otad se bilježi kontinuiran rast primjene GPR-a ne samo u građevinarstvu [11,15,115] nego i u: arheologiji [134–137], geologiji [138], hidrologiji [139], poljoprivredi [140], misijama traganja i spašavanja [141], forenzici [142], detekciji minskoeksplozivnih naprava [143] i slično.

3.2 Principi rada GPR-a

Osnovne komponente GPR-a su: kontrolna jedinica, odašiljač, prijemnik, antena za odašiljanje i primanje EM valova te uređaj za pohranu. Suvremeni GPR koji se koristi na prometnicama može dodatno biti opremljen s: globalnim položajnim sustavom (eng. global positioning system- GPS), instrumentom za mjerenje udaljenosti (eng. distance measurement instrument- DMI), videokamerom i uređajem koji omogućuje vizualni prikaz signala u stvarnom vremenu (Slika 3-1). Primarna uloga kontrolne jedinice je povezivanje svih komponenti GPR-a. Kontrolna jedinica generira električni impuls koji se u odašiljaču pretvara u EM val te se pomoću antene odašilje prema mediju ili konstrukciji. Reflektirane EM valove prima antena. Pomoću prijemnika EM valovi se pretvaraju u električni signal kojeg obrađuje kontrolna



Slika 3-1 Shematski prikaz mjernog vozila opremljenog GPR-om

jedinica. Kontrolna jedinica može imati dodatne funkcije poput obrade podataka, pohranjivanja i grafičkog prikaza.

S obzirom na poziciju odašiljača i prijemnika razlikujemo monostatički, bistatički i multistatički GPR. Kod monostatičkog sustava odašiljač i prijemnik nalaze se unutar istog kućišta, a međusobno su odvojeni duplekserom. Duplekser je elektronički uređaj koji se koristi u radarskim sustavima kako bi omogućio simultanu dvosmjernu komunikaciju, tj. slanje i primanje signala koristeći istu antenu i frekvenciju, ali u različitim vremenskim intervalima. Ako su odašiljač i prijamnik smješteni u zasebnim kućištima te imaju zasebne antene, riječ je o bistatičkom GPR-u. Multistatički sustav, koji se još naziva i višekanalni GPR, sastavljen je od više različitih monostatičkih ili bistatičkih sustava.

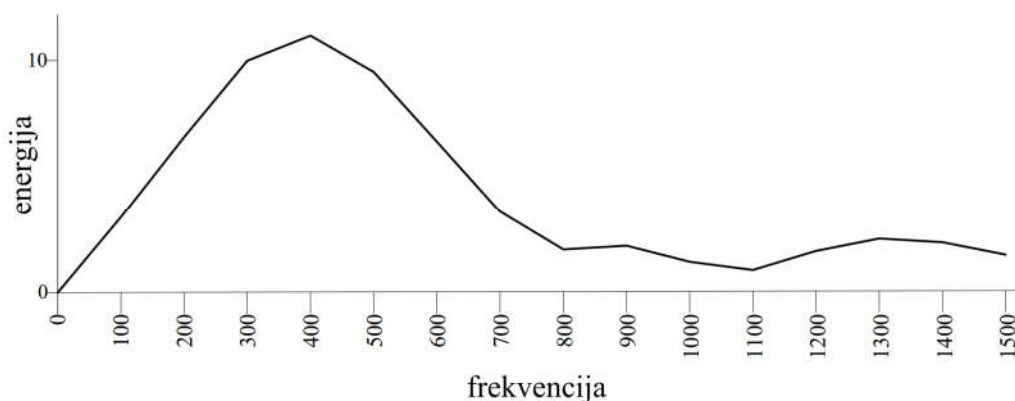
Antene se prilikom prikupljanja podataka mogu nalaziti na različitim pozicijama u odnosu na medij/konstrukciju. Antene koje nisu u direktnom kontaktu s površinom medija/konstrukcije, već su udaljene od površine medija 40 do 60 cm, nazivaju se air-coupled antenama, dok se one koje dodiruju površinu medija nazivaju ground-coupled antenama.

3.2.1 Frekvencija i valna duljina

U kontekstu GPR-a, frekvencija i valna duljina određuju najveću dubinu širenja EM vala unutar nekog medija, najmanje dimenzije predmeta kojeg je moguće detektirati, najmanju debljinu sloja koju je moguće odrediti, najmanji razmak između susjednih objekata koji omogućuje njihovo zasebno lociranje i točnost s kojom se određuje debljina sloja odnosno dubina objekta [17]. Valna duljina određena je jednadžbom:

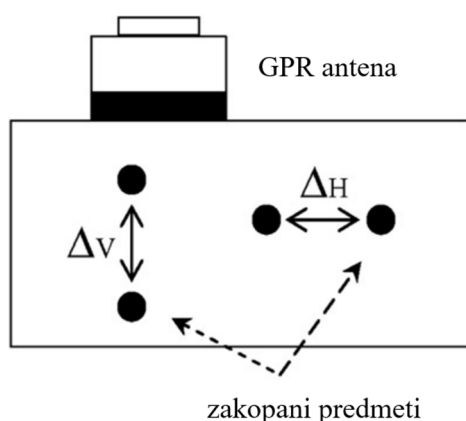
$$\tau = \frac{v}{f} \quad (3.5)$$

gdje su: τ valna duljina (m); v brzina širenja vala (m/s); f frekvencija vala (1/s). GPR emitira niz valova različitih frekvencija. Danas se uglavnom koriste GPR antene nazivne frekvencije od 10 i 6000 MHz [144]. Nazivna frekvencije odnosi se na „centralnu“ frekvenciju, tj. frekvenciju na kojoj antena odašilje svoju najveću energiju. Prilikom širenja EM valova



Slika 3-2 Raspon frekvencije antene GPR-a nazivne frekvencije 400 MHz [17]

iz jednog medija u drugi frekvencija ostaje nepromjenjiva, a mijenjaju se amplituda i valna duljina. Što je valna duljina kraća, to je veća točnost GPR-om prikupljenih podataka. Prema Carrick Utsi točnost određivanja debljine sloja ili dubine objekta/predmeta iznosi približno jednu četvrtinu valne duljine [17]. U optimalnim uvjetima tj. u materijalima niske električne provodnosti, najveća dubina širenja EM valova iznosi približno 20 valnih duljina, ali je u realnim uvjetima ta dubina bitno manja [11]. Carrick Utsi navodi da je najmanja debljina sloja koju je moguće odrediti odnosno najmanje dimenzije predmeta koje je moguće detektirati GPR-om jednake jednoj desetini valne duljine [17]. S obzirom da je valna duljina obrnuto proporcionalna frekvenciji za postizanje veće dubine širenja EM valova, potrebno je koristiti GPR s nižom frekvencijom. S druge strane, viša frekvencija omogućuje veću rezoluciju. Rezolucija se općenito procjenjuje na jednu četvrtinu valne duljine u mediju [145]. Pri odabiru frekvencije GPR-a treba uspostaviti kompromis između tražene dubine širenja EM valova i rezolucije. Kako u svom radu navode Rial i suradnici [146] rezolucija se može shvatiti kao mogućnost GPR da detektira zasebno predmete koji se nalaze u neposrednoj blizini ispod površine. Razlikujemo vertikalnu (Δv) i horizontalnu (Δh) rezoluciju (Slika 3-3).



Slika 3-3 Shematski prikaz horizontalne i vertikalne rezolucije GPR-a [146]

3.2.2 Parametri koji utječu na širenje EM valova

Najznačajniji parametri koji imaju utjecaj na širenje i prigušenije EM valova u nekom mediju su relativna dielektrična permitivnost, magnetska permeabilnost i električna provodnost [115], [4].

Relativna dielektrična permitivnost je fizikalna veličina koja opisuje električnu propusnost tvari u odnosu na dielektričnu permitivnost vakuuma [147]. Pojednostavljeno rečeno, relativna dielektrična permitivnost opisuje sposobnost materijala da pohranjuje i otpušta EM energiju u obliku električnog naboja tj. sposobnost ograničavanja protoka slobodnih naboja ili stupnja polarizacije koju pokazuje materijal pod utjecajem primijenjenog električnog polja [115]. Relativna dielektrična permitivnost određuje se jednadžbom:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.6)$$

gdje su: ϵ_r relativna dielektrična permitivnost; ϵ dielektrična permitivnost medija; ϵ_0 dielektrična permitivnost vakuuma. Dielektrična permitivnost vakuuma određena je jednadžbom:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c_0^2} \quad (3.7)$$

gdje su: μ_0 magnetska permeabilnost vakuuma, a iznosi $1,2566 \cdot 10^{-7}$ Tm/A; c_0 brzina svjetlosti u vakuumu, a iznosi $2,998 \cdot 10^8$ m/s. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti kreće se u rasponu od 1 (za zrak) do 81 (za vodu) [11]. Metali imaju beskonačnu vrijednost relativne dielektrične permitivnosti budući da EM valovi ne prolaze kroz njih, već se reflektiraju od njih. EM valovi najbrže se šire zrakom, a najsporije vodom. Na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti utječu različiti čimbenici poput sastava materijala, temperature, frekvencija uređaja s kojim se određuje vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. S aspekta sastava materijala, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti izravno je povezana s njegovim kemijskim sastavom i fizičkom strukturom. Na primjer, materijali s visokim sadržajem vlage, kao što je vlažni pijesak, imaju veću vrijednost relativne dielektrične permitivnosti u usporedbi sa suhim pijeskom. To je zato što voda, koja ispunja pore između sitnih zrna materijala, ima veću relativnu dielektričnu permitivnost u usporedbi s drugim materijalima. U tablici 3-1 navedene su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za materijale koji se koriste pri izgradnji prometnica.

Tablica 3-1 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za pojedine materijale [11]

Materijal	Relativna dielektrična permitivnost
zrak	1
asfalt suh	2-4
asfalt vlažan	6-12
beton suh	4-10
beton vlažan	2-10
glina suha	2-6
glina vlažna	5-40
granit suh	5
granit vlažan	7
vapnenac suh	7
vapnenac vlažan	8
pješčenjak suh	2-5
pješčenjak vlažan	5-10
pijesak suh	2-6
pijesak vlažan	10-30
voda	81

Magnetska permeabilnost je fizikalna veličina koja opisuje magnetsku propusnost tvari.

Određena je jednačbom:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o \quad (3.8)$$

gdje su: μ magnetska permeabilnost; μ_r relativna magnetska permeabilnost. Magnetska permeabilnost pokazuje intenzitet magnetizacije materijala kada je izložen magnetnom polju. Povećanjem vrijednosti magnetske permeabilnosti prigušuju se EM valovi čime se smanjuje učinkovitost GPR-a. Materijali s visokom magnetskom permeabilnošću mogu uzrokovati apsorpciju komponente magnetskog polja GPR signala, što može rezultirati smanjenom snagom signala i smanjenom rezolucijom dobivene radarske slike. Konkretno, očekuje se da veća magnetska permeabilnost uzrokuje značajno slabljenje radarskog signala, što može smanjiti omjer signala i šuma te, posljedično, smanjiti sposobnost nedvosmislenog razlučivanja prikaza podzemnih struktura [148]. Većina materijala koji se koriste kod izgradnje prometnica, kao i tlo na kojem se prometnice grade, ne sadrže značajnu količinu minerala magnetita pa se može pretpostaviti da je učinak magnetske permeabilnosti na signal GPR-a zanemariv [4].

Električna provodnost (σ) je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo tvari da provodi električnu struju, a recipročna je električnoj otpornosti [149]. Električna provodnost tla ili materijala utječe na širenje EM valova i na točnost prikupljenih GPR podataka. Tla s velikim udjelom gline ili mineralnih soli imaju visoku električnu provodnost, a ona uzrokuje apsorpciju i prigušenje EM valova, što dovodi do smanjene dubine širenja EM valova i smanjene rezolucije podataka prilikom interpretacije [145]. Prema Lalagüe [4], približna vrijednost prigušenje EM valova može se odrediti jednačbom:

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_r}} \quad (3.9)$$

gdje su: α prigušenje EM valova; σ električna provodnost. Povećanjem električne provodnosti povećava se prigušenje EM valova (S/m). U slanom tlu i tlu s visokim sadržajem natrija, dubina širenja EM valova ograničena je na površinskih 25 cm [150]. U vlažnim glinama dubine širenja EM valova obično su manje od 1 m [150]. Nasuprot tome, materijali niske električne provodnosti poput suhog pijeska ili šljunka obično omogućuju dublje širenje i jasniju sliku podzemnih slojeva. U tablici 3-2 navedene su vrijednosti električne provodnosti za materijale koji se koriste pri izgradnji prometnica.

Na temelju prethodno navedenog može se zaključiti da frekvencija EM valova određuje dubinu širenja EM vala u mediju i rezoluciju podataka prikupljenih GPR-om. Povećanjem frekvencije EM valova smanjuje se dubina njihova širenja, ali se povećava rezolucija podataka prikupljenih GPR-om. Relativna dielektrična permitivnost određuje koliko se brzo EM valovi šire kroz neki

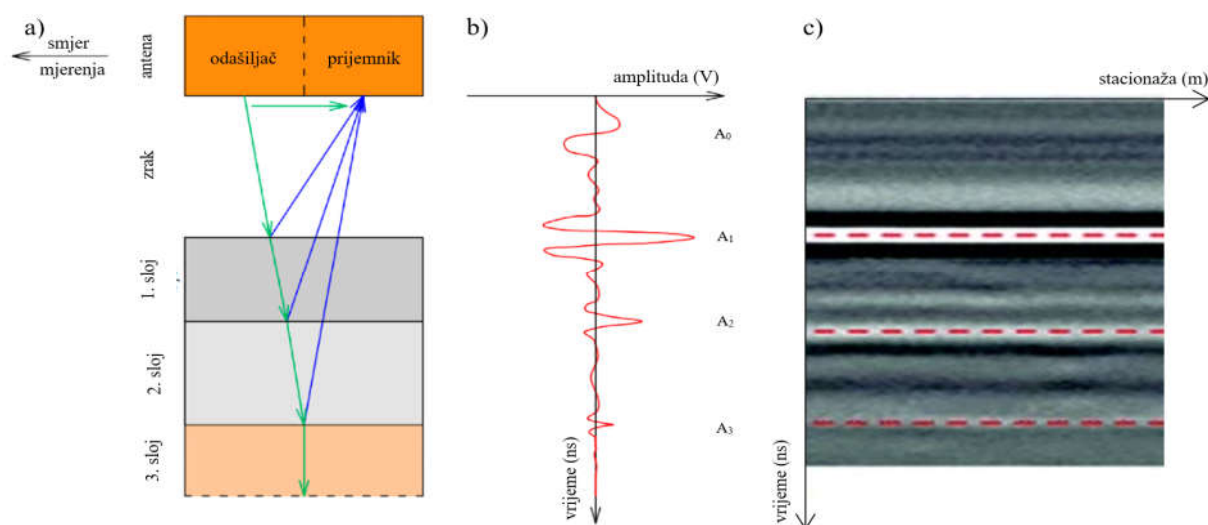
medij. Povećanjem udjela vlage u mediju povećava se vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, a smanjuje se brzina širenja EM vala. Električna provodnost određuje dubinu širenja EM valova. Povećanjem vrijednosti električne provodnosti povećava se prigušenje EM valova, dubina širenja EM vala se smanjuje. Magnetska permeabilnost ima zanemariv učinak na širenje EM valova u materijalima koje se koriste za izgradnju prometnica.

Tablica 3-2 Vrijednosti električne provodnosti za pojedine materijale [11]

Materijal	Električna provodnost (S/m)
asfalt suh	10^{-2} - 10^{-1}
asfalt vlažan	10^{-3} - 10^{-1}
beton suh	10^{-3} - 10^{-2}
beton vlažan	10^{-2} - 10^{-1}
glina suha	10^{-1} -1
glina vlažna	10^{-1} -1
granit suh	10^{-8} - 10^{-6}
granit vlažan	10^{-3} - 10^{-2}
vapnenac suh	10^{-8} - 10^{-6}
vapnenac vlažan	10^{-2} - 10^{-1}
pješčenjak suh	10^{-8} - 10^{-6}
pješčenjak vlažan	10^{-4} - 10^{-2}
pijesak suh	10^{-7} - 10^{-3}
pijesak vlažan	10^{-3} - 10^{-2}

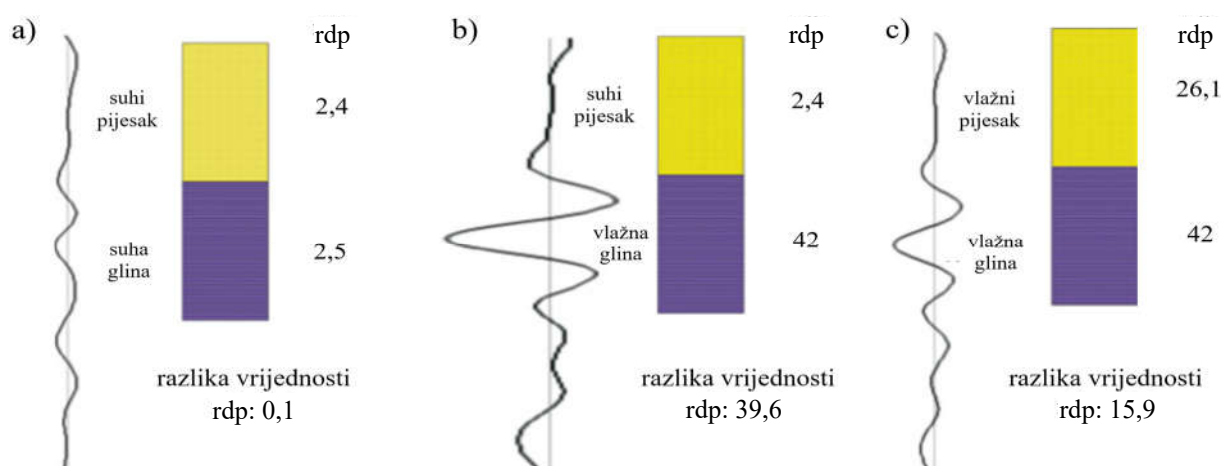
3.3 Primjena GPR-a na prometnoj infrastrukturi

Kada je riječ o prometnoj infrastrukturi GPR se primjenjuje na: cestama, željeznicama, manevarskim površinama zračnih luka, mostovima i tunelima. Na cestama se GPR prvotno koristio za određivanje debljina slojeva kolničke konstrukcije, a to mu je i danas primarna uloga [151–173]. Debljina slojeva određuje se s obzirom na brzinu širenja EM valova kroz njih. Antena odašilje EM valove koji se dijelom reflektiraju, a dijelom prolaze kroz slojeve kolničke konstrukcije različitih elektromagnetskih karakteristika (Slika 3-4 a). Dio EM valova



Slika 3-4 GPR prikupljanje podataka: a) širenje EM valova, b) A-sken c) B-sken

koji se odbija od pojedinih slojeva vraća se prema anteni, pri čemu GPR bilježi njihove amplitude i vremena od trenutka odašiljanja EM vala do trenutka njegova povratka u antenu. Odnos amplitude i vremena prikazuje se u obliku dijagrama koji se uobičajeno naziva A-sken (Slika 3-4 b). Povećanjem razlika između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti susjednih slojeva povećava se amplituda EM valova te je u konačnici lakše detektirati granicu između slojeva (Slika 3-5).



Slika 3-5 Shematski prikaz utjecaja vlažnosti materijala na A-sken [174]: a) suhi pijesak i suha glina; b) suhi pijesak i vlažna glina; c) vlažni pijesak i vlažna glina

Tijekom prikupljanja podataka GPR-om uobičajeno se koristi od 10 do 20 A-skenova po metru dužnom [14]. A-skenovi zajedno tvore grafički prikaz podzemnih slojeva tzv. B-sken. Na tipičnom B-skenu dubina slojeva, tj. promjena u materijalu, može se identificirati temeljem varijacije boja i kontrasta (Slika 3-4 c). Na primjer, crvena isprekidana linija u središtu gornje trake s najuočljivijim kontrastom označava granicu zraka i površine kolnika. Postoje još dvije linije na većim dubinama koje pokazuju prisutnost različitih slojeva kolničke konstrukcije.

Maser i Scullion [170], detaljno su opisali postupak određivanja debljine slojeva na temelju podataka prikupljenih GPR-om. Debljina sloja određuje se pomoću jednadžbe:

$$h = v \cdot \frac{t_{\text{twtt}}}{2} \quad (3.10)$$

gdje su: h debljina sloja (mm); v brzina širenja EM vala kroz sloj (mm/s); t_{twtt} vrijeme koje protekne između odašiljanja i prijema EM vala (ns).

Brzina širenja EM vala kroz sloj određuje se pomoću jednadžbe:

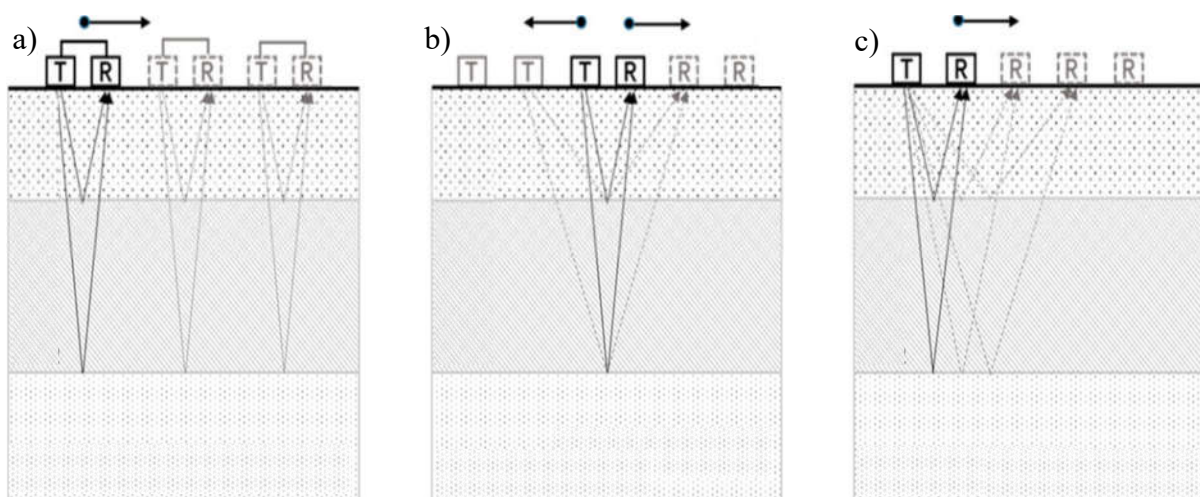
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.11)$$

Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti moguće je odrediti brojnim metodama. Najzastupljenije metode su:

- Metoda poznate debljine sloja (eng. known height method- KHM) tradicionalna je i

najpouzdanijih metoda. Zasniva se na vađenju jezgri ili iskopu istražne jame te preciznoj izmjeri debljine slojeva. U računalnom programu kojim se upravlja GPR-om unesu se debljine slojeva, a program izračuna vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Nedostatak ove metode je njena razornost, dugotrajnost, potreba za obustavom prometa i naknadnom sanacijom kolnika.

- Metoda fiksnog pomaka (eng. fix offset- FO) primjenjuje se kod GPR-a s bistatičkim ground-coupled antenama. Provodi se održavanjem fiksnog razmaka antene prijemnika i odašiljača te njihovim simultanim pomicanjem duž linije (Slika 3-6 a) [175].
- Metoda zajedničke središnje točke (eng. common midpoint method- CMP) također se primjenjuje kod GPR-a s bistatičkim ground-coupled antenama. Odašiljač i prijamnik se pomiču u unaprijed definiranim razmacima simetrično na zajedničku središnju točku [176,177].



Slika 3-6 Određivanja brzine EM valova [175]: a) FO metoda; b) CMP metoda; c) WARR metoda

- Metoda širokokutne refleksije i refrakcije (eng. wide angle reflection and refraction- WARR) primjenjuje se kod GPR-a s bistatičkim ground-coupled antenama. Prikupljanje podataka se provodi postupnim povećanjem udaljenosti između odašiljača i prijamnika (Slika 3-6 c). Antena odašiljača je u fiksnom položaju [175].
- Metoda koeficijenta površinske refleksije (eng. surface reflection coefficient- SRC) primjenjuje se isključivo kod GPR-a s air-coupled antenama. Na površinu kolnika ispod antene postavi se metalna ploča koja reflektira EM valove. GPR bilježi amplitude i frekvencije EM valova. Zatim se ukloni metalna ploča te se bilježe amplitude i frekvencije EM valova reflektiranih od kolničke konstrukcije. Usporedbom amplitude EM valova reflektiranih od kolničke konstrukcije s amplitudom EM valova reflektiranih od metalne ploče određuje se brzina širenja valove kroz kolničku konstrukciju [178].

Na temelju te brzine GPR određuje vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Nakon određivanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti prvog sloja, njegova debljina izračuna se pomoću jednadžbe:

$$h_1 = \frac{c \cdot t_{\text{wtt1}}}{2 \cdot \epsilon_{r1}} \quad (3.12)$$

S obzirom da vrijednost relativne dielektrične permitivnosti zraka poznata, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti prvog sloja može se izračunati prema jednadžbi:

$$\epsilon_{r1} = \left(\frac{A_m + A_1}{A_m - A_1} \right)^2 \quad (3.13)$$

Analogno tome moguće je izračunati vrijednost relativne dielektrične permitivnosti drugog sloja kolničke konstrukcije prema jednadžbi:

$$\epsilon_{r2} = \epsilon_{r1} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_m} \right)^2}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m} \right)^2 - \left(\frac{A_2}{A_m} \right)^2} \right]^2 \quad (3.14)$$

U nastavku je dan prikaz istraživanja o točnosti određivanja debljine asfaltnog sloja kolničke konstrukcije primjenom GPR-a. Maser [158] je definirao točnost GPR-a pri određivanju debljine sloja kao apsolutnu vrijednost razlike između debljine sloja određene na jezgre odnosno iz podataka prikupljenih GPR-om. Prema njemu očekivana točnost GPR-a na novim kolnicima varira od 95 do 97%. Maser i Puccinelli [179] su napravili detaljan pregled 47 stručnih radova i znanstvenih članaka, publiciranih u razdoblju između 1992. i 2008. godine, fokusiranih na točnosti GPR-a prilikom određivanja slojeva kolničke konstrukcije. Autori su ustvrdili da se uglavnom za određivanje debljine slojeva kolničke konstrukcije koristi GPR s air-coupled antenom nazivne frekvencije 1 GHz. Nadalje, zaključili su da je točnost GPR-a obično bila između 90 i 98% kada su u pitanju slojevi kolničke konstrukcije izrađeni s vezivom (bitumen ili cement), dok točnosti postignute kod nevezanih slojeva u pravilu nisu dokumentirane. Lahouar i suradnici [180] odredili su debljine asfaltnog sloja primjenom GPR s air-coupled antenom nazivne frekvencije 1 GHz te ground-coupled antenu nazivne frekvencije 900 MHz. Za kalibraciju GPR podataka koristili su modificiranu metodu zajedničke središnje točke. Na lokacijama na kojima su prikupljeni GPR podaci izbušene su jezgre. Potom je određeno odstupanje debljina sloja određenih na temelju podataka prikupljenih GPR-om od onih izmjerenih na jezgri (Tablica 3-3). Odstupanje GPR u odnosu na jezgre kretalo se između 1,0 i 15,5% dok je srednja vrijednost iznosila 6,8%. Al-Qadi i suradnici [181] proveli su istraživanje na dionici novoizgrađene ceste čiji se kolnička konstrukcija sastojala od MNS-a debljine 150 mm, nosivog sloja asfalta debljine 100 mm, dva vezna sloja asfalta debljine 75 i

65 mm te habajućeg asfaltnog sloja debljine 50 mm. U istraživanju su koristili GPR s air-coupled antenom nazivne

Tablica 3-3 Rezultati određivanja debljina sloja [180]

Oznaka jezgre	Debljina sloja- jezgra (mm)	Debljina sloja- GPR (mm)	Odstupanje GPR-a (%)
1n	337	322	4,3
2n	311	303	2,6
3n	368	350	5,0
4n	343	322	6,1
5n	330	359	8,7
6n	298	274	8,2
7n	279	310	11,0
8s	305	313	2,7
9s	267	308	15,5
11s	267	296	11,0
14s	286	283	1,0
17s	292	303	3,7
21s	375	345	7,9
22s	256	331	6,9

frekvencije 1 GHz, a metoda površinske refleksije korištena je za kalibraciju. Prikupljanje podataka GPR-om provedeno je pet sati nakon završetka asfaltiranja. Debljine određene iz podataka prikupljenih GPR-om usporedili sa jezgrama. Za potrebe istraživanja izbušeno je više od 40 jezgri. Na temelju obrade rezultata i provedene analize autori su izračunali srednju vrijednost odstupanja GPR-a koja je iznosila svega 2,9%. Istraživanja provedena u Virginiji [153] pokazala su da točnost debljina slojeva određenih GPR-om varira između 78 i 97%. Nadalje, istraživanjem provedenim na autocestama s teškim prometnim opterećenjem utvrđena je pogreška u rasponu između 3,7 i 8,4%, s prosječnom vrijednošću od 5,7% [173]. U izvještaju [164] se navodi da je pogreška GPR-a u određivanju debljine asfaltnog sloja između 3,7 i 11,8%, a srednja vrijednost je bila približno 8,0%. U Hrvatskoj su provedena istraživanja na autocestama, državnim i županijskim cestama. Pogreška za nove kolnike autocesta bila je uglavnom manja od 10% i varirala je od 0,16 do 12,32% [162]. Za državne i županijske ceste kojima se promet odvija dug niz godina, pogreška se kretala od 6,70 do 14,83% [162]. Al-Qadi i suradnici [157] navode da točnost GPR-a opada sa starenjem kolnika te da iznosi 95,6% na kolnicima starosti do 5 godina, a na kolnicima starijim od 10 godina 94,2%. Također, usporedili su točnost GPR-a na asfaltnim kolnicima, neprekidno armiranim betonskim kolnicima i dilatiranim nearmiranim betonskim kolnicima jednake starosti. Pogreške su iznosile 4,4% na asfaltnim kolnicima, 3,0% na neprekidno armiranim betonskim kolnicima te 2,3% na dilatiranim nearmiranim betonskim kolnicima [157]. GPR je korišten i na manevarskim površinama zračnih luka za određivanje debljina slojeva. U radu [172], za potrebe izrade trodimenzionalnog modela debljine asfaltnoga nadsloja betonske stajanke prikupljeni su podaci

GPR-om koji se sastojao od upravljačke jedinice SIR 20 i air-coupled antene nazivne frekvencije 1 GHz. GPR podaci određeni su metodom površinske refleksije. Usporedbom trodimenzionalnog modela s debljinama nadsloja izmjerenim iz ukupno 22 jezgre utvrđeno je da je se točnost GPR-a kretala između 91,5 i 100%, dok je srednja vrijednost iznosila 95,4%. Nadalje, pri određivanju debljine asfaltnih slojeva uzletno sletne staze [166], komparacijom debljina određenih iz GPR podataka i jezgri utvrđeno je odstupanje GPR-a u rasponu između 2,0 i 12,9%, a srednja vrijednost bila je 7,2% (Tablica 3-4).

Tablica 3-4 Točnost GPR-a [166]

Oznaka jezgre	Debljina sloja- jezgra (mm)	Odstupanje GPR-a (%)
B-1	77,8	10,0
B-2	87,1	2,4
B-3	54,6	8,4
B-4	73,5	2,0
B-5	58,1	3,3
B-6	49,2	8,5
B-7	42,2	6,6
B-8	38,7	3,4
B-9	49,5	9,1
B-10	55,1	9,3
B-11	57,4	12,9
B-12	60,5	9,1
B-13	53,7	2,4
B-14	50,2	10,4
B-15	44,1	9,3
B-16	43,4	7,8

Loulizi i suradnici [169] predložili su novu metodu za određivanje debljine asfaltnih slojeva kolničke konstrukcije. Za razliku od uobičajenog određivanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti na temelju izmjerenog vremena koje protekne između odašiljanja i prijema EM vala predložili su metodu koja se temelji na predviđanju reflektiranog frekvencijskog spektra kroz model višestruke refleksije. Postupkom optimizacije najprije su izračunali reflektirani frekvencijski spektar koristeći nekoliko vrijednosti za debljine i kompleksne relativne dielektrične permitivnosti, nakon čega se izabere rješenje s najmanjom srednjom kvadratnom pogreškom između predviđenog i izmjerenog frekvencijskog spektra. Metoda je testirana na trima dionicama ceste s poznatim debljinama slojeva kolničke konstrukcije. Autori su konstatairali da je odstupanje između izmjerenih i predviđenih debljina manje od 3,6%. Wang i suradnici [154] su kombiniranjem GPR podataka i poboljšanog Cannyevog algoritma dobili točnost određivanja debljine slojeva kolničke konstrukcije od 96,18%.

Tarefder i Ahmed izvijestili su da je točnost GPR-a za određivanje debljine MNS-a 95,6% i 92,3% [165]. Prema Ožboltu i suradnicima [162] ispitivanja provedena na autocestama

pokazala su da se u pojedinim slučajevima točnost određivanja debljina MNS-a GPR-om kreće u rasponu od 49,6% do 88,5%, a na državnim cestama od 76% pa do 95,2%. Autori drže da je za opadanje točnosti odgovoran algoritam računalnog programa za interpretaciju podataka prikupljenih GPR-om obzirom da se pogreške kumulativno povećavaju s povećanjem broja slojeva. Sudyka i Krysiski [159] upozorili su da se u slučajevima oštećenja jezgri mogu donijeti pogrešni zaključci o debljini slojeva i znatno smanjiti točnost GPR-a. Iz tog razloga predložili su da se u takvim slučajevima izvadi nekoliko jezgri te se provede statistička analiza.

Loizos i Plati [168] su usporedili utjecaj različitih načina određivanja relativne dielektrične permitivnosti na točnost određivanja debljina sloja. Relativna dielektrična permitivnost određena je percometrom te GPR-om kalibriranim na jezgri, odnosno metodom koeficijenta potpune površinske refleksije direktno iz GPR-a, percometara i jezgre. Rezultati istraživanja su pokazali da su sva tri načina pouzdana, ali ipak najtočniji rezultati dobivaju se kalibracijom na jezgri. Točnost ovog postupka ovisi o broju izvađenih jezgri na predmetnoj lokaciji. Autori su napomenuli da je za brzu procjenu debljina slojeva kolničke konstrukcije GPR-om, koji je kalibriran metodom koeficijenta potpune površinske refleksije, ne samo dovoljno točan postupak, već je i učinkovit [168].

U istraživanju [161], provedenom na tri skupine debljina određenih GPR-om na istim lokacijama i u različitim vremenskim razdobljima, pronađene su pogreške u debljini u rasponu od 5,9% do 12%. Razlika u rezultatima može se objasniti promjenama u vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti zbog različitog sadržaja vlage na mjestu ispitivanja. Podaci prikupljeni istog dana pokazali su dobru ponovljivost. Brzina prikupljanja podataka GPR-om nema značajan utjecaje na performanse GPR-a [164]. Utvrđeno je da je pogreška određivanja debljine iznosila 6,7% za prikupljanje podataka u stacionarnom modu, 7,9% pri brzinama prikupljanja podataka do 32 do 64 do km/h te 8,3% pri brzinama prikupljanja podataka od 64 do 113 km/h [164]. Stoga je GPR sposoban prikupljati podatke sa zadovoljavajućom točnošću i pri brzinama od 100 km/h [160] pa čak i 120 km/h [144].

Dodatnu primjenu na cestama GPR je pronašao za: detekciju pukotina i šupljina u kolniku [182–187], kontrolu kvalitete asfaltnih slojeva, detekciju vlage i procjenu sadržaja vode [13,19,188,189].

Na manevarskim površinama zračnih luka GPR-om se određuju debljine slojeva [156,166,171,172] te detektiraju pukotine, šupljine [190–192], delaminacija slojeva konstrukcije [193] i položaj armature [194].

Glavna prepreka za sustavnu primjenu GPR-a na željeznicama su čelične tračnice koje ometaju emitiranje EM valova i prikupljanje podataka. Navedeni problem pokušava se riješiti izradom

namjenskih antena i računalnih programa. GPR na željeznicama uglavnom se koristi za određivanje debljine zastorne prizme [195–198] i procjenu njenog stanja [25,26,199–207].

Kako bi se produžio uporabni vijek mostova i smanjili troškovi održavanja potrebno je redovito provođenje pregleda stanja. Primjenom GPR-a na mostovima moguće je uspješno određivanje debljine nosača [208,209], mapiranje položaja armature [210–214], vršenje procjena stanja pojedinih elemenata mosta i praćenje oštećenja [215–223].

Kad je riječ o tunelima, GPR se najčešće primjenjuje pri određivanju debljine primarne podgrade i betonske obloge [224–235], detekciji oštećenja primarne podgrade i sekundarne obloge [229,231–234,236–242] te određivanju položaja armature [243,244].

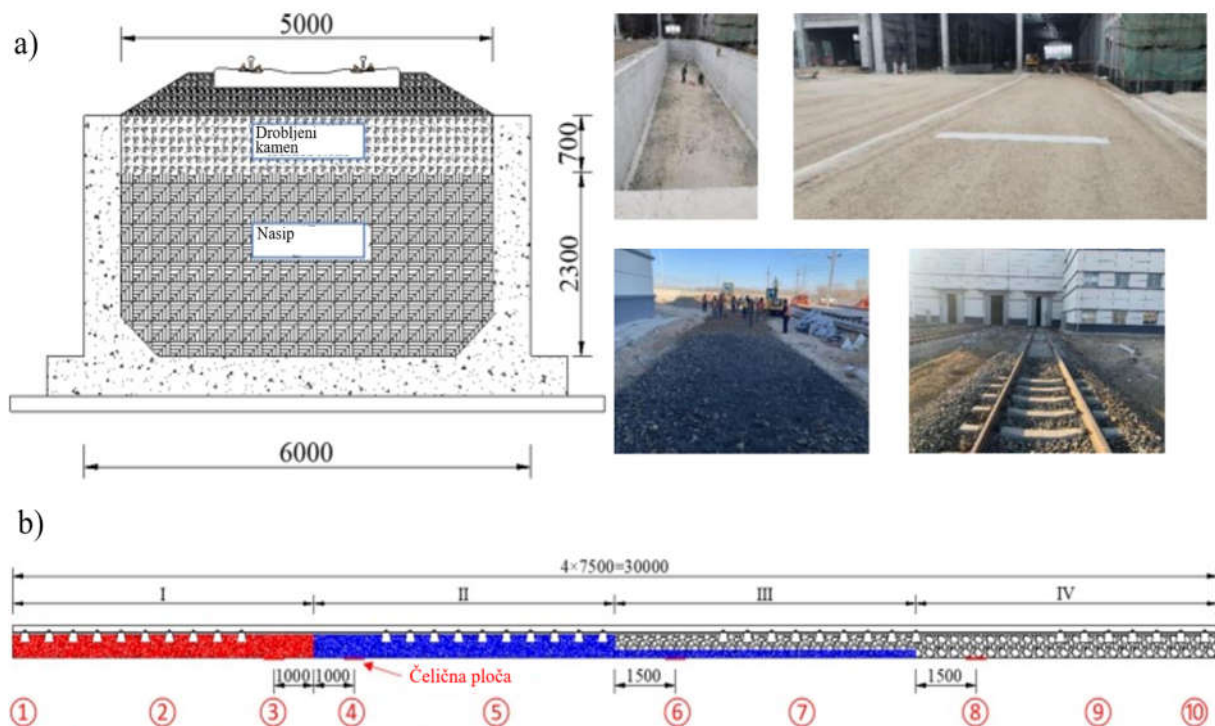
3.4 Utjecaj vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti

Posljednjih dvadesetak godina istražuje se mogućnost primjene GPR-a za procjenu stanja i praćenje degradacije nosivih slojeva prometnica izgrađenih od nevezanih materijala. Pregledom dosadašnjih istraživanja vidljivo je da se procjena stanja temelji na promjeni vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti do koje dolazi uslijed povećanja udjela sitnih zrna te vlage. Za sada je većina provedenih istraživanja bila usmjerena na zastornu prizmu dok je vrlo mali broj istraživanja bio usmjeren na MNS-a. U ovom poglavlju prikazana su dosadašnja istraživanja provedena na zastornoj prizmi i MNS-u primjenom GPR-a s ciljem određivanja utjecaja promjene udjela sitnih zrna i vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti.

Funkcionalnost željezničke pruge uvelike ovisi o stanju zastorne prizme. Čista i suha zastorna prizma ima nisku vrijednost relativne dielektrične permitivnosti jer su šupljine između zrna ispunjene zrakom [204]. Selig i Waters [245] naveli su izvore nastanka zablacenosti zastorne prizme i učestalost njihova nastanka: drobljenje zrna zastorne prizme (76%), prodiranje sitnih zrna iz slojeva koji se nalaze ispod prizme (16%) odnosno površinski kroz prizmu (7%) te degradacija pragova (1%). Zablacenost zastorne prizme uzrokuje brojne probleme. Prije svega onemogućuje pravilno otjecanje vode, a s povećanjem udjela vlage zablacenoj zastornoj prizmi smanjuje se krutost i posmična čvrstoća [246]. Nadalje, smanjuje se otpor trenja između praga i zastorne prizme što može imati negativan utjecaj na geometriju kolosijeka i posljedično dovesti do nestabilnosti kolosijeka [247,248]. Osim toga, zablacena zastorna prizma doprinosi povećanju razine buke od prometa [249] te omogućuje razvoj i rast vegetacije koja je nepovoljna s aspekta prometne sigurnosti [250].

Liu i suradnici [205] istraživali su zablacenost zastorne prizme na modelu željeznice u prirodnoj veličini. U betonskom kalupu duljine 30 m i dubine 3 m najprije je izgrađen sloj nasipa visine

2,3 m, a zatim zastorna prizma od kamenog materijala veličine zrna od 25 mm do 63 mm (Slika 3-7 a). Korišteni materijala je prema kineskom standardu [251] za materijale svrstan u klasu 1. Model se sastojao od četiri dionice (Slika 3-7 b). Na dionicama 1 i 2 zastorna prizma je bila potpuno zablacena, tj. sve pore između krupnih zrna bile su ispunjene sitnim zrnima. Zastorna prizma dionice 3 bila je srednje zablacena tj. debljina sloja zastorne prizme koja je bila ispunjena sitnim zrnima iznosila je 17 cm, a na dionici 4 nisu dodana sitna zrna. Autori su zablacenost simulirali dodavanjem sitnih zrna ugljena veličine manje od 5 mm na dionici 1 te zrna drobljenog bazalta promjera $<7,1$ mm na dionicama 2 i 3. Istraživanje je provedeno višekanalnim GPR-om koji se sastojao od centralne jedinica Geophysical Survey Systems, Inc. GSSI SIR 30, dvije ground-coupled antene nazivne frekvencije 400 i 900 MHz te tri air-coupled antene nazivne frekvencije 2 GHz. Na svakoj dionici na razini posteljice postavljena je čelična ploča kako bi mogli provjeriti jesu li se EM valovi proširili do dna zastorne prizme. U radu su prikazani rezultati istraživanja samo za ground-coupled antenu nazivne frekvencije 400 MHz te dionice 2, 3 i 4. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti na dionici 2 varirala je između 6,4 i 7,0 s prosječnom vrijednošću 6,7. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti zastorne prizme na dionici 3 varirala je od 4,3 do 5,0 s prosječnom vrijednošću 4,7. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti čiste zastorne prizme ujednačena je na području cijele dionice i iznosila je 4,7. Na temelju prikazanih rezultata vidljivo je da se povećanjem udjela sitnih zrna u zastornoj prizmi vrijednost relativne dielektrične permitivnosti značajno povećava.



Slika 3-7 Ispitivanje utjecaja zablacenosti zastorne prizme na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [205]: a) prikaz modela; b) ispitne dionice

Također, autori su dali preporuku da se pregled zastorne prizme izvodi primarno antenom frekvencije 2 GHz, a po potrebi se može dopuniti antenama frekvencije od 400 i 900 MHz.

Sussmann [199] je istražio utjecaj povećanja udjela sitnih zrna i vlažnosti zastorne prizme na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Istraživanja su provedena na zastornim prizmama izgrađenim od tucanika granitnog podrijetla. Za prikupljanje podataka u istraživanju su korištena dva različita GPR-a. Prvi sustav bio je od proizvođača GSSI. Sustav se sastojao od odašiljača, prijamnika, upravljačke jedinice SIR-10H, zaslona i uređaja za mjerenje udaljenosti. Antene korištene u ispitivanju bile su bistatičke air-coupled antene nazivne frekvencije 1 i 2 GHz, te ground-coupled antene nazivne frekvencije 500 i 900 MHz. Drugi sustav, proizvođača Pulse Radar, korišten je s ground-coupled antenom nazivne frekvencije 1 GHz. Autor je zaključio da najznačajniji utjecaj na povećanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti ima povećanje udjela vlage, a zatim povećanje vrijednosti indeksa zablacenosti (Tablica 3-5).

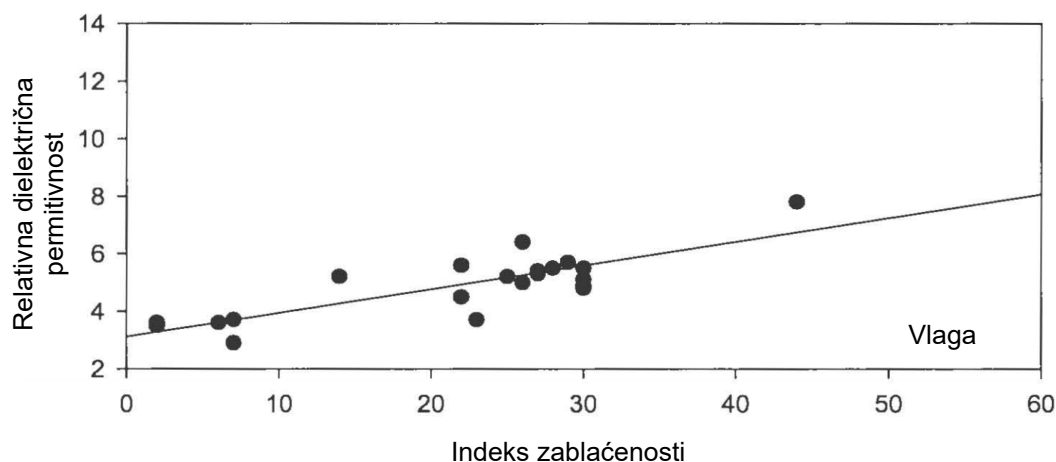
Tablica 3-5 Utjecaj vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti zastorne prizme [199]

Uzorak	Broj ispitnih uzoraka	Srednja vrijednost rdp	Udio vlage (%)
Suhi čisti tucanik	9	3,6	0,0
Vlažni čisti tucanik	23	4,0	1,5
Suhi zblaćeni tucanik	3	3,7	0,0
Vlažni zblaćeni tucanik	39	5,1	4,5
Mokri zblaćeni tucanik	3	7,2	9,5

Indeks zablacenosti izračunao je prema jednadžbi:

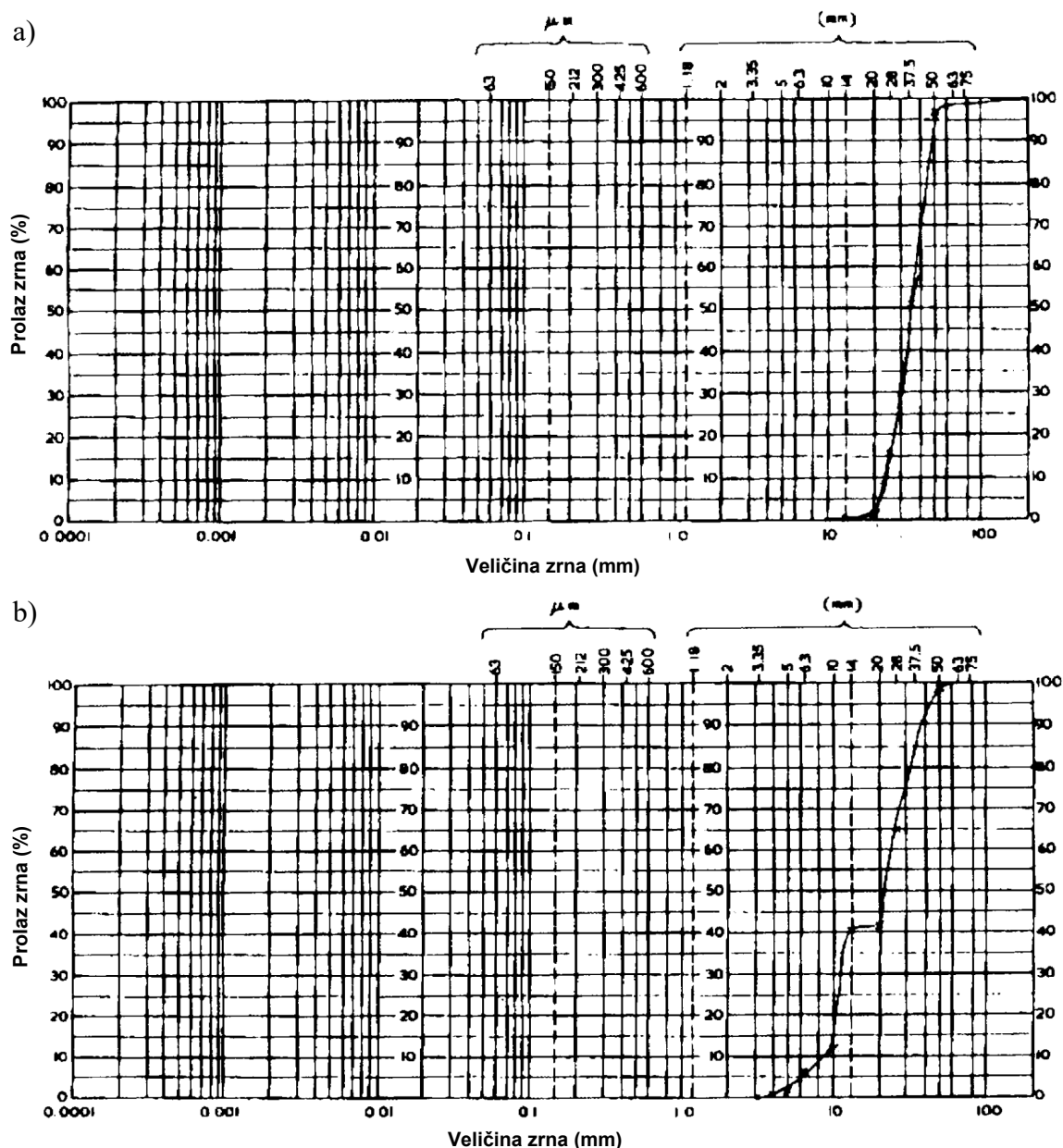
$$FI=P_4+P_{200} \quad (3.15)$$

gdje su: FI indeks zablacenosti; P_4 udio zrna materijala koja su prošla kroz sito otvora 4,57 mm (%); P_{200} udio zrna agregata koja su prošla kroz sito otvora 0,075 mm (%). S povećanjem vrijednosti indeksa zablacenosti, povećavala se vrijednost relativne dielektrične permitivnosti ispitanih uzorka (Slika 3-8).



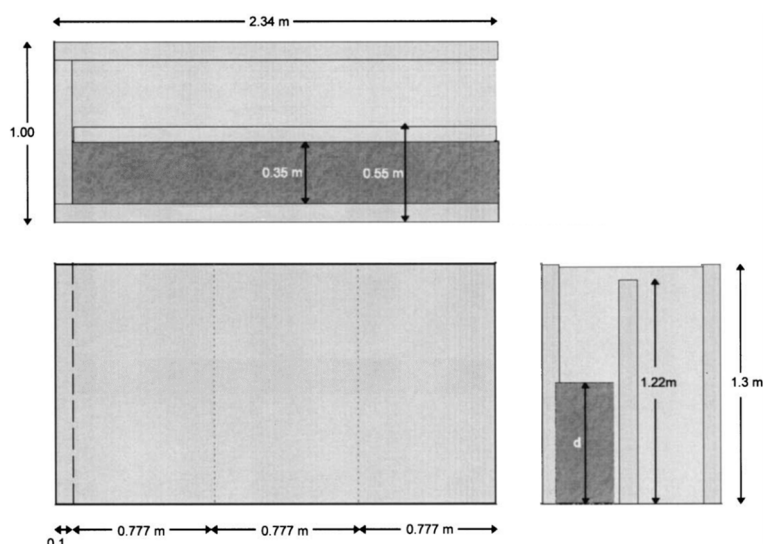
Slika 3-8 Odnos vrijednosti indeksa zablacenosti i relativne dielektrične permitivnosti [199]

Clark i suradnici [26] proveli su laboratorijska istraživanja na čistoj i zablaćenju zastornoj prizmi. Zablaćeni tucanik uzet je sa željezničke pruge na kraju uporabnog vijeka zastorne prizme. Općenito, autori smatraju da zastorna prizma više ne može ispunjavati svoju primarnu svrhu kada maseni udio sitnih zrna ($\leq 0,075$ mm) dosegne 10%. Granulometrijski sastav čistog i zablaćenog tucanika prikazan je na slici 3-9. Tucanik je ugrađen u ciglom zidani kalup dimenzija 1,00 x 2,34 x 1,30 m (Slika 3-10). Ispitivanja su provedena GPR-om s ground-coupled antenama nazivne frekvencije 500 i 900 MHz. Tijekom ispitivanja mijenjan je udio vlage. Rezultati ispitivanja (Tablica 3-6) pokazali su da je vrijednost relativne dielektrične permitivnosti suhog čistog tucanika manja za 14,3% u usporedbi s vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti čistog tucanika s 5% vlage, odnosno za 88,9% u usporedbi s



Slika 3-9 Granulometrijski sastav [26]: a) čistog tucanika; b) zablaćenog tucanika

vrijednošću relativne dielektrične permitivnosti čistog saturiranog tucanika. Nadalje, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti suhog zblaćenog tucanika bila je manja za 44,9% u usporedbi s vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti čistog tucanika s 5% vlage, odnosno za 99,2% u usporedbi s vrijednošću relativne dielektrične permitivnosti čistog saturiranog tucanika. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti zblaćenog tucanika bila je za 43% veća od vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti suhog čistog tucanika. Također, autori su izračunali da razlika u vremenu prolaska EM vala kroz uzorak iznosi 1,5 ns što je približno 20% vremena putovanja EM vala u jednom smjeru. Autori napominju da se primjenom antenom nazivne frekvencije 500 MHz može lakše detektirati dno uzorka. Kao razlog za to navode činjenicu da antena nazivne frekvencije 900 MHz ima više smetnji te dolazi do raspršenja signala uslijed diferencijalnog zbijanja i nepravilnog oblik zrna zastorne prizme. Kako bi smanjili negativni učinak smetnji autori predlažu da se koriste antene koje emitiraju EM valove valne duljine znatno veće od prosječne dimenzije zrna materijala.



Slika 3-10 Shematski prikaz kalupa [26]

Tablica 3-6 Utjecaj vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti zastorne prizme [26]

Uzorak	Srednja vrijednost relativne dielektrične permitivnosti
Suhi čisti tucanik	3,0
Čisti tucanik s 5% vlage	3,5
Saturirani čisti tucanik	26,9
Zblaćeni tucanik s 5%vlage	4,3
Vlažni zblaćeni tucanik	7,8
Saturirani zblaćeni tucanik	38,5

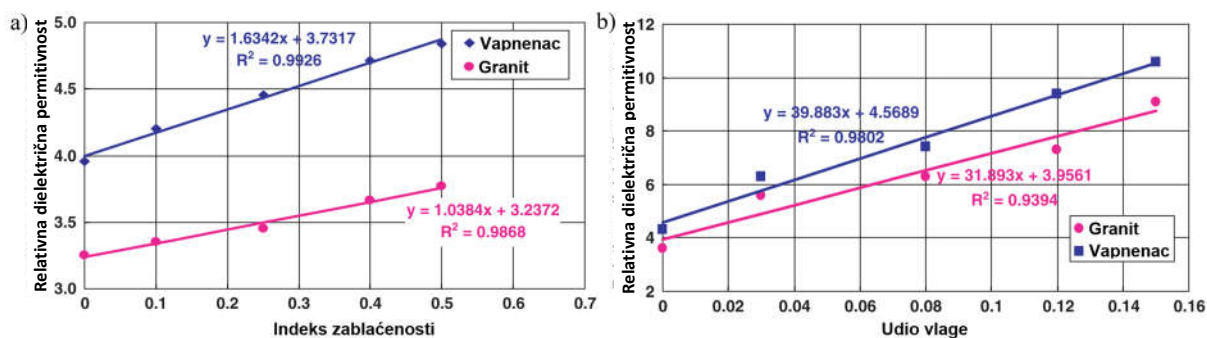
Leng i Al-Qadi [25,252] proveli su istraživanje na tucaniku vapnenačkog i granitnog podrijetla. Zblaćenost zastorne prizme postigli su dodavanjem gline u različitim volumnim udjelima s obzirom na volumen šupljina. Uzorak ukupne visine kalupa 915 mm sastojao se od tri sloja

koja su ugrađena u kalup dimenzija 1,5 x 1,5 x 1,2 m (Slika 3-11). Prvi korak izrade uzoraka obuhvaćao je sušenje materijala, ugradnju, zbijanje te izračun volumena šupljina 305 mm debelog sloja zastorne prizme. Udio šupljina iznosio je 36,3% za materijal granitnog podrijetla odnosno 37,8% za materijal vapnenačkog podrijetla. Zatim su u uzorak dodana zrna gline u udjelu od 10, 25, 40 i 50% s obzirom na izračunati volumena šupljina uzorka. Kako bi osigurali ravnomjerno dodavanje zrna gline na površini uzorka postavljena je mreža veličine otvora oka 30 cm. Vibriranjem uzorka osigurali su da zrna gline dospiju do dna uzorka. Nakon toga izvedena su još dva sloja debljine 305 mm. U središnjem sloju udio dodanih zrna gline iznosio je 50%, odnosno 25% u površinskom sloju. Primjenom GPR-a s air-coupled antenom nazivne frekvencije 2 GHz određene su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Nakon izrade uzorka varirana je vlaga u udjelima od 10, 25, 40 i 50% s obzirom na izračunati volumena šupljina prvog sloja uzorka. Za svaku razinu vlažnosti provedeno je prikupljanje podataka GPR-om. Na temelju rezultata provedenih istraživanja autori su došli do zaključaka da uzorci



Slika 3-11 Drveni kalup i air-coupled antena korišteni u istraživanju [25,252]

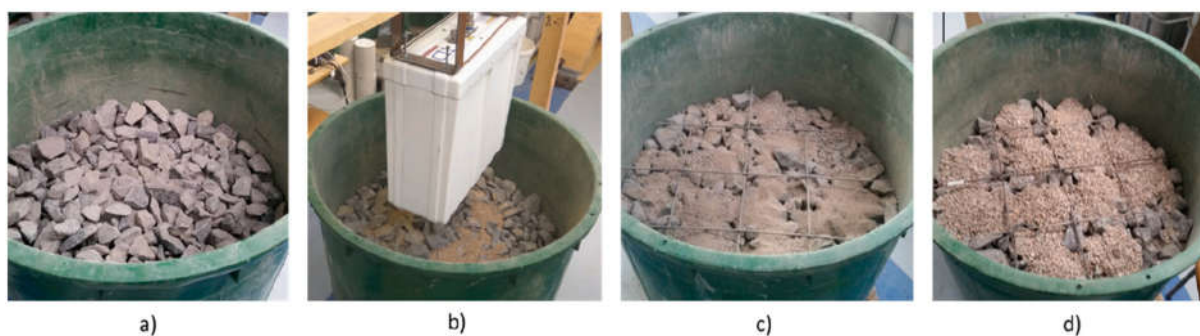
izrađeni od materijala granitnog podrijetla imaju manju vrijednost relativne dielektrične permitivnosti u usporedbi s uzorcima izrađenim od materijala vapnenačkog podrijetla pri istim udjelima sitnih zrna i vlage. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti povećavala se s povećanjem udjela zrna gline. Zabilježena je čvrsta linearna veza između vrijednosti relativne



Slika 3-12 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti [252]: a) suhi uzorci s promjenjivim djelom zrna gline b) uzorci s 13% dodane gline pri različitim udjelima vlage

dielektrične permitivnosti i udjela gline kod obje skupine uzoraka (Slika 3-12 a). Također, uočena je čvrsta linearna veza između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti i udjela vlage. Kada se sadržaj vlage povećao s 0% na 15%, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti povećala se s 3,9 na 9,1 u slučaju uzoraka izrađenih od materijala vapnenačkog podrijetla, odnosno s 4,2 na 10,5 u slučaju uzoraka izrađenih od materijala granitnog podrijetla (Slika 3-12 b).

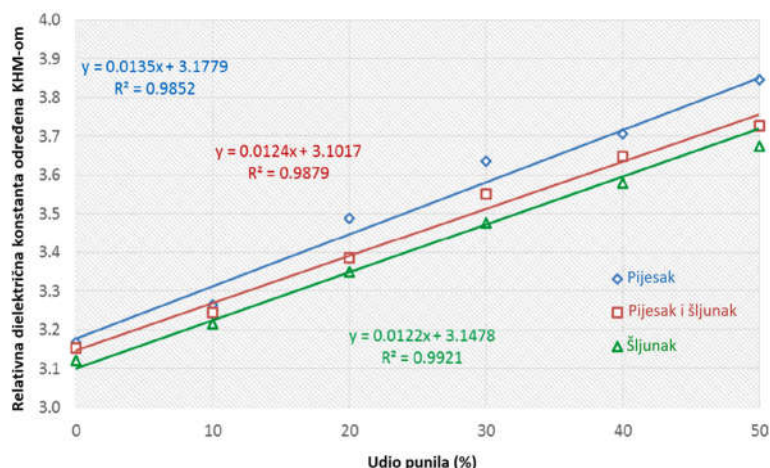
Artagan i Borecky [207] u laboratoriju su ispitali tucanik granitnog podrijetla promjera zrna 31,5-63,0 mm. Zablacenost materijala simulirali su dodavanjem različitih punila: pijesak (0,2-2,0 mm), šljunak (4,0-8,0 mm) te kombinacijom pijeska i šljunka (Slika 3-13). Laboratorijska istraživanja provedena su na suhim uzorcima te uzorcima s različitim udjelima vlage. Suhe uzorke visine 45 cm ugradili su u plastične kalupe oblika krnjeg stošca. Punilo su dodavali u udjelu od 0 do 50% (korak 10%) od volumena pora čistog tucanika. Udio volumena pora iznosio je 40,1%. Kako bi se osiguralo ravnomjerno dodavanje punila na površinu uzorka postavljena je armaturna mreža veličine oka 20 cm (Slika 3-13 c i d). Na dno kalupa postavljena je metalna pločica kako bi se osigurala potpuna refleksija EM valova. GPR prikupljanje podataka provedeno je s air-coupled antenom nazivne frekvencije 2 GHz proizvođača IDS. Za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti koristili su tri metode kalibracije KHM, SRM i kompleksni model indeksa loma (eng. Complex Refractive Index Model- CRIM). Početne vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti dobivene SRM metodom bile su relativno niže u usporedbi s preostale dvije metode pa autori nisu koristili SRM metodu kalibracije u daljnjoj provedbi ispitivanja. Rezultati istraživanja su prikazani u tablici 3-7. Kako je razina zablacenosti rasla, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti imala je tendenciju postupnog povećanja. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti mješavine tucanika i pijeska bile su nešto više od vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti mješavine tucanika i šljunka. Navedeno je posljedica većeg volumena pora ispunjenih zrakom kod šljunka u usporedbi s pijeskom. Kod svih materijala uočena je linearna veza između povećanja udjela



3-13 Uzorci zastorne prizme [207]: a) čisti agregat; b) čisti agregat s dodanim pijeskom; c) čisti agregat s dodanim pijeskom i šljunkom; d) čisti agregat s dodanim šljunkom

Tablica 3-7 Utjecaj promijene sastava mješavine na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [207]

Tip dodanog materijala	Pijesak		Šljunak		Pijesak i šljunak	
Udio dodanog materijala (%)	Rdp _{KHM}	Rdp _{CRIM}	Rdp _{KHM}	Rdp _{CRIM}	Rdp _{KHM}	Rdp _{CRIM}
0	3,17	3,03	3,12	3,03	3,15	3,03
10	3,26	3,15	3,22	3,14	3,24	3,14
20	3,49	3,27	3,35	3,25	3,39	3,26
30	3,64	3,39	3,48	3,36	3,55	3,38
40	3,71	3,52	3,58	3,48	3,65	3,50
50	3,85	3,65	3,67	3,59	3,73	3,62



Slika 3-14 Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti materijala s različitim tipom i udjelom punila [207]

punila i povećanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti (Slika 3-14). Sljedeća faza istraživanja bila je ispitivanje utjecaja vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Korišten je čisti agregat te mješavine tucanika s 10 i 30% pijeska odnosno šljunka. Udio dodane vlage izračunat je s obzirom na udio šupljina u uzorku. Kod uzoraka koji su napravljeni od materijala bez dodanog punila udio vlage kretao se u rasponu od 0 do 100 % (korak 10%), odnosno od 0 do 50% (korak 10%) kod uzoraka napravljenih od materijala s dodatkom pijeska i šljunka. Dimenzije uzoraka bile su 1,0 x 1,2 x 0,25 m, a korišteni su plastični kalupi (Slika 3-15). Rezultati istraživanja pokazali su čvrstu linearnu vezu između povećanja udjela vlage i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti mješavina s pijeskom odnosno šljunkom (Slike

Tablica 3-8 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti tucanika s dodanim pijeskom i šljunkom [207]

Vrsta i udio dodanog materijala	Pijesak 10%		Pijesak 30%		Šljunak 10%		Šljunak 30%	
Udio vlage (%)	Rdp _{KHM}	Rdp _{CRIM}	Rdp _{KHM}	Rdp _{CRIM}	Rdp _{KHM}	Rdp _{CRIM}	Rdp _{KHM}	Rdp _{CRIM}
0	3,27	3,15	3,54	3,39	3,26	3,14	3,52	3,36
10	4,62	4,39	5,21	4,68	4,61	4,38	5,12	4,64
20	5,97	5,84	6,04	6,17	6,02	5,82	6,55	6,13
30	7,41	7,49	7,71	7,87	6,77	7,48	7,94	7,82
40	10,07	9,35	10,34	9,77	9,40	9,34	10,17	9,72
50	11,63	11,42	12,05	11,88	11,37	11,40	11,89	11,83

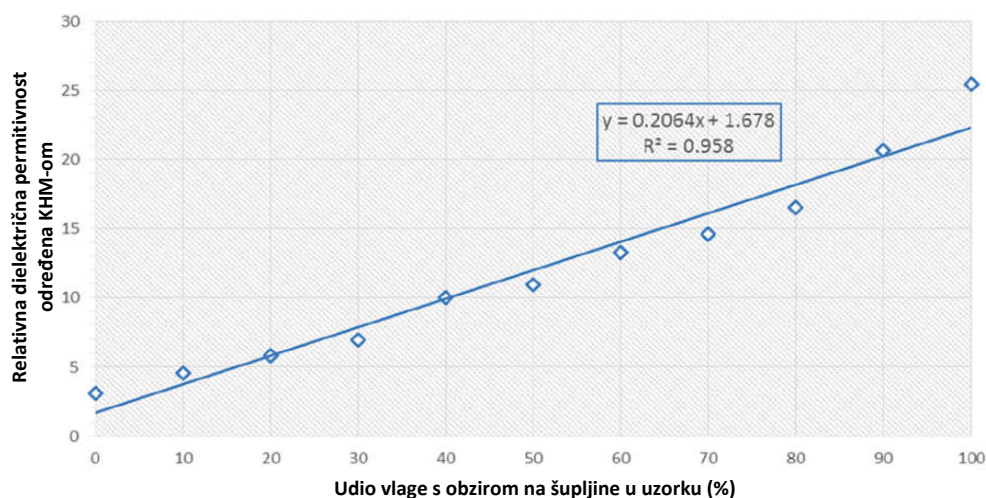
3-17 i 3-18, Tablica 3-8), kao i mješavine čistog agregata (Tablica 3-9, Slika 3-16). Nisu uočena značajnija odstupanja između vrijednosti određenih CRIM i KHM metoda kalibracije.

Tablica 3-9 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti čistog tucanika [207,253]

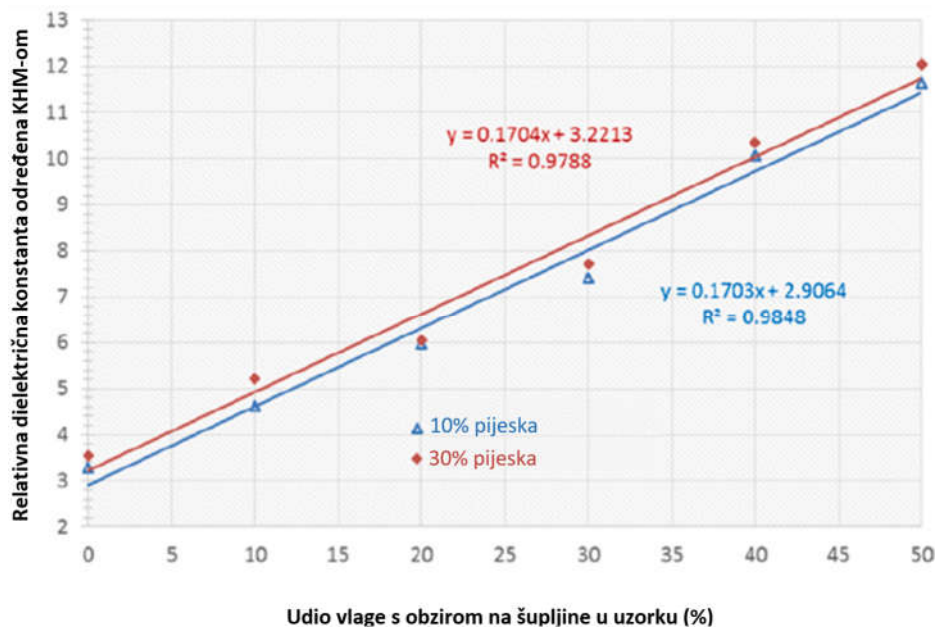
Udio vlage (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Rdp _{KHM}	3,09	4,59	5,82	6,95	10,01	10,94	13,27	14,59	16,57	20,65	25,50
Rdp _{CRIM}	3,03	4,25	5,67	7,31	9,15	11,19	13,44	15,90	18,57	21,44	24,51



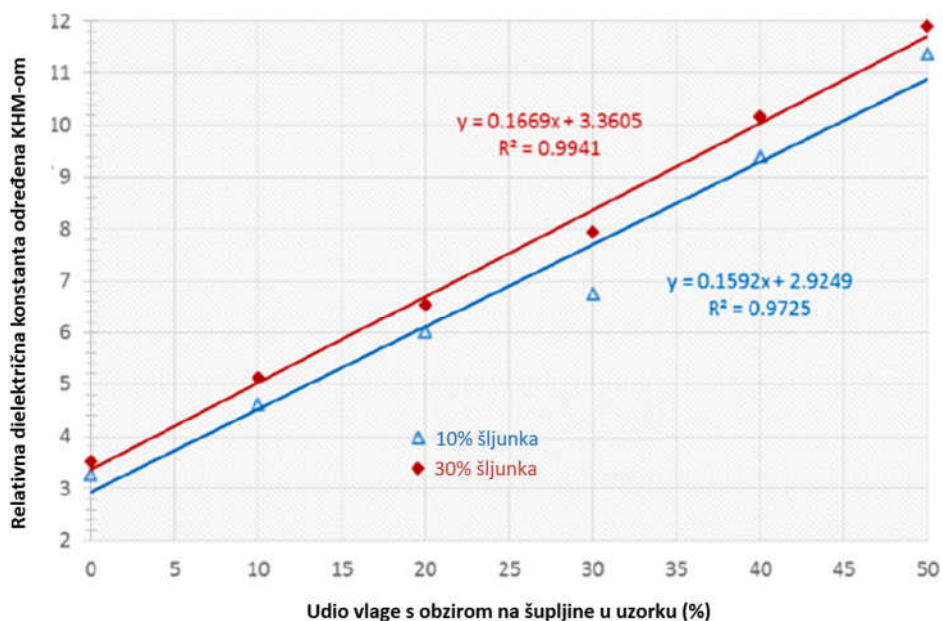
Slika 3-15 Uzorci zastorne prizme [188]: a) čisti suhi agregat; b) čisti agregat s dodanom vodom; c) čisti agregat potpuno saturirani; d) agregat s dodanim pijeskom; e) vlažni mješavina čistog agregata i pijeska; f) čisti agregat s dodanim šljunkom



Slika 3-16 Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka bez dodanog punila s različitim udjelima vlage [207]



Slika 3-17 Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka s dodatkom pijeska pri različitim udjelima vlage [207]



Slika 3-18 Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka s dodatkom šljunka pri različitim udjelima vlage [207]

Benedetto i suradnici [254] proveli su istraživanje o procjeni stupnja zablacenosti zastorne prizme primjenom GPR-a. Uzorci su izrađeni od tucanika dobivenog drobljenjem vapnenačke stijene, a granulometrijski sastav prikazan je u tablici 3-10. Zablacenost su postigli dodavanjem sitnozrnatog rahlog materijala čiji je granulometrijski sastav prikazan u tablici 3-11. Tucanik je ugrađen u kalup izrađen od metakrilata unutarnjih dimenzija 147 x 147 x 48 cm (Slika 3-19). Za ispitivanje je korišten GPR te dvije air-coupled antene nazivne frekvencije 2 GHz (RIS Hi-Pave HR1 2000 i 2000 NA) i jedna air-coupled antenna nazivne frekvencije 1 GHz (RIS Hi-Pave HR1 1000) proizvođača IDS Georadar. Antena se nalazila na visini 40 cm iznad uzorka

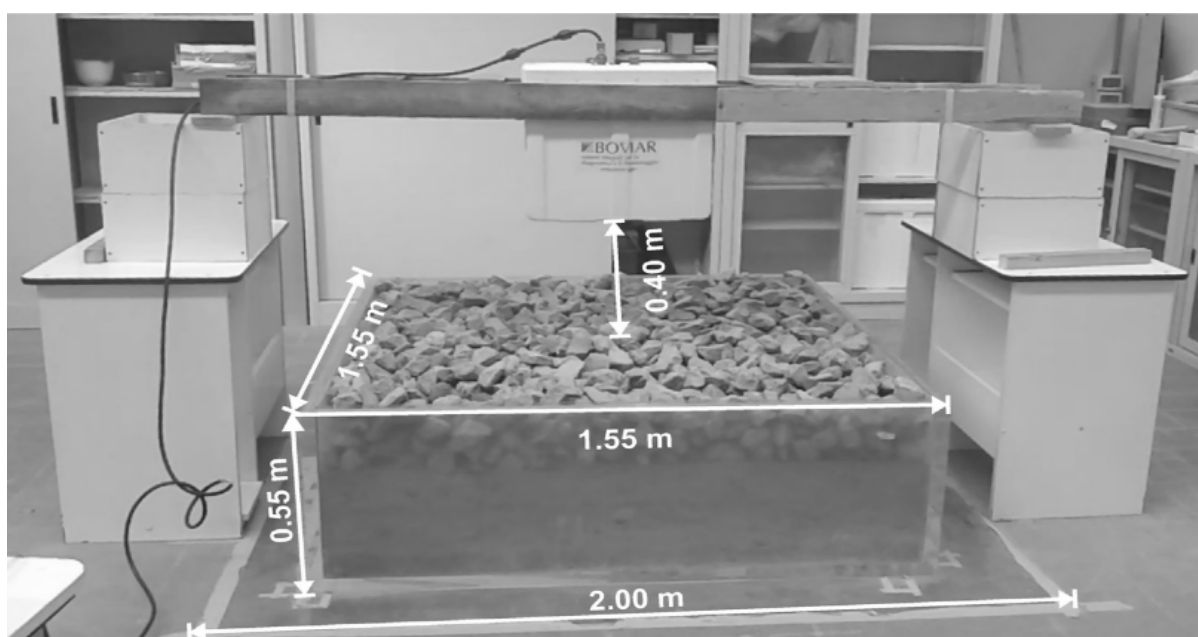
(Slika 3-19). Kako bi osigurali potpunu refleksije EM valova te izbjegli pojavu šumova zbog utjecaja armature podne konstrukcije laboratorija ispod kalupa je postavljena bakrena ploča. Za izradu uzorka korišteno je približno 1500 kg tucanika. Udio dodanog materijala kretao se između 250 i 800 kg, a dodavan je tako da je razina zablacenosti zastorne prizme, mjerena od dna uzorka, iznosila 10, 20 i 30 cm (Slika 3-20). Kako bi osigurali ravnomjerno nanošenje dodanog materijala autori su koristili drveni okvir koji se sastojao od 16 polja dimenzija 35 x 35 cm unutar kojih se nalazila polimerna mreža otvora oka 4 mm. Zbijanje je provedeno ručnim udarnim čekićem s prikladnim nastavkom. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti mješavina tucanika i dodatnog materijala dobivene su korištenjem dviju metoda obrade prikupljenih podataka, biranje signala u vremenskoj domeni (eng. time domain signal picking-TDSP) i SRM. Također korišten je i teorijski model tzv. volumetrijska formula miješanja (eng. volumetric mixing formula- VMF). Rezultati istraživanja (Tablice 3-12 i 3-13) pokazali su da između tri prethodno nabrojana modela SRM bitno odskače i nije prikladan za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za materijale korištene u ispitivanju i raspon frekvencija korištenih antena. Autori su uočili dobro podudaranje između vrijednosti relativnih dielektričnih permitivnosti određenih TDSP tehnikom i VMF pristupom. Najmanja razlika u

Tablica 3-10 Granulometrijski sastav agregata [254]

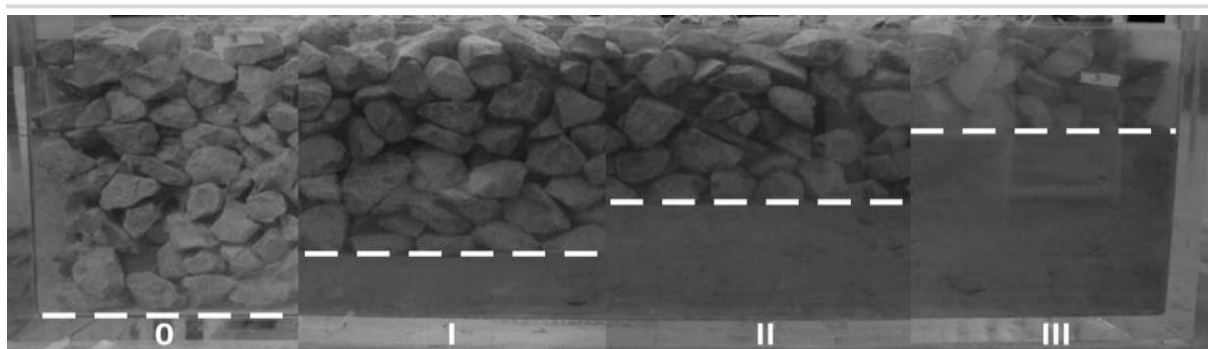
Otvor sita (mm)	80	63	50	40	31,5	22,4
Prolaz kroz sito (%)	100	100	79,9	30,6	1,2	0,3

Tablica 3-11 Granulometrijski sastav dodanog materijala [254]

Otvor sita (mm)	4,750	2,000	0,425	0,075
Prolaz kroz sito (%)	100	99,6	99,4	84,7



Slika 3-19 Prikaz postavki ispitivanja [254]



Slika 3-20 Različite razine zablacenosti [254]

odstupanju rezultata uočena je u slučaju podataka prikupljenih antenskim sustavom od 1000 MHz. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti povećavale su se s povećanjem razine zablacenosti te su se kretale između 3,51 i 5,35.

Tablica 3-12 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene SRM [254]

Razina zablacenosti	Relativna dielektrična permitivnost			
	antena HR1 2000	antena HR1 2000NA	antena HR1 1000	VMF
0 cm	1,74	1,72	2,57	3,64
10 cm	1,61	2,37	3,38	4,18
20 cm	2,56	2,50	2,82	4,71
30 cm	2,50	2,15	3,39	5,34

Tablica 3-13 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene TDSP [254]

Razina zablacenosti	Relativna dielektrična permitivnost			
	antena HR1 2000	antena HR1 2000NA	antena HR1 1000	VMF
0 cm	3,77	3,86	3,51	3,64
10 cm	4,07	4,09	4,16	4,18
20 cm	4,38	4,37	4,52	4,71
30 cm	5,27	5,30	5,35	5,34

Tosti i suradnici [23,24,255] istražili su utjecaj povećanja udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti materijala koji se koriste pri izradi MNS-a (Slika 3-21): šljunak (4/8 mm), krupnozrnati pijesak (1/2 mm) i sitnozrnati pijesak (0,125/0,250 mm). Navedeni materijali se prema smjernicama [256] mogu klasificirati u skupine A1, A2 i A3.

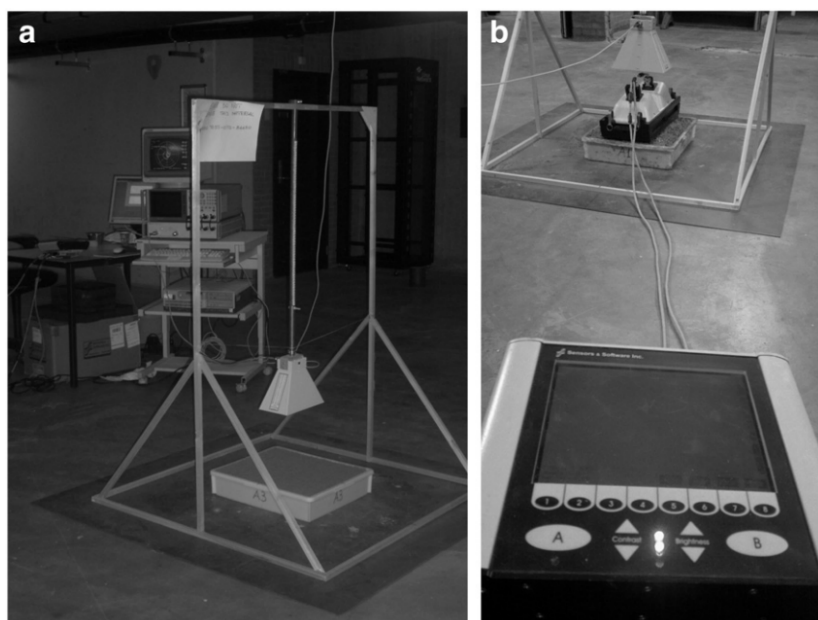


Slika 3-21 Prikaz materijala korištenih u ispitivanju [255]: a) šljunak; b) krupnozrnati pijesak; c) sitnozrnati pijesak; d) bentonitna glina

Tablica 3-14 Granulometrijski sastav bentonitne gline [23,255]

Otvor sita (mm)	0,125	0,090	0,063
Prolaz kroz sito (mm)	98	95	88

Sitna zrna bentonitne gline (Tablica 3-14) dodavana su osnovnom materijalu. Bentonitna glina dodavana je u masenom udjelu od 0 do 10% (korak 2%), odnosno od 10 do 25% (korak 5%). Uzorci su ugrađeni u kalupe od šperploče dimenzija 0,40×0,47×0,105 m. Ispitivanja su provedena korištenjem dva različita GPR-a, ultra širokopojasnog stepped frequency air-coupled GPR-a i ground-coupled GPR-a središnje frekvencije 500 MHz (Slika 3-22). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3-15. Povećanjem udjela sitnih zrna za 25% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti se povećala za približno 50% u slučaju šljunka odnosno 40% u slučaju krupnozrnatog pijeska. Kod pijeska zabilježeno je povećanje vrijednost relativne dielektrične permitivnosti za 45%. Tosti i suradnici su također potvrdili da povećanje udjela



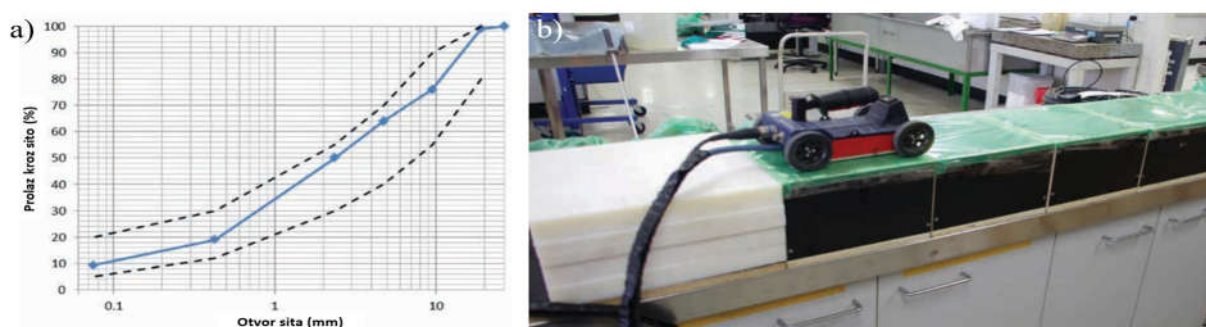
Slika 3-22 Prikaz opreme korištene u istraživanju [23]: a) stepped frequency air-coupled GPR; b) ground-coupled GPR-a

Tablica 3-15 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za različite mješavine osnovnih materijala i bentonitne gline [23,255]

Udio dodane bentonitne gline (%)	Šljunak		Krupnozrnat pijsak		Sitnozrnat pijsak	
	Rdp _{FWI}	Rdp _{TDSP}	Rdp _{FWI}	Rdp _{TDSP}	Rdp _{FWI}	Rdp _{TDSP}
0	2,47	2,44	2,83	2,76	2,66	2,58
2	2,66	2,62	2,92	2,88	2,69	2,67
4	2,69	2,68	3,16	3,15	2,81	2,77
6	2,95	2,86	3,20	3,23	2,85	2,84
8	3,21	3,19	3,22	3,15	3,06	3,09
10	3,48	3,46	3,41	3,39	3,11	3,13
15	3,49	3,49	3,80	3,81	3,40	3,39
20	3,63	3,63	3,93	3,90	3,63	3,61
25	3,72	3,74	3,86	3,92	3,83	3,81

vlage rezultira dodatnim povećanjem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti mješavina sa sitnim zrnima, kao i da na relativne dielektrične permitivnosti utječe oprema koja se koristi prilikom ispitivanja i korištena metoda obrade podataka prikupljenih GPR-om [23,24].

Muller i suradnici [257] istražili su utjecaj promjene udjela vlage i stupnja zbijenosti materijala koji se koristi za izradu MNS-a na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Istraživanje je provedeno pomoću GPR-a GSSI SIR-300 s ground-coupled antenom nazivne frekvencije 1,5 GHz, a korišten je drobljeni kamen sedimentnog podrijetla tipa 2,1 prema klasifikaciji tehničke specifikacije [258]. U prvom dijelu istraživanja pripremljena su četiri laboratorijskih uzoraka s različitim udjelom vlage. Uzorci su ugrađeni u kalupe unutarnjih dimenzija od 170 x 250 x 250 mm, a stupanj zbijenosti uzoraka iznosio je 95%. Udio vlage varirao je između 4,0 i 8,0%. Za svaku razinu vlage na temelju podataka prikupljenih GPR-om određene su vrijednost relativne dielektrične permitivnosti (Tablica 3-16). Pri stopostotnom povećanju udjela vlage vrijednost relativne dielektrične permitivnosti porasla je za približno 61,3%.



Slika 3-23 Određivanje utjecaja stupnja zbijenosti i udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [257]: a) granulometrijski sastav materijala; b) prikaz ispitivanja

Tablica 3-16 Utjecaj udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [257]

Udio vlage (%)	4,0	5,7	7,1	8,0
Stupanj zbijenosti (%)	95,0	94,5	94,7	94,9
Relativna dielektrična permitivnost	7,5	9,0	10,8	12,1

U drugom dijelu istraživanja uzorci s približno optimalnim udjelom vlage (7,9%) ugrađeni su u kalupe unutarnjih dimenzija 100 x 300 x 300 mm. Uzorci su se međusobno razlikovali prema stupnju zbijenosti koji je varirao između 85 i 100%. Rezultati istraživanja prikazani su u tablici 3-17. Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da se povećanjem stupnja zbijenosti za približno 17,6% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti povećala za približno 19,8%.

Tablica 3-17 Utjecaj promjene stupnja zbijenosti na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [257]

Stupanj zbijenosti (%)	84,8	89,9	94,9	99,7
Udio vlage (%)	8,2	8,2	8,1	7,9
Relativna dielektrična permitivnost	10,6	10,9	11,9	12,7

Pregledom dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da GPR pokazuje značajan potencijal za praćenje promjena udjela vlage i sadržaja sitnih zrna u slojevima od zrnatog materijala, temeljem analize vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Ipak, većina dosadašnjih istraživanja bila je ograničena na laboratorijske uvjete, pri čemu su ispitivanja provedana na pojedinačnim frakcijama materijala, a ne na mješavinama koje bi odgovarale stvarnim uvjetima. Osim toga, korištena laboratorijska oprema nije prilagođena za primjenu na terenu, što ograničava mogućnost integracije ove metode u sustave održavanja kolnika. Stoga su potrebna daljnja istraživanje u stvarnim uvjetima uz korištenje adekvatne opreme kako bi se potencijal GPR-a u ovome području u potpunosti iskoristio.

4 TUBE SUCTION TEST

Ispitivanje Tube suction test (TST) je razvijeno u suradnji Finske državne uprave za ceste i prometnog instituta savezne države Teksas [259]. Svrha ovog ispitivanja je praćenje kapilarnog uzdizanja vlage u materijalu koje je posebno izraženo kod materijala s povećanim udjelom sitnih zrna. Ispitivanje se temelji na praćenju promjene vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti tijekom desetodnevnog trajanja pokusa. Za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti koristi se percometar. Percometer je uređaj koji se koristi za mjerenje relativne dielektrične permitivnosti i električne provodnosti materijala. Sastoji se od centralne jedinice i metalne sonde koja djeluje kao električni kondenzator koji mjeri električni kapacitet okolnog medija pomoću dielektrične permitivnosti [260]. Sonde mogu biti različitih dimenzija i oblika ovisno o namjeni (Slika 4-2), a frekvencija im se kreće u rasponu od 40 do 50 Hz [165,261]. Princip rada percometer-a objasnio je Saarenketo u radu [29]. Mjerenje relativne dielektrične permitivnosti se temelji na promjeni električnog kapaciteta. Električna provodnost se mjeri sustavom s dvostrukom elektrodom pomoću izmjenične struje od 1–2 kHz. Percometer mjeri otpor između dviju elektroda i izračunava specifičnu vrijednost električne provodnosti. Mjerenje je kalibrirano na standardiziranim otopinama. Određivanje relativne dielektrične permitivnosti, primjenom percometer-a, pouzdano je kada je vrijednost električne provodnosti materijala manja 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [29]. Na kolničkim konstrukcijama percometer je prvotno korišten za procjenu osjetljivosti materijala posteljice na smrzavanje, a kasnije za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti nevezanih i vezanih slojeve kolničke konstrukcije [259,260].



Slika 4-1 Percometer i različiti tipovi sonda [262]

S obzirom na izmjerenu vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, nakon desetodnevne provedbe ispitivanja, materijal možemo svrstati u tri kategorije (Tablica 4-1). U Finskoj je kao gornja granična vrijednost relativne dielektrične permitivnosti za dobru kvalitetu materijala usvojena vrijednost 9, dok je Sjedinjenim Američkim Državama odabrana vrijednost 10 [263].

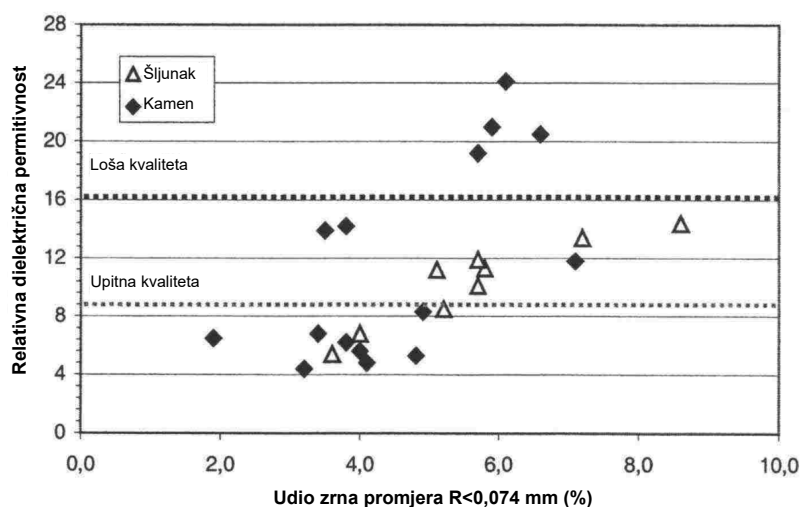
ispitivanja uzorak se izvadi iz vode, ocijedi i izvaže te se osuši u sušioniku do postizanje konstantne mase te se izračuna ukupni udio vlage u uzorku.

Saarenketo i Scullion [27,264] proveli su ispitivanje na jedanaest različitih mješavina materijala. Cilj ispitivanja bio je utvrđivanja veze između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti i električne provodnosti. Kapilarno uzdizanje vlage unutar materija autori su pratili pomoću TST-a. Rezultati istraživanja (Tablica 4-2) pokazali su da je vrijednost relativne dielektrične permitivnosti i električne provodnosti povezana s čvrstoćom i osjetljivosti na smrzavanje agregata. Niske vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti od 5,5 do 6,5 ukazuju na nisku razinu apsorbirane vode i optimalnu čvrstoću uzorka. Veće vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti ukazuju da je materijal osjetljiv na pojavu vlage, a vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti preko 9 odnosno 10 pokazatelj su prisutnosti vode u strukturi materijala. Ako je vrijednost relativne dielektrične permitivnosti veća od 16, pod dinamičkim opterećenjem može doći do pojave plastičnih deformacija u materijalu. Saarenketo i suradnici [30] proveli su ispitivanje na šljunku i drobljenom kamenom materijalu s ciljem definiranja odnosa između udjela sitnih zrna i vrijednosti relativne dielektrične

Tablica 4-2 Veza između vrste materijala i vrijednosti TST-a [27,264]

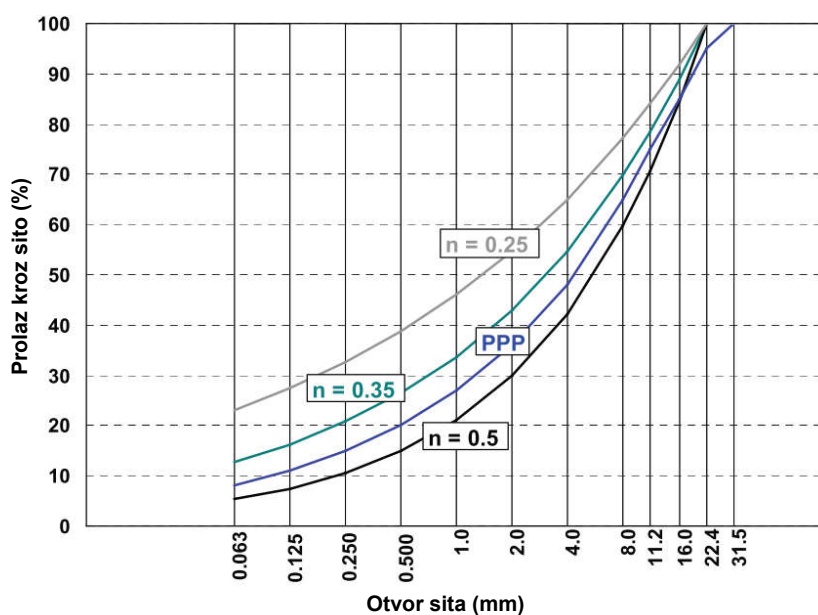
Relativna dielektrična permitivnost	Električna provodnost ($\mu\text{S/m}$)	Materijal/sloj	Čvrstoća i deformacije	Osjetljivost na smrzavanje i pojavu vlage
<5	<10	suh i slabo građirani sloj (otvorenog sastava) s velikim udjelom šupljina i niskom kapilarnošću	niske vlačne čvrstoće, materijal može biti osjetljiv na trajne deformacije prilikom zbijanja	materijal nije osjetljiv na smrzavanje i pojavu vlagu
5 – 6,5 (7)	<50	suhi sloj s niskom kapilarnosti i optimalnom suhom gustoćom	optimalna čvrstoća	materijal nije osjetljiv na smrzavanje i pojavu vlagu
6,5 (7) –9 (10)	<100	djelomično vlažan sloj s izraženom kapilarnošću	visoka posmična čvrstoća	materijal može postati osjetljiv na pojavu vlagu i smrzavanje ako sustav drenaže ne funkcionira
9 (10) - 16	<150	vlažan sloj	reducirana posmična čvrstoća	materijal osjetljiv na smrzavanje i pojavu vlage
>16	<150	mokar ili saturiran sloj	zadovoljavajuća posmična čvrstoća, nema pozitivnog pornog pritiska vode u porama pod dinamičkim opterećenjem	može doći do formiranja ledenih leća
>16	>150	mokar ili saturiran sloj	pod dinamičkim opterećenjem može doći do nastajanja plastičnih deformacija zbog visokog pornog pritiska i niske posmične čvrstoće	materijal izrazito osjetljiv na smrzavanje

permitivnosti određene u TST-u. Pripremili su uzorke s različitim udjelom sitnih zrna promjera $<0,074$ mm te su proveli TST. Rezultati (Slika 4-3) su pokazali da kada udio sitnih zrna prelazi 5%, materijal apsorbira toliko vode da vrijednost relativne dielektrične permitivnosti prelazi graničnu vrijednost za materijal dobre kvalitete. Granična vrijednost relativne dielektrične permitivnosti u slučaju kamenog materijala loše kvalitete bila je prekoračena već pri udjelu sitnih zrna manjem od 4%. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti veće od 16 dobar su pokazatelj potencijalnih problema koji se mogu pojaviti u MNS-u kao što je niska posmična čvrstoća, osjetljivost na pojavu trajnih deformacije i povećana osjetljivost na smrzavanje.



Slika 4-3 Utjecaj udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [30]

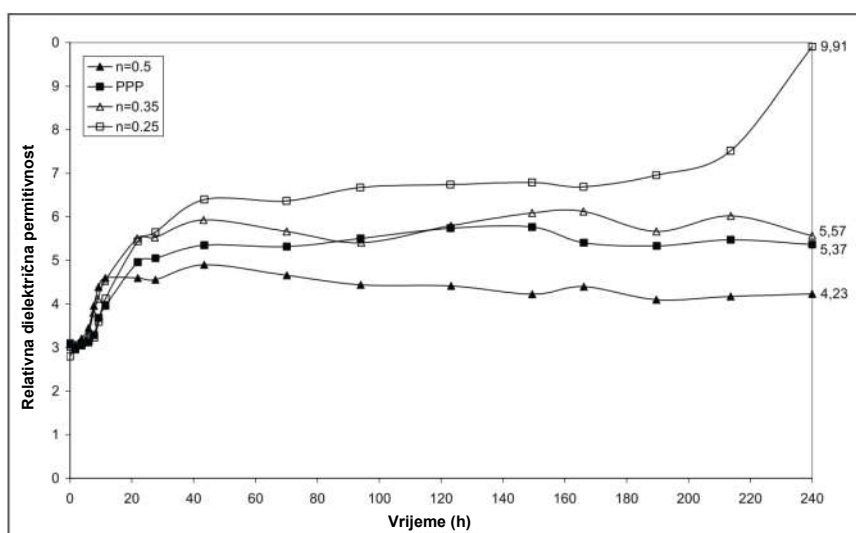
Uthus [95] je proveo istraživanje s ciljem utvrđivanja osjetljivosti materijala s različitim udjelom sitnih zrna na vlagu. Na slici 4-4 prikazan je granulometrijski sastav materijala korištenih u ispitivanju. U ispitivanju je korišten drobljeni gnajs. Krivulje označene s $n=0,25$,



Slika 4-4 Granulometrijska sastav materijala korištenih u ispitivanju [95]

$n=0,35$ i $n=0,5$ imaju veličinu zrna od 0 do 22,4 mm, a međusobno se razlikuju prema udjelu sitnih zrna. Krivulja PPP predstavlja materijal frakcije zrna 0/31,5 mm.

Rezultati TST-a pokazali su da materijal s najmanjim udjelom sitnih zrna (krivulja $n=0,5$) ima najniže vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Materijali prikazani krivuljom $n=0,35$ i PPP pokazali su ujednačenu i nisku vrijednost relativne dielektrične permitivnosti tijekom desetodnevnog perioda ispitivanja. Materijal s krivuljom $n=0,25$ pokazao je veće vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti u usporedbi sa ostalim. Posljednja tri očitavanja pokazala su trend rasta, a posljednje očitavanje iznosilo je 9,91 (Slika 4-5). S obzirom da je vrijednost relativne dielektrične permitivnosti na granici za materijal dobre kvalitete, u skladu s preporukom Barbu-a i Scullion-a [259], trebalo je nastaviti s provedbom TST dok se ne ustabile očitavanja.



Slika 4-5 Rezultati TST-a [95]

Pouzdanost TST-a istražena je u studiji [259]. Provedena su ispitivanja kako bi se procijenio utjecaj kvalitete poroznog kamena, teksture površine uzorka i vrste vode (iz javnog vodovoda i destilirana) na vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Ispitivanje je provedeno na dvije vrste materijala drobljenom kamenu i kalkarenitu. Rezultati istraživanja su pokazali da su vrijednost relativne dielektrične permitivnosti značajno niže ukoliko su pore poroznog kamena začepljene, čime se dobiva privid da je ispitni materijal kvalitetan. Vrsta vode koja se koristi nema značajan utjecaj na rezultate, ali su autori preporučili primjenu destilirane vode zbog mogućnosti da voda iz vodovoda sadrži veći udio minerala koji mogu utjecati na osmotski pritisak i pojavu osmoze. Ravna i glatka površina uzorka preduvjet su ostvarivanje dobrog kontakta između uzorka i percometer-a. Svaka nepravilnost površine može rezultirati nižim očitanjima vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Stoga su autori preporučili da ukoliko se primijeti bilo kakva nepravilnost površine od pet prikupljenih očitavanja dielektričnih vrijednosti treba zanemariti tri najniže vrijednosti i izračunati prosjek dviju najvećih.

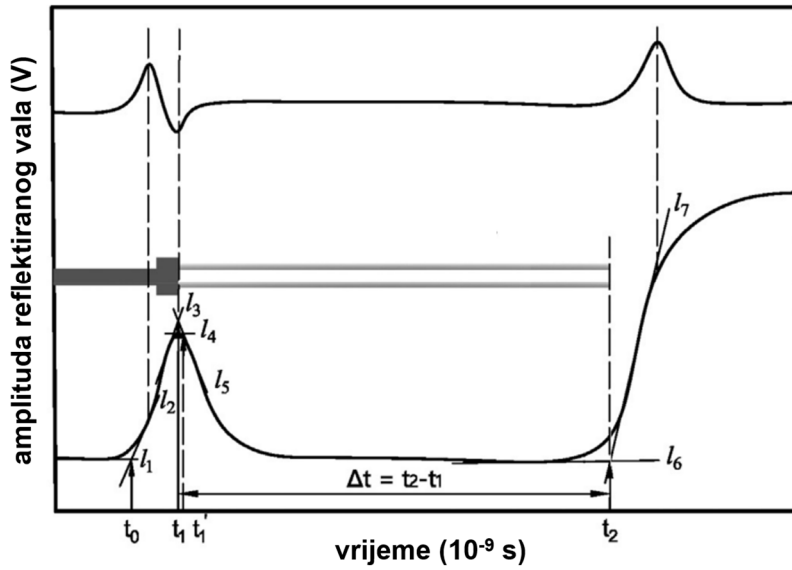
Pregledom dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da je TST pouzdana metoda za procjenu kvalitete materijala u kontekstu njihove osjetljivosti na vlagu. Unatoč pouzdanosti, metoda ima određena ograničenja, među kojima se ističe dugotrajnost postupka. Dodatno, nedostatak standardizacije kriterija za određivanje granice između dobre i prihvatljive kvalitete materijala predstavlja određeni izazov. Ta granica varira između pojedinih zemljama, što otežava uspostavu univerzalnih smjernica i usporedivost rezultata.

5 REFLEKTOMETAR U VREMENSKOJ DOMENI

Reflektometar u vremenskoj domeni (eng. time domain reflectometer- TDR) pouzdan je i jedan od najprimjenjivanijih uređaja za određivanje volumnog udjela vlage u tlu [265]. Iako je svoju primjenu pronašao u agronomiji i hidrologiji prvotno je korišten za lociranje neispravnosti električnih kabela, na primjer za određivanje lokacije uvijanja ili prekida kabela, oštećenja izolacije itd. [266]. Neispravnost kabela se određuje tako da se TDR poveže s kabelom, a zatim se generiraju EM valovi koji se širi kroz kabel. Svaka promjena homogenosti ili prisutnost oštećenja uzrokuje refleksiju dijela EM valova natrag prema TDR-u. Temeljem izmjerenog vremena koje je potrebno da se reflektirani EM valovi vrate do TDR-a i njihove amplitude moguće je s centimetarskom točnošću odrediti lokaciju oštećenja. Iz navedenog se može zaključiti da je princip rada TDR sličan radaru te se identično kao i GPR bazira na mjerenju vremena i određivanju brzine širenja EM vala kroz materijal. U prethodnim poglavljima spomenuto je da prilikom širenja EM vala kroz određeni materijal, njegova brzina prvenstveno ovisi o vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti tla koja se mijenja ponajviše u ovisnosti o promjeni udjela vlage. Temeljem brzine širenja EM vala kroz materijal izračunava se relativna dielektrična permitivnost materijala. TDR se sastoji od kontrolne jedinice koja generira EM valove, a dodatno može služiti za prikaz i pohranu rezultata te sonde koje odašalje EM valove u materijal (Slika 5-1). TDR određuje vrijednost relativne dielektrične permitivnosti mjerenjem vremena širenja EM valova. EM valovi se šire od upravljačke jedinice koaksijalnim kabelom do sonde koja ima određen broj šipki. Dio EM vala reflektira se na početku sonde zbog razlike u električnom otporu između kabela i sonde. Ostatak EM valova se širi kroz šipke dok ne dođe do njenog kraja te se reflektira. Na slici 5-2 shematski je prikazana refleksija EM vala prilikom primjene TDR-a. S t_0 označeno je vrijeme u kojem EM val prelazi iz koaksijalnog kabela u TDR sondu. Prvi vrh refleksije označen je s t_1 , a do njega dolazi na početku šipke TDR-a.



Slika 5-1 Prikaz sastavnih komponenti TDR-a



Slika 5-2 Shematski prikaz refleksije EM vala kod TDR-a [267]

S t_2 označena je druga refleksija od kraja šipke sonde. Nužno je odrediti vrijednosti t_1 i t_2 kako bi se odredilo vrijeme puta reflektiranog vala t i na kraju izračunala vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Vrijeme povratnog puta vala od početka do kraja šipke sonde može se izmjeriti osciloskopom, a određeno je jednačbom:

$$t = \frac{2 \cdot L \cdot \epsilon_r^{0,5}}{c} \quad (5.1)$$

gdje su: t vrijeme trajanja puta reflektiranog vala (s); L duljina šipke sonde TDR-a (m); ϵ_r relativna dielektrična permitivnost; c brzina EM vala u vakuumu (m/s). Iz prethodne formule vrijednost relativne dielektrične permitivnosti se određuje jednačbom:

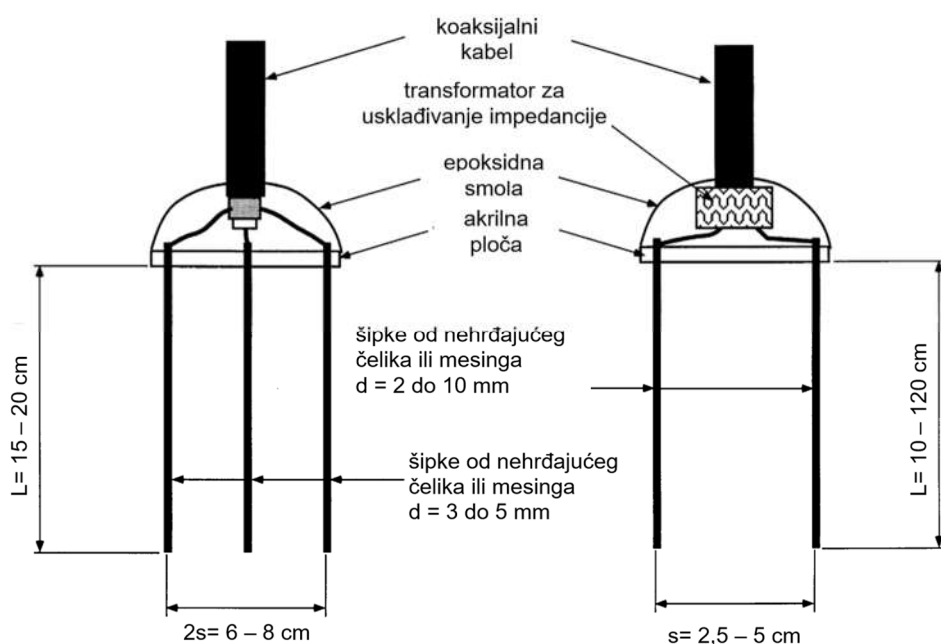
$$\epsilon_r = \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot L} \right)^2 \quad (5.2)$$

Vremenska razlika između dvije točke infleksije daje vrijeme putovanja EM vala u sondi. U praksi se udaljenost između ove dvije točke temelji na sjecištu tangenčnih linija te je moguće primijeniti različite metode: metodu tangenti i metodu najvećih vrijednosti. Usporedba ove dvije metode prikazana je u radu Hore-Lacy-a i suradnika [268]. Davis i Chudobiak [269] su 1975. godine razvili metodu za određivanje udjela vlage u tlu primjenom TDR-a. Ubrzo je TDR zamijenio do tad uobičajeno korištene metode koje su se bazirale na primjeni radioaktivnih materijala, metodu rasipanja neutrona i metoda slabljenja gama zraka [270]. Prethodno spomenute metode predstavljale su potencijalnu prijetnju za sigurnost okoliša i zdravlje ljudi. Topp i suradnici [271] prvi su, 1980. godine, predstavili empirijski model za određivanje volumnog udjela vlage temeljem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti izmjerene pomoću TDR-a. Udio vlage može se odrediti prema jednačbi:

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_r - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_r^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_r^3 \quad (5.3)$$

gdje su: θ_v volumni udio vode u tlu ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$). Ovaj model vrijedi za homogena nesaturirana tla. Nadalje, autori su zaključili da vrijednost relativne dielektrične permitivnosti tla nije značajno osjetljiva na promjenu temperature ($10\text{--}36\text{ }^\circ\text{C}$), sastav tla (od gline do pjeskovite ilovače), nasipnu gustoću tla ($1,14\text{--}1,44 \text{ mg m}^{-3}$) i sadržaj topljivih soli. Točnost ovog modela vrlo je visoka i iznosi 98,7%, a uz dodatnu kalibraciju moguće je postići točnost od 99%. Općenito, postupak kalibracije je ključan za precizno određivanje udjela vlage na temelju određene vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti [272]. Kalibracija podrazumijeva primjenu standardnih kalibracijskih krivulja koje su razvijene na temelju rezultata ispitivanja u kontroliranim laboratorijskim uvjetima. Nedostatak ovih krivulja je što ne obuhvaćaju varijacije specifične za pojedinu lokaciju. Zbog toga se dodatno provode kalibracije specifične za pojedinu lokaciju [273]. Ovo uključuje stvaranje kalibracijskih modela na temelju istraživanja provedenih na terenu, uzimajući u obzir jedinstvena svojstva i uvjete tla na određenim lokacijama čime se povećava točnost. Primjena empirijskog modela Topp-a i suradnika [271], ograničena je na tla u kojima ne dolazi do smrzavanja i tla s materijalima male specifične površine. Wagner i Scheurmann [274] osporili su model Toppa i suradnika [271] jer je njihovo istraživanje pokazalo da je vrijednost relativne dielektrične permitivnosti ovisna o promjeni temperature, sastav tla, nasipnoj gustoći te sadržaju soli. U narednim desetljećima razvijeni su brojni empirijski, teorijsko-empirijski i fizikalni modeli, njih ukupno 157 [275]. Stoga je potrebno odabrati odgovarajući model kako bi se osigurala zadovoljavajuća točnost određivanja udjela vlage. Sveobuhvatni pregled spomenutih modela napravili su He i suradnici [275,276] te Abdulraheem i suradnici [277]. Prema Skierucha-i [278] pogreška u određivanju volumnog udjela vlage TDR metodom proizlazi iz nesavršenosti korelacije između izravno izmjenjenih vrijednosti i stvarne vrijednosti vlažnosti tla kao i zbog nesavršenosti mjerne opreme, sonde te računalnih programa. Na temelju laboratorijskih mjerenja provedenih na mineralnim i organskim tlima te mješavinama ova dva tla, Skierucha je potvrdio da nasipna gustoće tla značajno utječe na volumne udjele vlage određene TDR-om. Uključivanje nasipne gustoće tla u formulu za kalibraciju TDR-a smanjuje apsolutnu pogrešku vlažnosti tla utvrđene TDR-om za faktor dva. Fatás i suradnici [279] izradili su računalni program koji je kompatibilan s TDR-ovima različitih proizvođača, a omogućuje točniju procjenu udjela vlage u tlu i ukupne električne vodljivosti pomoću različitih metoda analiza prikupljenih podataka. Danas je na tržištu dostupan veliki broj komercijalnih TDR-a i pripadajućih sonde. Sonde se u konstruktivnom smislu međusobno razlikuju po broju šipki te prema njihovoj duljini, promjeru, međusobnom razmaku i materijalu od kojega su šipke proizvedene. Najzastupljenije su sonde s dvije ili tri paralelne šipke (Slika 5-3), iako je u literaturi moguće pronaći primjeri sonde sa

samo jednom ili sa čak sedam šipki [280]. Duljine šipki variraju od 2,1 [281] do 480 cm [277]. Promjeri šipki uobičajeno iznosi 3 mm, ali raspon varira od 1,3 [282] do 37 mm [277]. Međusoban razmak između šipki kreće se u rasponu od 8 do 57 mm. U prošlosti su se šipke izrađivale od mesinga, a u posljednje vrijeme se za njihovu izradu koristi isključivo nehrđajući čelik. Po potrebi se na šipke može nanijeti dielektrični premaz koje se sastoji od tankih slojeva prozirnih dielektričnih materijala. Funkcija premaza je modificiranje reflektivnih svojstava površine osnovnog materijala. Šipke s dielektričnim premazom koriste se u materijalima koji imaju visoku električnu provodnost [270].



Slika 5-3 Usporedni shematski prikaz sonde TDR-a [270]: a) s tri šipke; b) s dvije šipke

Whalley [283] je usporedbom rezultata prikupljenih sa sondama s dvije i tri šipke došao do zaključaka da se sa sondama s dvije šipke može odrediti udio vode unutar većeg volumenu tla. Međutim, sonde sa šipkama malog promjera ili usko postavljenim šipkama mogu rezultirati neželjenim pogreškama u mjerenjima. He i suradnici otkrili su da kratke šipke [284,285] (npr. <10 cm) mogu utjecati na točnost određivanja udjela vlage u tlu. Whalley [283], je dao preporuku da ukoliko je potrebno primijeniti kraće šipke da se odaberu sonde s tri šipke jer mogu generirati mnogo jasniji signal koji se u postupku obrade lakše interpretira.

Sonde se mogu postaviti na dva načina, direktnim zabijanjem šipki u materijal ili postavljanjem šipki u prethodno izbušene rupe. Kod postavljanja šipki u prethodno izbušene rupe može se dogoditi da se ne ostvari potpuni kontakt između šipke i okolnog tla. Brojni autori su istraživali utjecaj postavljanja sonde na rezultate mjerenja. Annan [286] je zaključio da sloj zraka između šipki i okolnog tla može dovesti do ozbiljnih odstupanja prilikom određivanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Rezultati istraživanja Topp-a i suradnika [287] pokazuju

slične vrijednosti volumnog udjela vode bez obzira jesu li šipke zabodene direktno u tlo ili postavljene u prethodno izbušene rupe. Temeljem toga može se zaključiti da nema bitnijeg utjecaja načina postavljanja sonde na određivanje udjela vode. Za razliku od njih Rothe i suradnici [288] izvijestili su da ukoliko se šipke postave u prethodno izbušene rupe vrijednosti volumnog udjela vlage bit će veće u usporedbi s vrijednostima određenim na temelju podataka dobivenih sondama koje su direktno zabodene u tlo. Nadalje, autori su uočili od 5 do 20% veću nasipnu gustoću tla u područjima oko šipki postavljenih direktnim umetanjem u tlo te su zaključili da je to uzrok nižih udjela vlage. Hokett i suradnici [289] su istaknuli važnost medija koji se nalazi između šipki i tla. Eksperimentalnim putem su dokazali u slučaju da se između šipki i tla nalazi zrak, ako je tlo suho, utjecaj medija na određenu vrijednost volumnog udjela vlage je neznatan. Najznačajnije odstupanje su postigli u slučaju vlažnih tala, kod kojih se između šipki i tla nalaze zrak. U takvom scenariju primijetili su da je određeni udio vlage odstupao od stvarne vrijednosti za približno 46%. Također, opazili su ukoliko je medij između šipki i tla bila voda bez obzira radi li se o suhom ili vlažnom tlu nisu uočena značajnija odstupanja određenog udjela vlage. Whalley [283] je konstatirao da su sonde s dvije odnosno tri šipke gotovo podjednako osjetljive na postojanje zračnog sloja između sonde i tla. Na temelju rezultata istraživanja Knight i suradnici [290] došli su do zaključka da postojanje tankog sloja zraka između šipki sonde i tla ima značajniji utjecaj na rezultate prikupljene sondom s tri šipke u usporedbi sa sondama s dvije šipke.

Uz već spomenuto detektiranje neispravnosti kabela i određivanje udjela vlage u tlu TDR je moguće primijeniti za: praćenje brzine otapanja snijega kao i određivanje gustoće snijega [291], određivanje udjela vlage u pojedinim građevinskim materijalima [292–294], određivanje udjela vlage u deblima stabala [295] i tako dalje.

TDR se za određivanje udjela vlage u homogenim sitnozrnatim materijalima sustavno primjenjuje već desetljećima. Međutim, njegova upotreba u nevezanim kamenim materijalima poput onih koji se koriste za izradu MNS-a nije značajnije dokumentirana. Baran [296] je 1994. godine dokazao da model Topp-a i suradnika [271] vrijedi za sloj izrađen od drobljenog kamena ukoliko nije zbijen u potpunosti, tj. kada je gustoća sloja približno $1,5 \text{ g/cm}^3$. U slučaju dobre zbijenosti sloja, odnosno kada je gustoća sloja veća od ili je jednaka $2,0 \text{ g/cm}^3$ spomenuti model ne vrijedi. Model Topp-a i suradnika pružio je pouzdane rezultate i u slučaju gline čija suha gustoća iznosi $1,85 \text{ g/cm}^3$. Baran je razvio koeficijente koji su omogućili određivanje udjela vlage u dobro zbijenom sloju izrađenom od nevezanog materijala. Jiang i Tayabji [297] također su odredili različite koeficijente ovisno o veličini zrna materijala. Osim njih, Ekblad [298] je kalibrirao empirijski model temeljen na eksperimentalnim rezultatima za dva različita

krupnozrnata materijala. Svi prethodno spomenuti modeli polinom su trećeg stupnja određen jednadžbom:

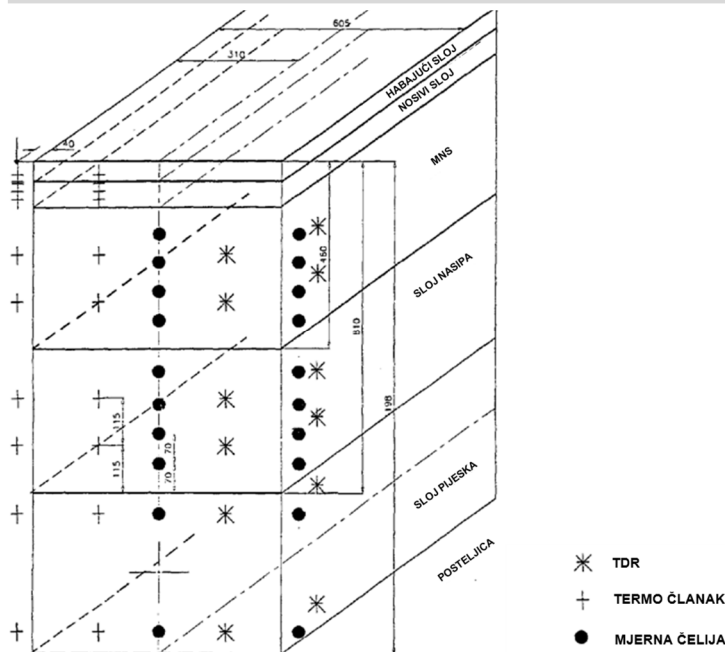
$$\theta = a_0 + a_1 \cdot e + a_2 \cdot e^2 + a_3 \cdot e^3 \quad (5.4)$$

te se međusobno razlikuju prema koeficijentima a_n (Tablica 5-1).

Tablica 5-1 Usporedba modela za određivanje udjela vlage na temelju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti [268]

Autori	a_0	a_1	a_2	a_3
Topp i suradnici	-0,05300	0,0292	-5,500	4,30
Baran	-0,06220	0,0238	-6,000	6,00
Jiang i Tayabji (krupnozrnati materijal)	-0,05790	0,0342	-13,120	23,10
Jiang i Tayabji (sitnozrnati materijal)	0,00476	0,0276	-6,167	4,76
Jiang i Tayabji (mješavina materijala)	-0,00812	0,0239	-4,427	2,92
Ekblad	-0,05860	0,0250	-6,050	5,73

Pooh [299] je u svom radu prezentirao mogućnosti primjene TDR-a za određivanje udjela vlage u nevezanim materijalima kolničke konstrukcije i posteljice. TDR je korišten za mjerenje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, mjerne ćelije za mjerenje električne provodnosti, a termočlanak za praćenje promjene temperature. Ispitivanja su provedena u laboratoriju i na terenu. Na dvije lokacije izbušena je kolnička konstrukcija do razine posteljice te je umetnuta sonda TDR-a i ostala mjerna oprema u nevezane mehanički zbijene slojeve kolničke konstrukcije i posteljicu (Slika 5-4). Materijal uzorkovan na terenu iskorišten je za izradu laboratorijskih uzoraka. Laboratorijski uzorci ugrađeni su u vodonepropusne kalupe dimenzija 450 x 450 x 450 mm. Prije ugradnje u kalup materijal se prirodnim putem sušio tri dana. Svaki pojedini uzorak zbijen je u tri sloja pojedinačne debljine 100 mm. Dvije TDR sonde i dvije mjerne ćelije postavljene su u sredinu drugog sloja. Jedna TDR sonda i jedna mjerna ćelija ugrađene su u horizontalnom položaju, dok su preostale sonde ugrađene u vertikalnom položaju. Različitim načinima ugradnje istražio se utjecaja položaja sonde na vrijednosti prikupljenih podataka. Prije početka ispitivanja sva mjerna oprema je kalibrirana. Za verifikaciju očitavanja TDR-a i električne provodnosti, udio vlage pojedinog uzorka određen je u laboratoriju korištenjem gravimetrijske metode. Gravimetrijska metoda predstavlja određivanje masenog udjela vlage u uzorku. Metoda se sastoji u određivanju mase vlažnog i suhog uzorka te izračunavanju masenog udjela vlage u uzorku. Sva laboratorijska ispitivanja provedena su u komori s kontroliranom temperaturom. Temperatura i udio vlage u uzorcima su varirani. Udio vlage koji je dodan uzorcima ovisio je u vrsti materijala od kojeg su izrađeni i početnoj masi uzorka. Udjeli dodane vlage povećavani su s korakom: 5% za glinu, 3% za pijesak i kamenu prašinu te 1% za drobljeni kamen. Udio vlage se povećavao svakih 48 sati, sve dok nije premašio optimalni udio vlage. Nakon toga temperatura se podešavala na novu



Slika 5-4 Shematski prikaz položaja ugrađenih senzora u kolničkoj konstrukciji [299]

postavku i cijeli proces bi se ponavljao. Temperatura je povećavana po 5 °C počevši od 0 pa do 30 °C. Analizom terenskih i laboratorijskih rezultata autori su zaključili da temperatura nema značajan utjecaj na očitavanja TDR-a, osim u slučajevima kada temperatura padne ispod 0 °C. S druge strane, temperaturne varijacije nepovoljno su utjecale na određivanje električne provodnosti. Generalno, TDR se pokazao pouzdanijim i točnijim od mjerne ćelije kada su udjeli vlage uspoređeni s onima dobivenim gravimetrijskom metodom. Položaj TDR sonde imao je utjecaj na mjerenja udjela vlage, posebno u gornjem dijelu uzorka. Sonde postavljene u horizontalnom položaju obično daju niže vrijednosti relativnih dielektričnih permitivnosti u usporedbi s onima vertikalno postavljenima. Razlog tome je što se EM val koji generira TDR mora prenijeti kroz vertikalno postavljenu sondu preko sloja debljine približno 50 mm, koji može obuhvatiti nekoliko ravnina s različitim razinama sadržaja vlage. Što se tiče horizontalno postavljenih sonde, EM valovi se prenose preko samo jedne ravnine, umjesto sloja. Udio vlage unutar jedne horizontalne ravnine može se smatrati homogenim. Autori ističu da je u svim dosad razmatranim slučajevima gradijent vlage bio vidljiv samo kada su sonde ili mjerne ćelije bile postavljene u vertikalnom položaju. Stoga su preporučili horizontalno postavljanje sonde za što točnije mjerenje udjela vlage na određenoj dubini. Rezultati eksperimenata koji su provedeni kako bi se definirao učinak različitih duljina koaksijalnih kabela na očitavanja TDR-a pokazali su da je optimalna duljina kabela 1,0 m. Stoga, ako se koriste duži kabele treba primijeniti odgovarajuće korekcijske faktore.

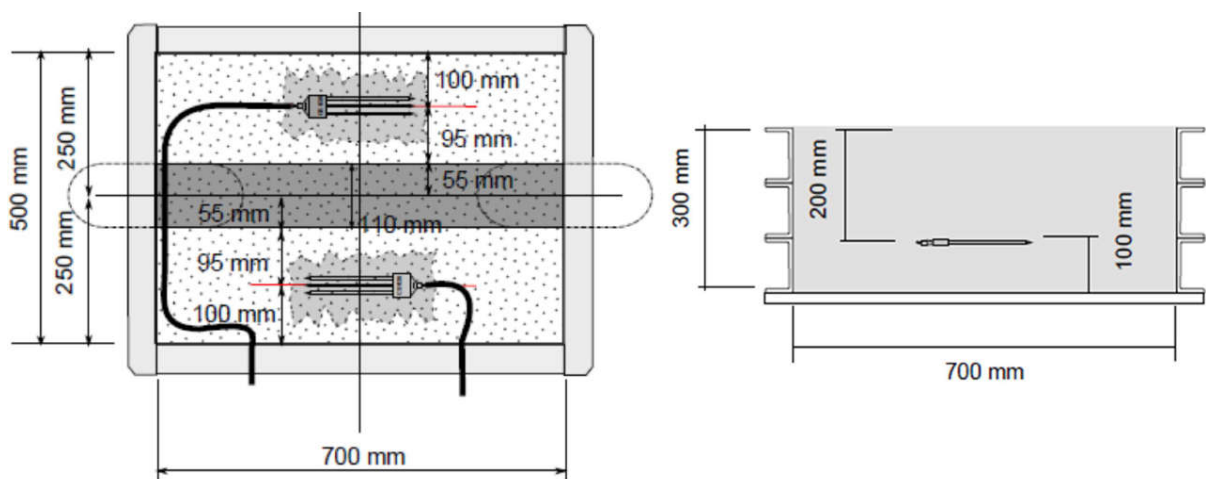
Hore-Lacy i suradnici [268] istražili su mogućnost primjene TDR-a u drobljenom kamenom materijalu metamorfnog podrijetla. U istraživanju su korištene četiri vrste drobljenog kamena.

Uzorci visine 300 mm ugrađeni su u šest horizontalnih slojeva debljine 50 mm u kalup unutarnjih dimenzija 700 x 500 mm (Slika 5-5). TDR sonde su ugrađene između drugog i trećeg sloja. Istraživanje je imalo tri glavna cilja: definiranje procesa kalibracije, određivanje veze između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene TDR-om s izmjerenim udjelom vlage u pojedinom materijalu te mogućnost primjene TDR-a za praćenje sušenja uzorka. Prije provedbe glavnih laboratorijskih istraživanja autori su usporedili dvije metode interpretacije podataka prikupljenih TDR-om, metodu tangenti i metodu najviših vrijednosti. Obje metode dale su slične rezultate, tj. razlikovale su se između 5 i 6%. Međutim, pri nižim udjelima vlage metoda najviših vrijednosti pokazala se pouzdanijom pa je ona odabrana za nastavak istraživanja. Kalibracija TDR sonde provedena je uranjanjem u vodu temperature 21 °C, a vrijednost relativne dielektrične permitivnosti izračunata je prema jednadžbi:

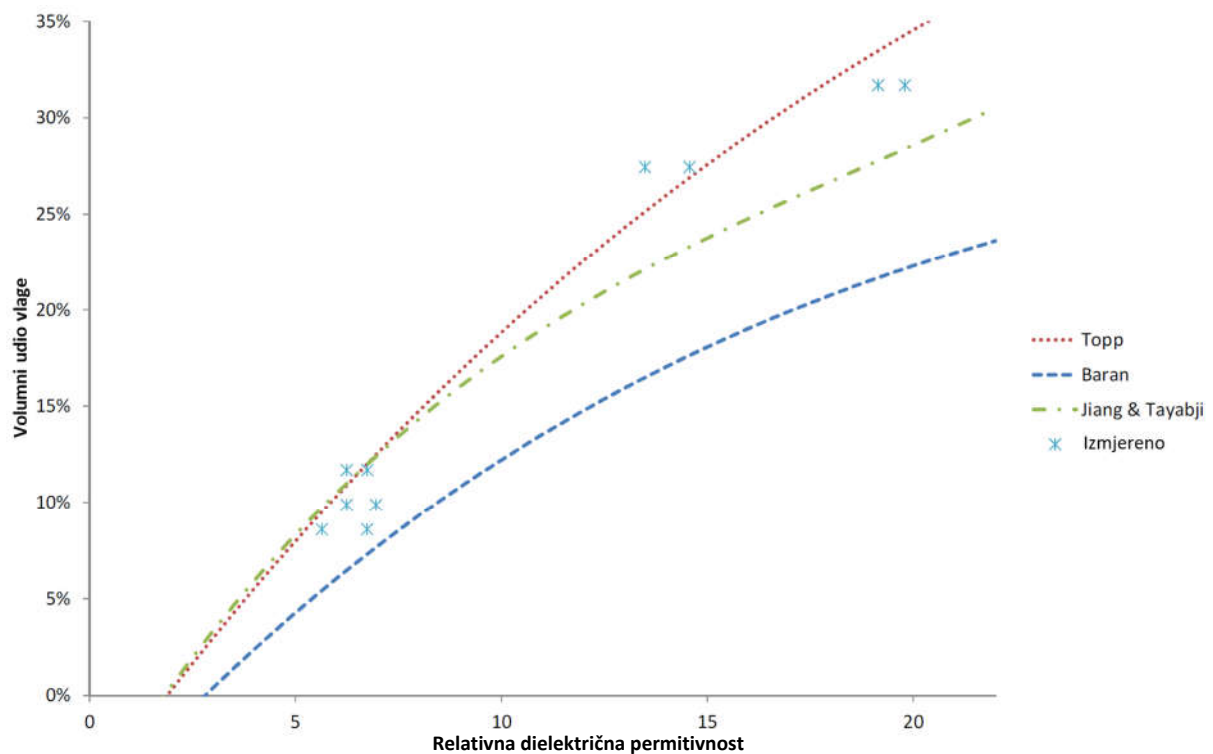
$$\epsilon_w = 88,045 - 0,0147 \cdot T + 6,295 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1,075 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (5.5)$$

gdje su: ϵ_w relativna dielektrična permitivnost vode; T temperatura vode.

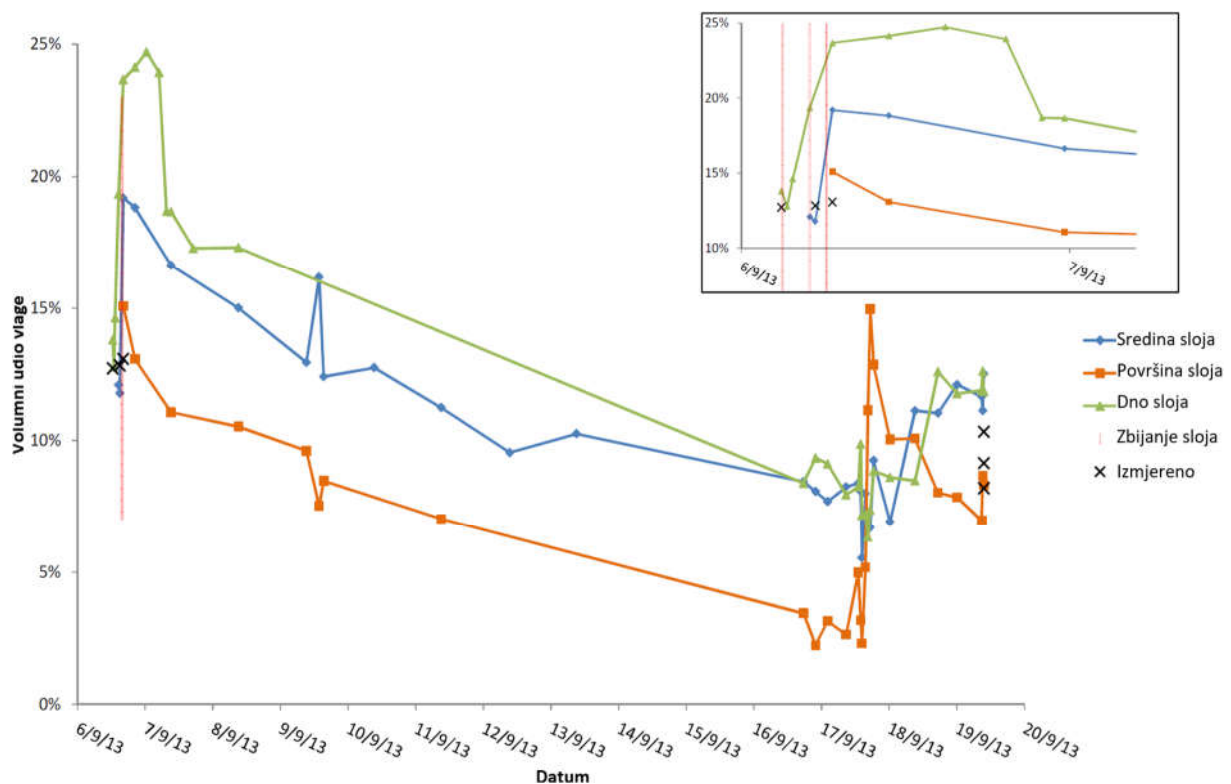
Uzorci su izrađeni od tri vrste materijala te su imali različite udjele vlage. Autori su rezultate usporedili s postojećim modelima te su zaključili da je odnos između izmjerene vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti i volumnog udjela vlage u uzorku u skladu s modelima Topp-a i suradnika te Jiang-a i Tayabji-a (Slika 5-6). Uzorci koji su se koristili za praćenje procesa sušenja bili su opremljeni s ukupno devet TDR sondi. Proces sušenja trajao je deset dana, a nakon toga je dodana voda u uzorak te je proces sušenja praćen još tri dana. Na slici 5-7 prikazana je promjena udjela vlage u uzorku. Vidljivo je da je već tijekom ugradnje uzorka došlo do koncentracije vlage u donjoj zoni uzorka, tj. udio vlage se smanjio u gornjem i srednjem dijelu uzorka, a povećao se na dnu. Nadalje, dodavanje vode nakon deset dana zabilježeno je u svim slojevima uzorka. U gornjem dijelu uzorka udio vode se naglo povećao pa zatim smanjivao dok je u ostalim slojevima povećanje udjela bilo postepeno.



Slika 5-5 Shematski prikaz kalupa i položaja sonde: a) tlocrt; b) uzdužni presjek [268]



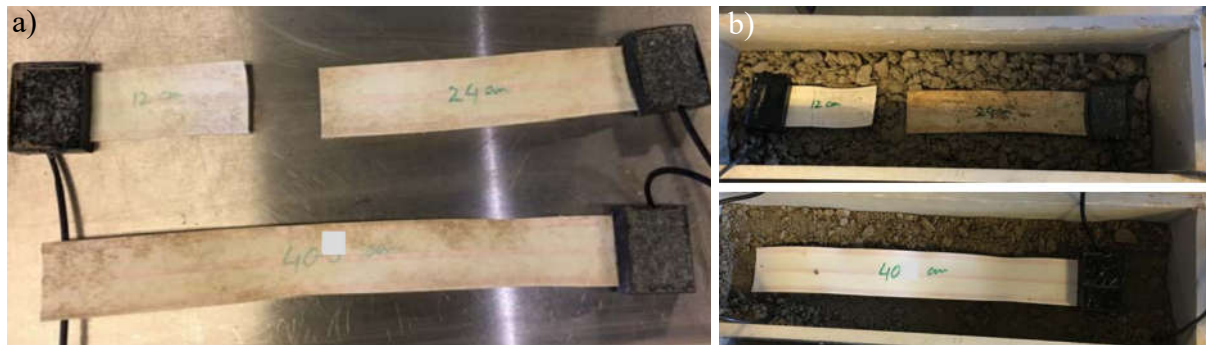
Slika 5-6 Usporedba rezultata istraživanja s postojećim modelima [268]



Slika 5-7 Praćenje procese sušenja TDR-om [268]

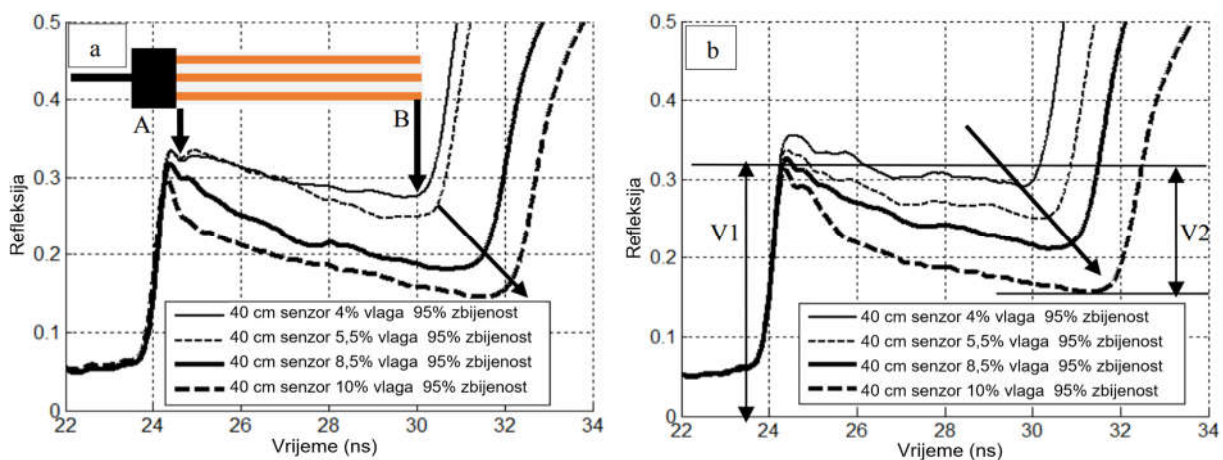
Bhuyan i suradnici [300] ispitali su mogućnost određivanja gustoće materijala te udjela vlage korištenjem sonde s ravnim trakastim kabelom umjesto šipki. Ispitivanje su proveli na drobljenom kamenom materijalu koji se prema tehničkoj specifikaciji [301] svrstava u razred C. Uzorci su ugrađeni u kalup izrađen od PVC-a čija je debljine stijenke iznosila 14 mm.

Unutarnje dimenzije kalupa bile su 557 x 159 x 155 mm. Korištene su tri sonde s ravnim trakastim kabelom duljine 120, 240 i 400 mm (Slika 5-8). Materijal je ugrađen i zbijen u tri horizontalna sloja na način da je prvo ugrađen i zbijen sloj debljine 50 mm. Na njega su postavljeni senzori duljine 120 i 240 mm koji su prekriveni materijalom drugog sloja. Na drugi sloj postavljena je sonda duljine 400 mm koja prekrivena slojem debljine 50 mm. Ispitivanje je

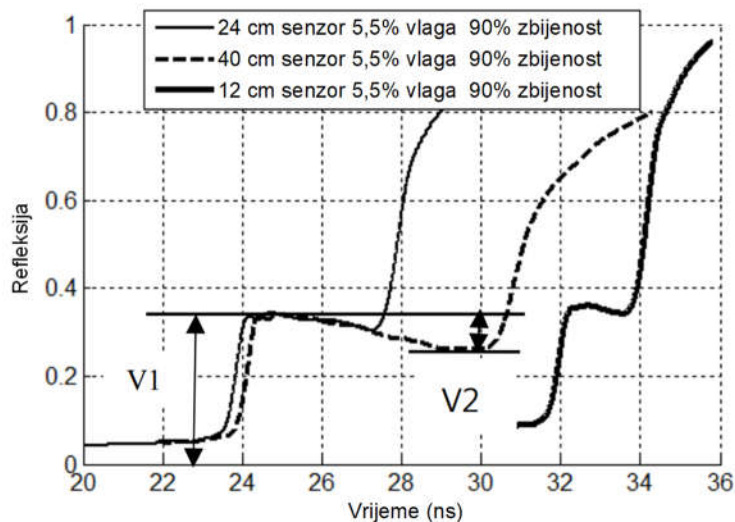


Slika 5-8 Postavke ispitivanja [300]: a) sonde; b) priprema uzoraka

provedeno na dvije skupine uzoraka. U prvoj skupini udio vlage uzoraka varirao je od 4 do 10%, a gustoće uzorka bile su ujednačene. Druga skupina obuhvaćala je uzorke s konstantnim volumnim udjelom vlage dok je gustoća uzoraka, u usporedbi s najvećom suhom gustoćom koja je određena Proctorovim pokusom, varirala u rasponu od 80 do 100%. Vrijednosti prikupljene TDR-om sa sondom s ravnim trakastim kabelom duljine 400 mm prikazane su na slici 5-9. Također, autori su istražili utjecaj duljine ravnog trakastog kabela na izmjerene vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti (Slika 5-10). Temeljem analize rezultata laboratorijskih ispitivanja zaključeno je da primjena sonde s ravnim trakastim kabelom omogućava određivanje reprezentativne prosječne vrijednosti duž uzorka. U prikazanom radu provedeni su laboratorijski pokusi za razvoj kalibracijske funkcije za izračun prosječne vrijednosti gustoće duž senzora. Ukupna promjena napona duž senzora značajno se mijenja ne



Slika 5-9 Rezultati istraživanja TDR-om [300]: a) uzorci s promjenjivim udjelom vlage; b) uzorci s promjenjivim stupnjem zbijenosti



Slika 5-10 Utjecaj duljine ravnog trakastog kabla na rezultate mjerenja [300]

samo zbog promjene svojstava materijala kao što su vlaga i gustoća, već i s promjenom duljine sonde. Iz tog razloga, prema autorima, duljina sonde mora biti uključena u funkciju kalibracije. Autori su razvili kalibracijsku funkciju sljedećeg oblika:

$$\rho_b = \frac{\frac{V_2}{V_1} \cdot \rho_w}{0,0478 \cdot \varepsilon \cdot L - 0,0394} \quad (5.6)$$

gdje su: ρ_b gustoća materijala (kg/m^3); V_2/V_1 omjer napona; ρ_w gustoća vode; ε vrijednost relativne dielektrične permitivnosti sloja; L duljina ravnog trakastog kabla. Funkcija kalibracije testirana je nizom mjerenja koja su pokazala zadovoljavajuće slaganje između izračunate i izmjerene gustoće uzorka. Daljnjim istraživanjima Bhuyan i suradnici [12,302–304] nastavili su ispitivati i unaprjeđivati sonde s ravnim trakastim kabelom (Slika 5-11). Na temelju preliminarnih rezultata [304] terenskih istraživanja zaključili su da vrijednosti udjela vlage materijala dobro koreliraju s postojećim modelima, prvenstveno Baran-ovim [296] te Ekblad-a i Isacson-a [305]. Međutim, rezultati izračunatih podataka o gustoći na temelju TDR-a s zmjerenim podacima korištenjem nuklearnog mjerača pokazuje dobre, ali još uvijek ne



Slika 5-11 Postupak instalacije TDR-a sa sondama s ravnim trakastim kabelom [303]

i potpuno zadovoljavajuće rezultate nove metode. Analizom rezultata dodatnih terenskih istraživanja [12] a proizašao je kalibracijski model za određivanje gustoće:

$$\rho_b = \frac{EC_b \cdot \rho_w}{0,0002 \cdot \varepsilon - 0,0002} \quad (5.7)$$

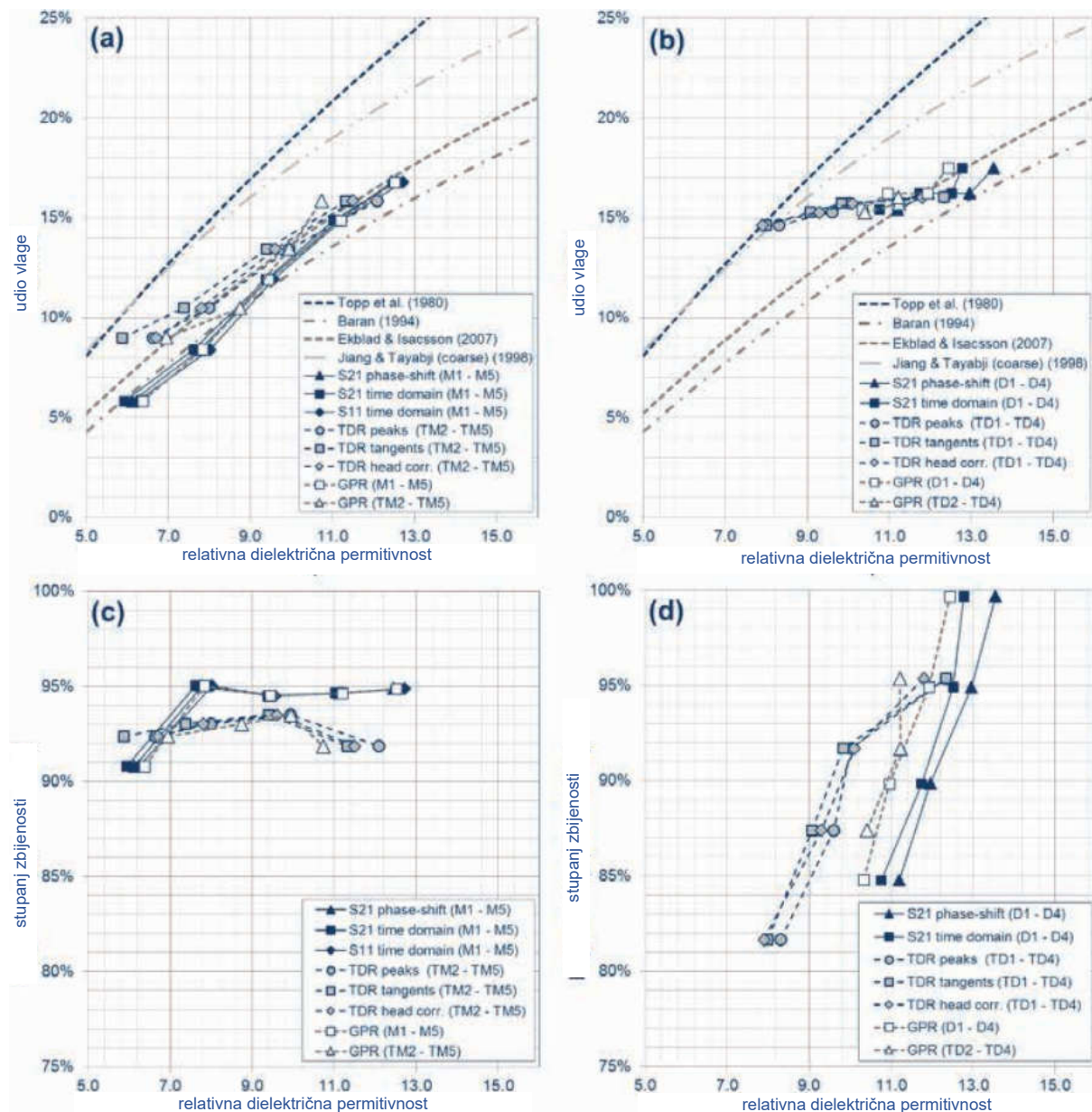
gdje je: EC_b električna provodnost materijala (S/m).

Muller i suradnici [257], [10] usporedili su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene na temelju podataka prikupljenih GPR-om s vrijednostima određenim TDR-om. Ispitivanje su proveli na drobljenom kamenom materijalu čiji je granulometrijski sastav prikazan na Slici 3-23. Kalup za ispitivanje bio je istovjetan onom kojeg su koristili Bhuyan i suradnici. Materijal je zbijen unutar kalupa u tri horizontalna sloja. Debljina gornjeg i donjeg sloja bila je približno 45 mm dok je debljina središnjeg sloja iznosila 60 mm. Ukupna debljina uzorka varirala je između 150 i 153 mm. Korištena je TDR sonda s tri šipke koje su bile na međusobnom razmaku od 45 mm (Slika 5-12). Duljina šipki bila je 300 mm, a promjer 4,8 mm. Sonda je postavljena u horizontalnom položaju na granici između gornjeg i središnjeg sloja uzorka (Slika 5-12). Korišteni GPR bio je ručni model s ground-coupled antenom nazivne frekvencije 1,5 GHz. Pripremljeni su uzorci za ispitivanje GPR-om (oznaka M i D) te uzorci za ispitivanje TDR-om (oznaka TM i TD). U prvom dijelu eksperimenta, uzorci M1–M5 imali su različite udjele vlage 2,7, 4,0, 5,3, 6,6 i 7,9% dok je stupanj zbijenosti bio konstantan i iznosio je 95% u usporedni s prethodno ispitanom najvećom suhom gustoćom. Uzorak TM1 koji je trebao imati 2,7% udjela vlage nije napravljen zbog bojazni autora da PVC kalup neće izdržati pojačanu energiju zbijanja kojom bi se relativno suhi uzorak zbio na ciljani stupanj zbijenosti. U drugom dijelu eksperimenta, gravimetrijski udjel vlage u svim uzorcima bio je identičan, a iznosio je 7,9%. Uzorci D1-D4 te TD1–TD4 razlikovali su se prema stupnju zbijenosti koji je varirao od 85 do 100%, uz korak od 5%. Podaci prikupljeni TDR-om analizirani su korištenjem prilagođene Matlab skripte kako bi se izračunalo povratno vrijeme EM vala iz kojeg se naknadno izračunava brzina EM vala i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Autori su primijetili da se metodom tangenti dobivaju niže vrijednosti relativne



Slika 5-12 Položaj TDR sonde unutar kalupa [257]

dielektrične permitivnosti u usporedbi s metodom najviših vrijednosti. U usporedbi s vrijednostima prikupljenim GPR-om, obje metode su polučile niže vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti kada su u pitanju suhi uzorci ili uzorci s nižim stupnjem zbijenosti. Do odstupanja je dolazilo jer se kod interpretacije reflektiranog EM vala ne uzima u obzir vrijeme putovanja unutar glave sonde. Dodatnim istraživanjima, autori su odredili korekcija vremena putovanja reflektiranog EM vala koja je iznosila -0,90 ns. Rezultati istraživanja prikazani su na slici 5-13.



Slika 5-13 Prikaz rezultata istraživanja Muller i suradnika [257]

Zaključno, uz ispravan odabir tipa sonde i načina njene ugradnje te korištenje adekvatnog modela moguće je precizno odrediti volumetrijski udio vlage u zrnatom materijalu temeljem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene TDR-om.

6 PRETHODNA LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Prethodna laboratorijska ispitivanja obuhvaćala su određivanje geometrijskih karakteristika te fizikalno-mehaničkih i kemijskih svojstava kamenog materijala, dodanog materijala i mješavina kamenog i dodanog materijala. Ispitivanja su provedena kako bi se korišteni materijali klasificirali, provjerila njihova konzistentnost s međunarodnim normama, nacionalnim standardima i općim tehničkim uvjetima za radove na cestama, procijenila svojstva materijala koja imaju utjecaj na provedbu prikupljanja podataka GPR-a te osigurala ponovljivost rezultata i mogućnost usporedbe rezultata s rezultatima drugih istraživanja.

6.1 Drobljeni kameni materijal

Kameni materijal korišten prilikom ispitivanja je dolomit iz kamenoloma Gorjak (Slika 6-1) smještenog u blizini mjesta Gornje Jesenje u Krapinsko-zagorskoj županiji. Čisti dolomit sastoji se pretežno od minerala dolomita koji su izgrađeni od kalcij-magnezijeva karbonata $\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$ u kristalnom stanju [306]. Stijenska masa je drobljenjem usitnjena na frakciju 0/31,5 mm te je drobljeni kameni materijal prevezen i deponiran u krugu laboratorija tvrtke TPA održavanje kvaliteta i inovacija d.o.o. u Donjoj Lomnici, Zagrebačka Županija. Nakon istovara materijal je izmiješan kako bi se anulirala segregacija zrna nastala uslijed transporta te je do korištenja prekriven geotekstilom s ciljem sprječavanja odnošenja sitnih zrna uslijed djelovanja vjetrova i kiše. Laboratorijski uzorci su uzorkovani s deponije u skladu s normom HRN EN 932-1 [307]. Smanjenje uzorkovanog materijala provedeno je u skladu s normom HRN EN 932-2 [308].

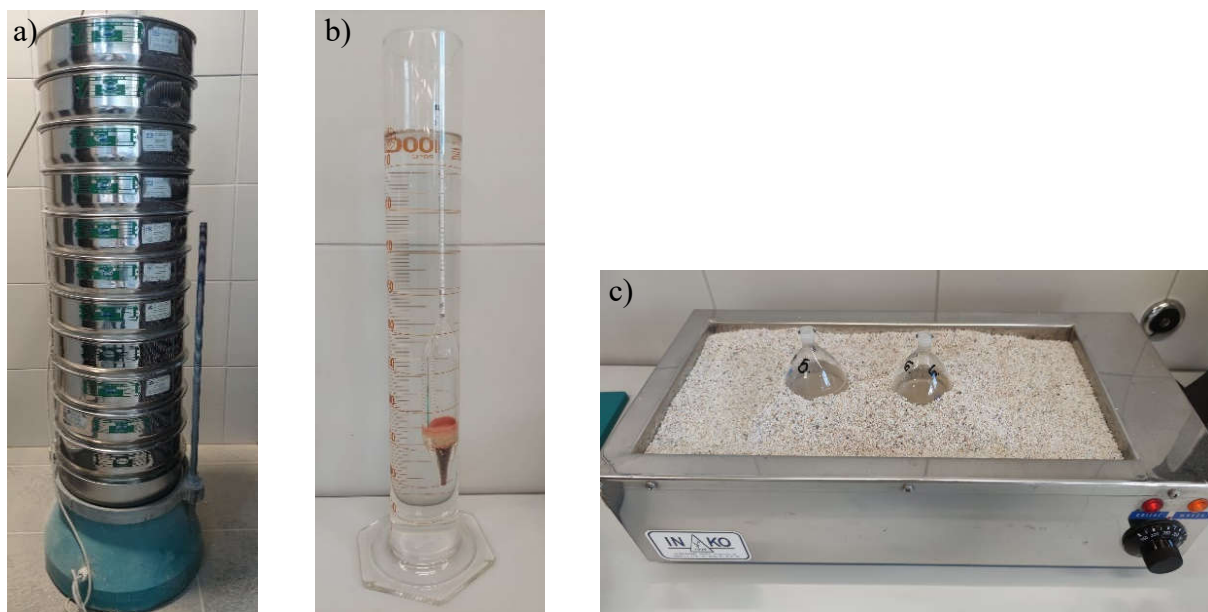


Slika 6-1 Kamenolom Gorjak

6.1.1 Analiza granulometrijskog sastava

Granulometrijski sastav pokazatelj je masenog udjela pojedinih frakcija zrna u tlu ili zrnatom materijalu [309]. Granulometrijska analiza sastoji se od prosijavanja i areometriranja (hidrometrijske analize). Prosijavanje je postupak kojim se u uzorku određuje maseni udio zrna

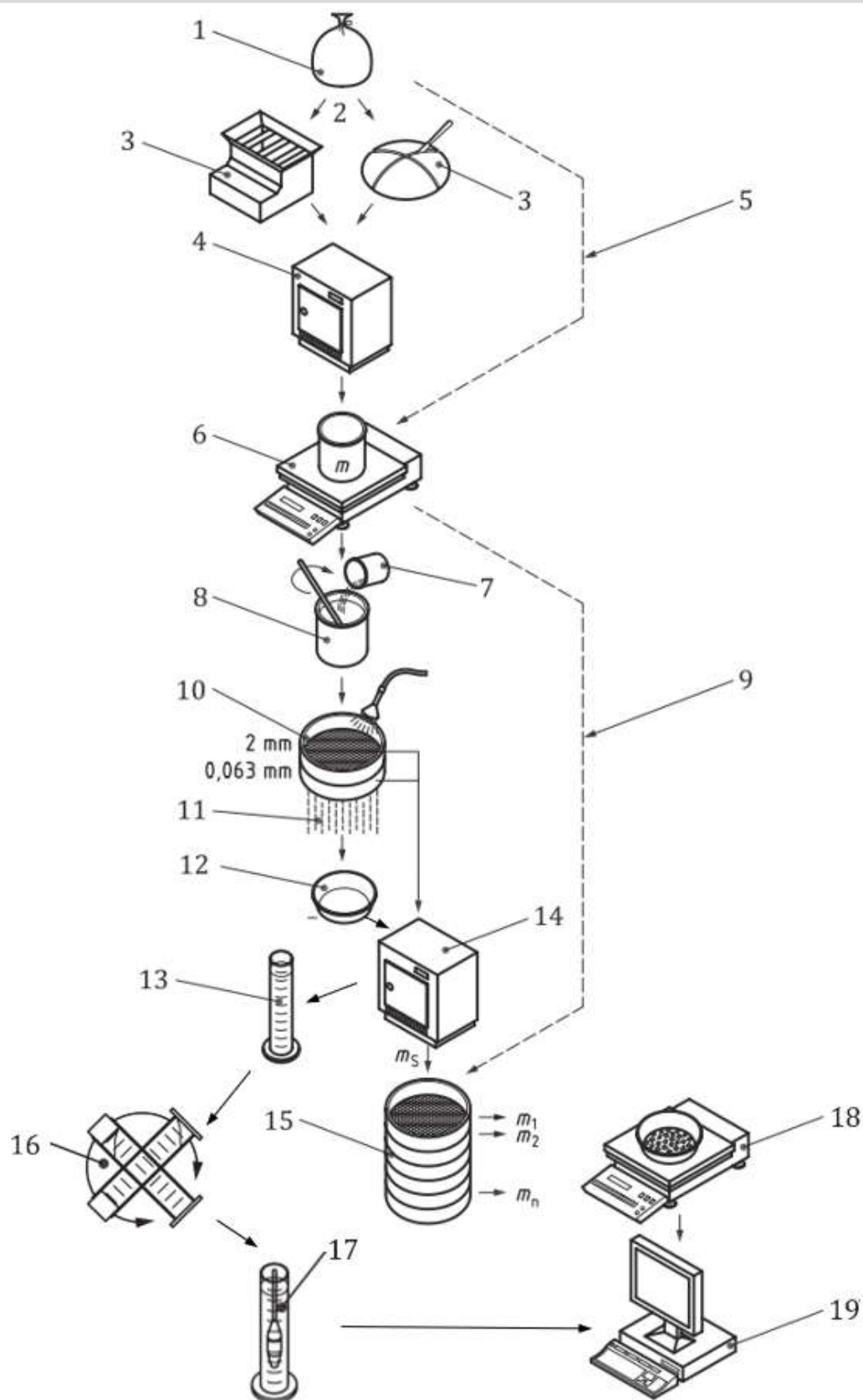
promjera većeg od 0,063 mm. Koriste se sita različitih veličina otvora posložena od većih prema manjem (Slika 6-2 a). Prosijavanje se provodi pomoću vibracijske tresilice. Areometriranje je postupak kojim se u uzorku određuju maseni udio sitnih zrna (praha i gline). Ispitivanje se provodi korištenjem areometra. Areometar je stakleni cilindar ispunjen zrakom s baždarenom skalom i olovnom sačmom na dnu koja mu omogućuje plutanje u vertikalnom položaju, a koristi se za mjerenje gustoće tekućine (Slika 6-2 b). Na temelju izmjerene gustoće, vremena taloženja i temperature vode određuje se promjer sitnih zrna i njihov udio u uzorku. Ispitivanje se temelji na Stokesovom zakonu koji tvrdi da se pri gibanju sferičnih predmeta kroz realni fluid sila otpora sredstva razmjerna brzini gibanja, polumjeru sferičnog predmeta i viskoznosti fluida.



Slika 6-2 Oprema korištena za granulometrijsku analizu: a) set sita i tresilica; b) areometar; c) pješčana kupelj

Analiza granulometrijskog sastava provedena je prema normi HRN EN ISO 17892-4 [310], a tijekom ispitivanja shematski je prikazan na slici 6-3. Prije prosijavanja uzorak je opran na situ 0,063 mm te su na taj način iz uzorka uklonjena zrna promjera manjeg od 0,063 mm. Sita različitih veličina otvora (31,5, 22,4, 16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 mm) posložena su na tresilicu. Nakon prosijavanja izvagani su ostaci uzorka na svakom situ te je izračunat prolazak kroz pojedino sito.

Zrna koja su prilikom pranja prošla kroz sito veličine otvora 0,063 mm (slika 6-3, korak 12) prikupljena su u posudu te su osušena u sušioniku. Uzorak za areometriranje pripremljen je u menzuri zapremnine 1,0 l, a sastojao se od 25 g zrna promjera manjeg od 0,063 mm, otopine antikoagulansa te destilirane vode. Uzorci su se dobro izmiješali te je menzura odložena na stabilnu površinu, u suspenziju se spuštao areometar, s kojim su očitane dubine u različitim



Slika 6-3 Shematski prikaz granulometrijske analize [310]: 1– uzorak; 2– “suhi” postupak; 3– četvrtanje; 4– sušenje; 5– “mokri” postupak; 6– vaganje; 7– disperzijsko sredstvo; 8– namakanje i miješanje; 9– suho odvajanje; 10– odvajanje i ispiranje; 11– ostatak od ispiranja; 12– sakupljanje; 13– sedimentacija; 14– sušenje; 15– prosijavanje; 16– suspenzija; 17– areometriranje; 18– vaganje ostataka materijala na pojedinom situ, 19– obrada rezultata

vremenskim intervalima (30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 15 min, 45 min, 2 h, 5 h, 24 h, 48 h). Uz svako mjerenje očitala se temperatura suspenzije. Promjeri zrna izračunati su prema jednadžbi [310]:

$$d_i = 0,005531 \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot H_r}{(\rho_s - \rho_w) \cdot t}} \quad (4.1)$$

gdje su: d_i promjer sitnog zrna (mm); η dinamička viskoznost vode (mPas) pri određenoj temperaturi u trenutku očitavanja areometra; H_r efektivna dubina areometra (mm); ρ_s gustoća sitnih zrna (Mg/m^3); ρ_w gustoća suspenzije (Mg/m^3) pri određenoj temperaturi; t vrijeme proteklo od početka provođenja areometriranja (s). Gustoća zrna promjera $<0,063$ mm određena je prema normi HRN EN ISO 17892-3 [311]. Zrak iz uzorka je prema preporuci Alfonso-a i suradnika [312] uklonjen prokuhavanjem uzoraka u pješčanoj kupelji (Slika 6-2 c) u vremenskom intervalu od 10 min. Gustoća zrna promjera $<0,063$ mm iznosila je $2,87 \text{ Mg/m}^3$. Maseni udio pojedinog zrna izračunat je prema jednadžbi [310]:

$$K = \frac{100 \cdot \rho_s}{m \cdot (\rho_s - 1)} \cdot R_d \quad (4.2)$$

gdje su: K maseni udio zrna (%); ρ_s gustoća zrna promjera $<0,063$ mm (Mg/m^3); m masa suhog uzorka (g); R_d modificirano očitavanje areometra. Modificirano očitavanje areometra određeno je prema jednadžbi:

$$R_d = R_H - R_0 \quad (4.3)$$

gdje su: R_H pravo očitavanje areometra (mm); R_0 očitavanje areometra u referentnoj otopini (mm). Rezultati granulometrijske analize kamenog drobljenog materijala prikazani su u tablicama 6-1 i 6-2 te na slici 6-4.

Tablica 6-1 Rezultati prosijavanja

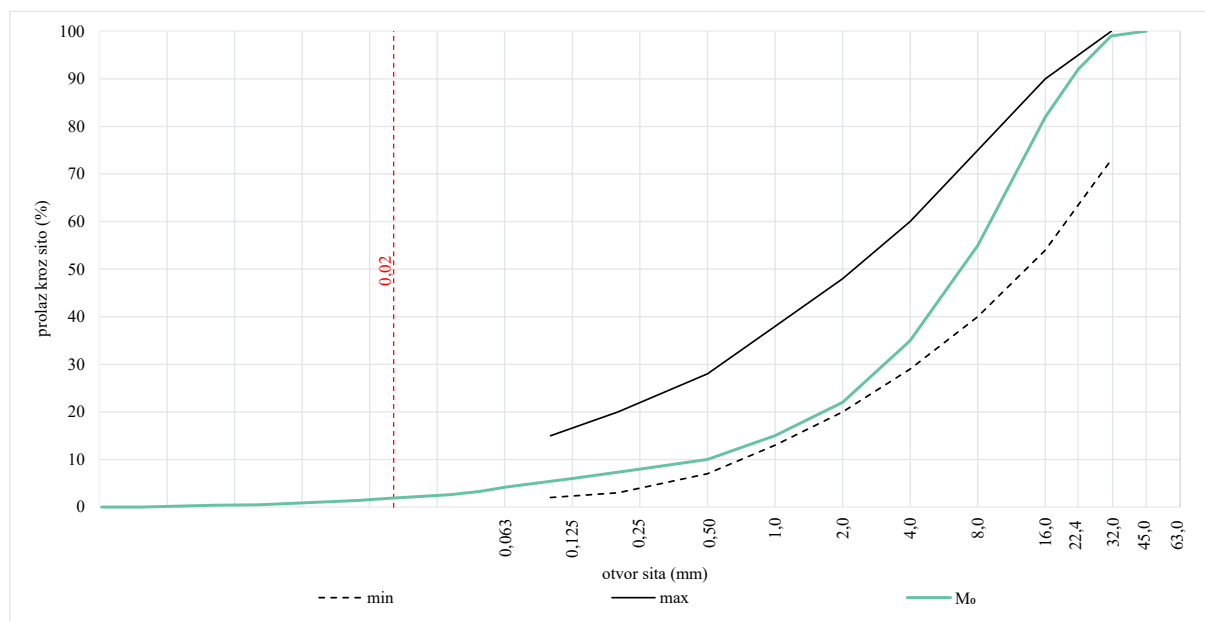
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito %												
4,2	6,0	8,0	10,0	15,0	22,0	35,0	55,0	82,0	92,0	99,0	100,0	100,0

Tablica 6-2 Rezultati areometriranja

Promjer zrna (mm)								
0,0484	0,0354	0,0230	0,0137	0,0081	0,0050	0,0032	0,0015	
Udio zrna %								
3,3	2,6	2,1	1,4	0,9	0,5	0,4	0,1	

U Republici Hrvatskoj drobljeni kameni materijal za izradu nosivog sloja bez veziva na javnim cestama i autocestama u granulometrijskom smislu mora se nalaziti unutar graničnih vrijednosti propisanih OTU-ima [313] (Tablica 6-3). Dodatno, propisan je najveći promjer zrna i on ne

smije biti veći od 63 mm, odnosno od polovine debljine MNS-a. Također, udio zrna promjera <0,02 mm ne smije biti veći od 3%. Iznimno se dopušta primjena materijala s udjelom zrna promjera <0,02 mm u udjelu do 5%, uz dokazivanje kamenog podrijetla zrna i ugradnju materijala na područjima s blagom klimom te malim dubinama smrzavanja. U ispitnom uzorku promjer najvećeg zrna bio je 31,5 mm, a maseni udio zrna promjera <0,02 mm iznosio je 1,9%. U pogledu granulometrijskog sastava drobljeni kameni materijal ispunjava zahtjeve za izradu MNS-a propisane OTU-ima [313].



Slika 6-4 Granulometrijski sastav drobljenog kamenog materijala

Tablica 6-3 Granično područje granulometrijskog sastava kamenog materijala za izradu nevezanog sloja bez veziva [313]

Kvadratni otvor sita (mm)	Prolaz kroz sito (%)
0,1	2-15
0,2	3-20
0,5	7-28
1	13-38
2	20-48
4	29-60
8	40-75
16	54-90
31,5	73-100
50	90
63	100

6.1.2 Stupanj neravnomjernosti

Stupanj neravnomjernosti definira se kao omjer veličine otvora sita kroz koju je prošlo 60% mase uzorka i veličine otvora sita kroz koju je prošlo 10% mase uzorka [314]. Stupanj neravnomjernosti mjera je dobre ugradljivosti materijala te prema općim tehnički uvjetima za

radove na cestama [313] za drobljeni kameni materijal treba iznositi između 15 i 50. Stupanj neravnomjernosti određen je na temelju granulometrijskog sastava prema jednadžbi [313]:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (4.4)$$

gdje su: U stupanj neravnomjernosti; d_{60} otvora sita kroz koju je prošlo 60% mase; d_{10} otvora sita kroz koju je prošlo 10% mase. Stupanj neravnomjernosti ispitnog uzorka iznosio je 19,8. Stupanj neravnomjernosti ispitnog kamenog materijala nalazi se unutar propisanih vrijednosti.

6.1.3 Određivanje oblika zrna

Oblik zrna karakterizira međusobni odnos njegovih dimenzija: duljine, širine i debljine. Optimalni oblik zrna je kubičan, tj. oblik kod kojega su sve tri dimenzije zrna podjednake. Zrna nepovoljnog oblika su ona koja imaju omjer najmanje i najveće dimenzije zrna veći od 3:1. U zrna nepovoljnog oblika spadaju zrna plosnatog oblika (debljina zrna je znatno manja u odnosu na preostale dimenzije zrna) te izduženog oblika (duljina zrna je znatno veća od preostalih dimenzija zrna). Zrna nepovoljnog oblika su manje otporna na lomljenje i drobljenje. Određivanje oblika zrna odnosno udjela zrna nepovoljnog oblika provedeno je prema normi HRN EN 933-4 [315]. Ispitivanje je provedeno na frakcijama 4/8, 8/16 i 16/31,5 mm ispitnog uzorka. Za svaku od navedenih frakcija, korišten je postupak smanjenja uzorka kako bi se dobio ispitni uzorak koja sadrži najmanje 100 zrna. Postupak određivanja oblika zrna uključuje postavljanje zrna između krakova „A“ kljunastog mjerila, a zatim se zrno postavlja između krakova „B“ kljunastog mjerila po najmanjoj dimenziji (Slika 6-5 a). Zrno koje se može postaviti između krakova „B“ kljunastog mjerila smatra se zrnom nepovoljnog oblika. Opisani postupak rezultirao je podjelom uzorka u dvije grupe: zrna povoljnog oblika i zrna nepovoljnog oblika (Slika 6-5 b), pri čemu je određena njihova masa.



Slika 6-5 Određivanje oblika zrna: a) kljunasto mjerilo; b) zrna nepovoljnog oblika

Udio zrna nepovoljnog oblika izračunava se prema jednadžbi [315]:

$$O_n = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \cdot 100 \quad (4.5)$$

gdje su: O_n udio zrna nepovoljnog oblika (%); M_1 masa zrna nepovoljnog oblika (g); M_2 masa

zrna povoljnog oblika (g). Udio zrna nepravilnog oblika u ispitnom uzorku prikazan je u tablici 6-4. Indeks oblika ispitnog uzorka izračunat je prema jednadžbi:

$$SI = \frac{\sum M_2}{\sum M_1} \cdot 100 \quad (4.6)$$

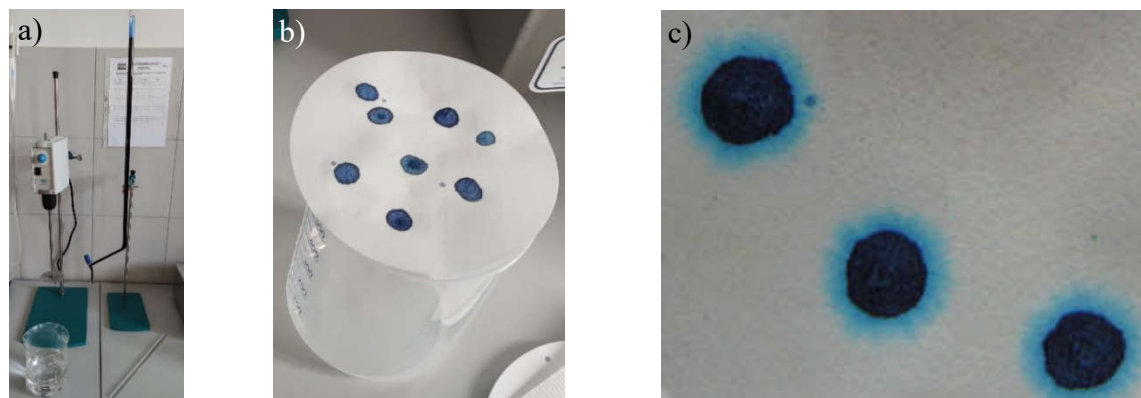
Indeks oblika ispitnog uzorka iznosio je 9. Prema općim tehničkim uvjetima za radove na cestama [313] indeks oblika mora biti ≤ 40 . U pogledu indeksa oblika drobljeni kameni materijal ispunjava propisane zahtjeve.

Tablica 6-4 Određivanje udjela zrna nepovoljnog oblika

Frakcija (mm)	Masa uzorka M_1 (g)	Masa zrna nepovoljnog oblika M_2 (g)	Udio zrna nepovoljnog oblika O (%)
16/31,5	6035,4	441,6	7,3
8/16	1050,1	180,4	17,2
4/8	105,2	18,9	18,0

6.1.4 Procjena sitnih zrna metilenskim modrilom

Ispitivanje s metilenskim modrilom razvijeno je u Francuskoj za potrebe utvrđivanja primjenjivosti agregata za proizvodnju betona u pogledu sadržaja gline. Kada se pomiješaju s otopinom metilenskog modrila i materijala, kloridni ioni u otopini metilena mijenjaju mjesto s kationima u mineralima gline da bi se apsorbirali na površini minerala gline [316]. Količina apsorbirane otopine metilena varira ovisno o količini minerala gline i vrsti gline, kapacitetu kationske izmjene i specifičnoj površini. Pokus s metilenskim modrilom provodi se kako bi se utvrdilo jesu li minerali gline aktivni. Materijali s aktivnim mineralima gline bubre ovisno o sadržaju vlage [317]. Test metilenskim modrilom je jedino ispitivanje koji ove informacije daje točno i brzo. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom HRN EN 933-9 [318]. Iz materijala je izdvojena frakcija 0/2 mm koja je potom osušena u sušioniku. Zatim je u posudu miješalice dodano 200 g uzoraka i 500 ml destilirane vode te je pokrenuto miješanje. Otopina metilenskog modrila dozirala se pomoću birete u količinama od po 5 ml s vremenskim intervalom 1 min



Slika 6-6 Ispitivanje metilenskim modrilom: a) oprema za ispitivanje; b) suspenzije s nedovoljnom količinom otopine metilenskog modrila; c) suspenzija sa dovoljnom količinom otopine metilenskog modrila [316]

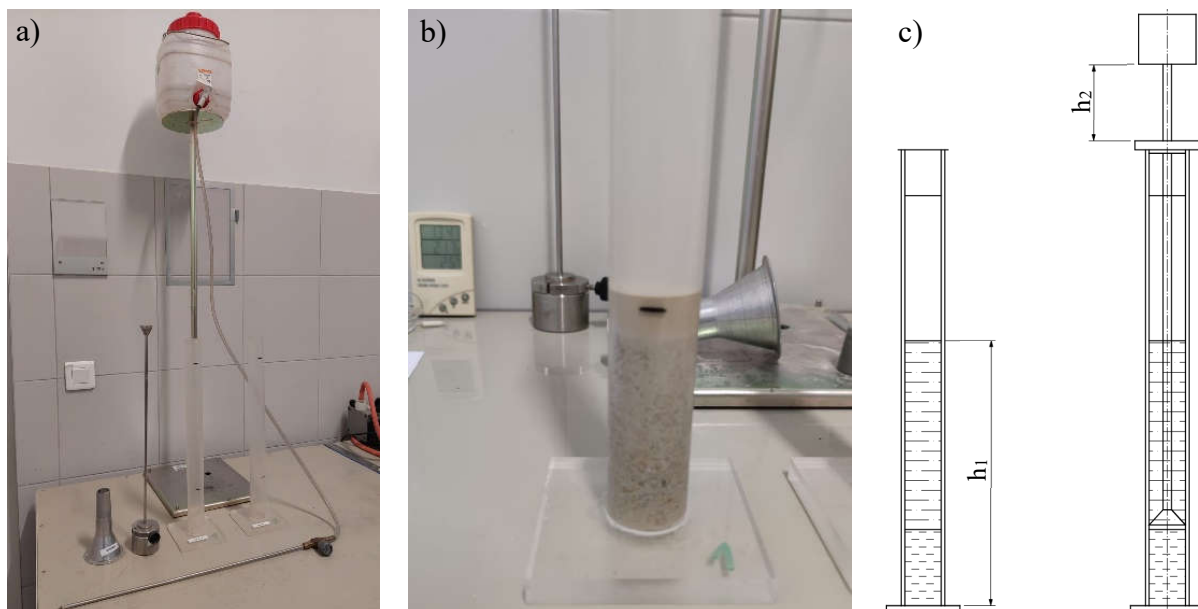
(Slika 6-6 a). Nakon svakog dodavanja otopine metilenskog modrila pomoću staklenog štapića uzet je djelić suspenzije ta je nakapana na filtarski papir (Slika 6-6 b). Pri dodanoj količini metilenskog modrila u iznosu 17 ml zabilježen je svijetloplavi prsten (Slika 6-6 c) koji se zadržao 5 min. Vrijednost metilenskog modrila iznosila je 0,9 grama boje po kilogramu frakcije 0/2 mm. Izračunata je prema jednadžbi [318]:

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \cdot 10 \quad (4.7)$$

gdje su: MB vrijednost metilenskog modrila (grama boje po kilogramu frakcije 0/2 mm); volumen dodane otopine metilenskog modrila (ml); masa ispitnog uzorka (g). Ovako niska vrijednost MB pokazatelj je niskog sadržaja sitnih zrna u frakciji materijala [319].

6.1.5 Određivanje ekvivalenta pijeska

Određivanje ekvivalenta pijeska predstavlja brz i jednostavan pokus kojim se provjerava čistoća agregata. Ovim testom se utvrđuje prisustvo i relativna količina zrna gline, prašinate gline i praha u nevezanim materijalima [320]. Dobivena vrijednost predstavlja volumni omjer frakcije pijeska prema ukupnoj zapremini uzorka, odnosno relativan odnos frakcije pijeska i ostalih frakcija u materijalu (gline, prašinate gline i prah). Visoke vrijednosti ekvivalenta pijeska, pokazatelj su čistoće materijala, tj. veće prisutnosti pijeska u usporedbi s ostalim zrnima [317].



Slika 6-7 Određivanje ekvivalenta pijeska: a) oprema za ispitivanje; b) ispitni uzorak nakon procesa taloženja; c) postupak određivanja visine h_1 i h_2 [321]

Ispitivanje je provedeno u skladu s normom HRN EN 933-8 [321] (Slika 6-7 a). Pripremljena su dva uzorka mase 120 g frakcije materijala 0/2 mm. Ispitni uzorak se u cilindru pomiješao s otopinom kalcijevog klorida te se ostavio 10 min da se natopi. Nakon toga je protresen 30 s te je pomoću cijevi za ispiranje dodana otopina kalcijevog klorida tako da je visina suspenzije u

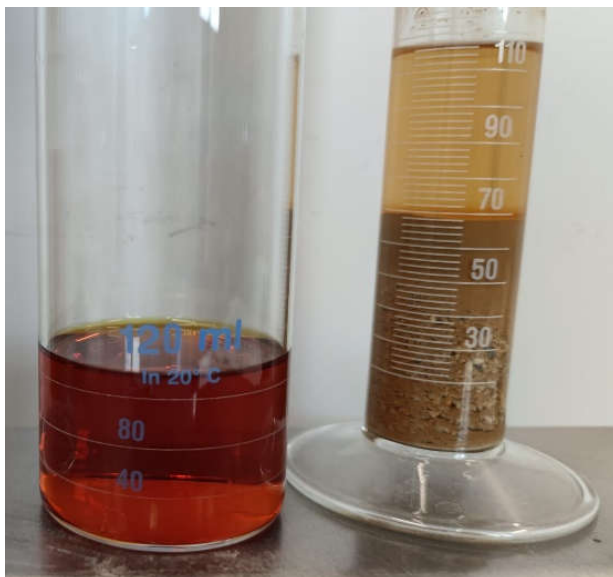
cilindru iznosila 380 mm. Cilindar se odložio na čvrstu podlogu ta ga se nije pomicalo 20 min kako bi se omogućio taloženje zrna (Slika 6-7 b). Na kraju ovog perioda izmjerene su visine istaloženog pijeska odnosno praha i gline (Slika 6-7 c). Vrijednost ekvivalenta pijeska izračunata je prema jednadžbi [321]:

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 \quad (4.8)$$

gdje su: SE ekvivalent pijeska (%); h_2 visina istaloženog pijeska (mm); h_1 ukupna visina istaloženih zrna. Za određeni ispitni uzorak pripremljena su dva cilindra. Vrijednost ekvivalenta pijeska se izračunava kao prosjek vrijednosti dobivenih na dvama cilindrima i bilježi se do najbližeg cijelog broja. Vrijednost ekvivalenta pijeska ispitnog uzorka iznosila je 80%. Rezultat ispitivanja ukazuje na vrlo dobru kvalitetu drobljenog kamenog agregata, s niskim udjelom sitnih zrna koje mogu negativno utjecati na svojstva MNS-a [322].

6.1.6 Određivanje sadržaja humusa

Humus je tamna, organska tvar, nastala raspadanjem biljnih i životinjskih ostataka. Određivanje sadržaja humusa provedeno je u skladu s točkom 15.1 norme HRN EN 1744-1 [323]. Ispitni uzorak je prosijan kroz sito veličine otvora 4 mm te je osušen u sušioniku. U menzuri se pomiješao ispitni uzorak i 3% natrijev hidroksid te se nakon 24 sata usporedila boja uzorka s bojom kontrolne otopine pripremljene u skladu s točkom 4.9.2 [323]. Otopina s ispitnim uzorkom bila je svjetlija od kontrolne otopine što je značilo da u ispitnom uzorku nije bilo humusa (Slika 6-8).

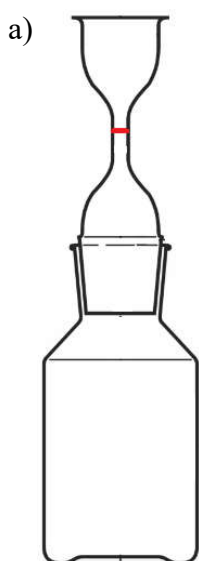


Slika 6-8 Određivanje prisutnosti humusa- referentna tekućina (lijevo) i ispitni uzorak (desno)

6.1.7 Određivanje gustoće zrna i upijanje

Gustoća zrna je omjer između mase jediničnog volumena materijala i mase istog volumena

vode pri temperaturi od $22 \pm (3)^\circ\text{C}$. Poznavanje gustoće agregata koristan je podatak za izračunavanje volumena na temelju izvagane mase kao i za određivanje udjela šupljina u izvedenom sloju MNS-a. Gustoća i upijanje zrna određeni su prema točkama 8 i 9 norme HRN EN 1097-6 [324]. Ispitni uzorak podijeljen je na četiri frakcije: 0,063/4 mm, 4/8mm, 8-16 mm i 16-31,5 mm. Svaka frakcija usuta je u zasebni piknometar, nalivena je voda te se laganom trešnjom i rotiranjem piknometra odstranio zrak iz uzorka. Zatim se nalila voda do potrebne visine, tj. do oznake na piknometru (Slika 6-9 a). Piknometri su postavljeni u vodenu kupelj s temperaturom vode 22°C na 24 sata. Nakon toga piknometri su izvagani. Uzorci su izvađeni



Slika 6-9 Određivanje gustoće i upijanje vode: a) piknometar; b) određivanje površinski suhog stanja uzorka frakcije 0,063/4 mm

iz piknometra, položeni na suhu krpu te su prosušeni na način da uzorak i dalje ostane vlažan, ali bez vidljivog vodenog filma na površini zrna. Uzorak frakcije 0,063/4 mm je nakon vađenja iz piknometra jednolično raširen po dnu posude. Zatim se neprestano miješao kako bi se prosušio. Dostizanja površinski suhog stanja, kontrolirano je ugradnjom uzorka u metalni stožac (Slika 6-9 b). Kada se nakon podizanja metalnog stošca uzorak sruši u obliku piramide uzorak je površinski prosušen. Svi uzorci su izvagani u zasićenom stanju te ponovno nakon sušenja u sušioniku. Nakon toga izračunate su gustoće zrna i upijanje vode prema jednadžbama [324]:

$$\rho_A = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (4.9)$$

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (4.10)$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (4.11)$$

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \cdot 100 \quad (4.12)$$

gdje su: ρ_A prividna gustoća zrna (Mg/m^3); ρ_W gustoća vode pri temperaturi na kojoj je provedeno ispitivanje (Mg/m^3); M_4 masa potpuno suhih zrna (g); M_2 masa piknometra sa zrnima i vodom (g); M_3 masa piknometra ispunjenog vodom (g); ρ_{rd} gustoća osušenih zrna (Mg/m^3); M_1 masa zasićenih površinski suhih zrna (g); ρ_{ssd} gustoća zasićenih površinski suhih zrna (Mg/m^3); WA_{24} upijanje vode nakon što su zrna 24 sata bila potopljena u vodi (%). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6-5. Analizom rezultata zaključeno je da je upijanje drobljenog kamenog materijala izrazito nisko. Frakcija 0,063/4 pokazuje nešto veću vrijednost upijanja, ali to je očekivano zbog većeg oplošja zrna u odnosu na volumen. Drobljeni kameni materijal čije je upijanje niže od 1,6% pogodan je za izradu MNS-a [313].

Tablica 6-5 Rezultati ispitivanja gustoća zrna i upijanje vode

Frakcija (mm)	0,063/4	4/8	8/16	16/31,5
Prividna gustoća (Mg/m^3)	2,86	2,85	2,85	2,84
Gustoća osušenih zrna (Mg/m^3)	2,80	2,79	2,81	2,81
Gustoća zasićenih, površinskih suhih zrna (Mg/m^3)	2,82	2,81	2,83	2,82
Upijanje (%)	0,8	0,7	0,4	0,3

6.1.8 Ispitivanje otpornosti na smrzavanje

Ispitivanje otpornosti na smrzavanje provedeno je prema normi HRN B.B8.002 [325]. Prilikom ispitivanju koristila se otopina natrijevog sulfata (25,9%). Tijekom ispitivanja dolazi do kristalizacije natrijeva sulfat u porama zrna materijala što kod pojedinih vrsta materijala može dovesti do raspadanja zrna. Smatra se da je takvo stvaranje kristala zapravo slično stvaranju kristala leda pa se time zapravo simulira postupak smrzavanja i odmrzavanja. Laboratorijski uzorak prosijan je i podijeljen je na frakcije: 4/8 mm, 8/16 mm i 16/31,5 mm. Ispitni uzorci su izvagani, usuti u žičane košare te potopljeni u otopinu (Slika 6-10). Ispitni uzorci su se držali u otopini 18 sati nakon čega su se ocijedili te osušili u sušioniku. Nakon hlađenja uzorci su



Slika 6-10 Ispitivanje otpornosti na smrzavanje metodom natrijevog sulfata

uronjeni u otopinu te se ovaj ciklus ponavljao pet puta. Uzorci su nakon toga oprani da bi se odstranili kristali, osušeni te prosijani na situ odgovarajuće veličine otvora: 2 mm (frakcija 4/8 mm), 4 mm (frakcija 8/16 mm) odnosno 8 mm (frakcija 16/31,5 mm). Ostaci na situ su izvagani te je izračunat gubitak mase. Rezultati su prikazani u tablici 6-6. Rezultati ispitivanja ukazuju na izuzetno dobru otpornost na smrzavanje. Niski gubici mase sugeriraju da agregat ima vrlo nisku poroznost i visoku otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. U pogledu otpornosti na smrzavanje materijal čiji je gubitak mase nakon pet ciklusa smrzavanja niži od 12% pogodan je za izradu MNS-a [313].

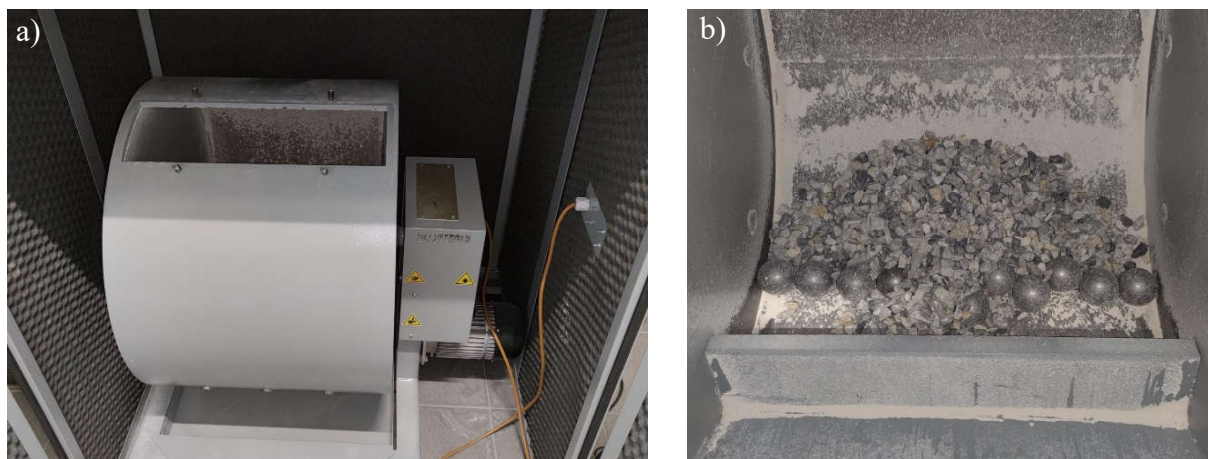
Tablica 6-6 Rezultati ispitivanja otpornosti na smrzavanje

Frakcija (mm)	4/8	8/16	16/31,5
Gubitak mase nakon 5 ciklusa (%)	0,2	0,2	0,0

6.1.9 Određivanje otpornosti na drobljenje

Kameni materijali su u procesu proizvodnje te prilikom ugradnje i zbijanja izloženi drobljenju. Uobičajeni postupak ispitivanja određivanja otpornosti na drobljenje zrnatih kamenih materijala je Los Angeles pokus [326–328] (Slika 6-11 a).

Ispitivanje je provedeno prema točki 5 norme HRN EN 1097-2 [329]. Prosijavanjem je iz laboratorijskog uzorka izdvojeno 5000 g materijala frakcije 10/14 mm, tj. 3250 g frakcije 11,2/14 mm i 1750 g frakcije 10/11,2 mm. Uzorak se zatim postavio u čelični bubanj zajedno s 11 čeličnih kugli promjera 47 mm i mase 400 g (Slika 6-11 b). Nakon 600 okreta bubnja brzinom 32 okreta u minuti prikupljen je materijal te je prosijan „mokrim“ postupkom kroz sito



Slika 6-11 Određivanje otpornosti na drobljenje: a) uređaj; b) materijal nakon ispitivanja
veličine otvora 1,6 mm. Ostatak na situ je osušen u sušioniku i izvagan. Los Angeles koeficijent izračunat je prema jednadžbi:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (4.13)$$

gdje su: LA Los Angeles koeficijent (%); m masa agregata ostatak na situ veličine otvora 1,6

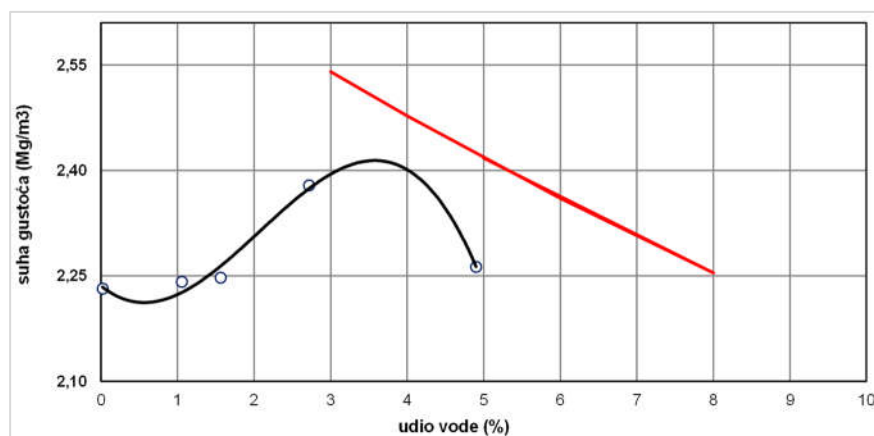
mm. Los Angeles koeficijent ispitnog uzorka bio je 19%. Opći tehnički uvjeti za radove na cestama [313] propisuju da Los Angeles koeficijent mora biti ≤ 45 . Los Angeles koeficijent od 19% ukazuje na visokokvalitetni kameni materijal s izvrsnom otpornošću na drobljenje uslijed opterećenja od prometa.

6.1.10 Određivanje najveće suhe gustoće i optimalnog udjela vlage

Ispitivanje modificiranim Proctoro-vim pokusom, prema normi HRN EN 13286-2:2010/Ispr.1 [330], provedeno je s ciljem utvrđivanja osnovnih parametara zbijanja, najveće suhe gustoće uzorka i optimalnog udjela vlage. S obzirom na najveću veličinu zrna (31,5 mm) u laboratorijskom uzorku odabrana je metoda zbijanja u velikom kalupu (B), bat težine 4,5 kg te visine pada bata od 45,7 cm (Slika 6-12 a). Pripremljeno je pet uzorka, a međusobno su se



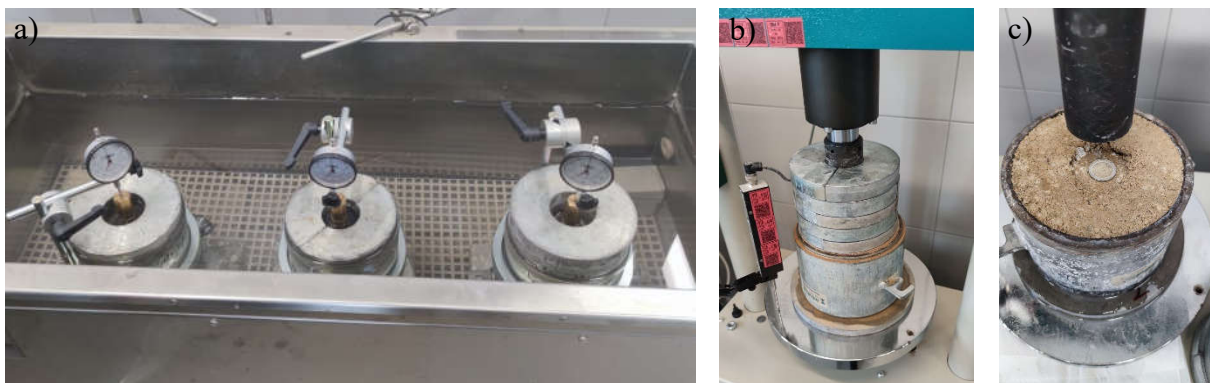
Slika 6-12 Modificirani Proctor-ov pokus: a) uređaj za zbijanje; b) uzorak poslije zbijanja razlikovali u količini dodane vode. Uzorci su zbijani u pet slojeva, pri čemu je svaki sloj zbijen s ukupno 56 udarca (Slika 6-12 b). Energija zbijanja iznosila je $2,7 \text{ MJ/m}^3$. Nakon zbijanja, uzorci su izvagani, osušeni u sušioniku te ponovno izvagani. Temeljem prikupljenih podataka izračunata je suha prostorna masa i udio vlage. Provedbom ovog ispitivanja (Slika 6-13) određena je najveća suha gustoća (ρ_{dmax}) i optimalni udio vlage (w_{opt}). Najveća suha gustoća iznosila je $2,37 \text{ Mg/m}^3$, a optimalna vlažnost 3,7%.



Slika 6-13 Rezultati Proctor-ovog pokusa za osnovni materijala

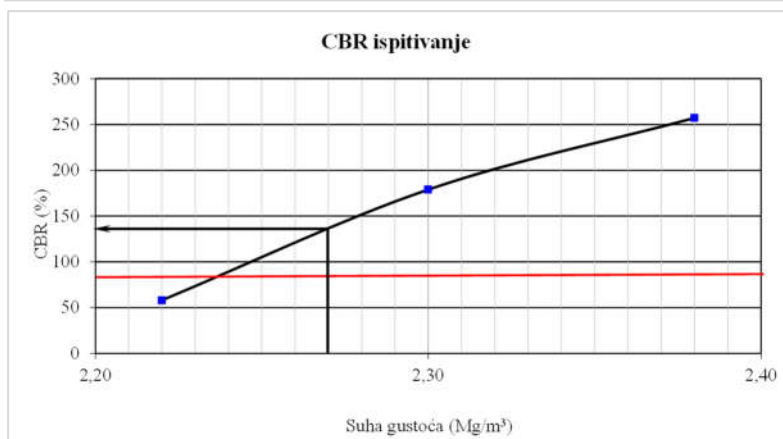
6.1.11 Ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti

Ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) koristi se za ocjenu nosivosti nevezanih nosivih slojeva kolničke konstrukcije. CBR predstavlja odnos između pritiska p potrebnog da se cilindrični klip površine poprečnog presjeka $19,4 \text{ cm}^2$ utisne u uzorak do dubine $2,54 \text{ mm}$ brzinom $1,27 \text{ mm}$ u minuti i standardnog pritiska p_n potrebnog da se identičan klip istom brzinom utisne do iste dubine u standardni materijal (drobljeni kamen). Ispitivanje je provedeno prema normama HRN EN 13286-47 [331] i HRN U.B1.042 [332]. Prema HRN EN 13286-47 izrađuje se jedan uzorak modificiranim Proctor-ovim postupkom. Uzorak se sastoji od pet slojeva, a svaki sloj se zbija s 56 udaraca. Norma HRN U.B1.042 zahtjeva provedbu ispitivanja na tri uzorka. Izrada jednog uzorka je istovjetna prethodno spomenutom, a preostala dva uzorka, koja se također zbijaju u pet slojeva s tim da se jedan zbija s 13, a drugi s 27 udaraca. Ovim se postupkom omogućuje određivanje vrijednosti CBR-a za slojeve čija je zbijenost iznosi 95% od optimalne zbijenosti određene modificiranim Proctor-ovim pokusom. Nakon zbijanja uzorci



Slika 6-14 Ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti: a) namakanje uzoraka; b) provođenje ispitivanja; c) uzorak nakon ispitivanja

su, zajedno s kalupom, postavljeni na perforiranu podnožnu pločicu. S gornje strane postavljen je perforirani lim na koji su postavljeni prstenasti diskovi ukupne težine 14 kg kojima se simuliralo opterećenje slojeva kolničke konstrukcije koji se nalaze iznad MNS-a. Ovako pripremljeni kalupi postavljeni su u vodenu kupelj na vremenski period od 96 sati (Slika 6-14 a). Tijekom tog perioda potencijalno bubrenje materijala praćeno je pomoću manometara. Bubrenje nije zabilježeno. Nakon vađenja uzorka iz vodene kupelji, uzorci su ostavljeni da se ocijede 15 minuta, a zatim su stavljeni u prešu za ispitivanje CBR-a. Uzorci se u uređaj postavljaju centralno na kružnu ploču koja se zatim podiže dok klip za utiskivanje ne dodirne gornju površinu uzorka (Slika 6-14 b). Na taj se način definira početna pozicija prodiranja klipa koji se u materijal utiskuje brzinom $1,27 \text{ mm/min}$. Tijekom ispitivanja bilježi se sila i dubina prodiranja klipa (Slika 6-14 c). Vrijednost CBR za 95% zbijeni sloj prema [332] iznosila je 135% . Navedene vrijednosti pokazuju da je materijal pogodan za izradu MNS-a.



Slika 6-15 Grafički prikaz suhe gustoće i vrijednosti CBR-a drobljenog kamenog materijala

Temeljem provedenih laboratorijskih ispitivanja i dobivenih rezultata vidljivo je da ispitani drobljeni kameni materijal zadovoljava sve tražene zahtjeve. U pogledu fizikalno-mehaničkih i kemijskih svojstava te nosivosti izražena preko laboratorijski određenog CBR-a, drobljeni kameni materijal je prikladan za izradu MNS-a.

6.2 Dodani materijal

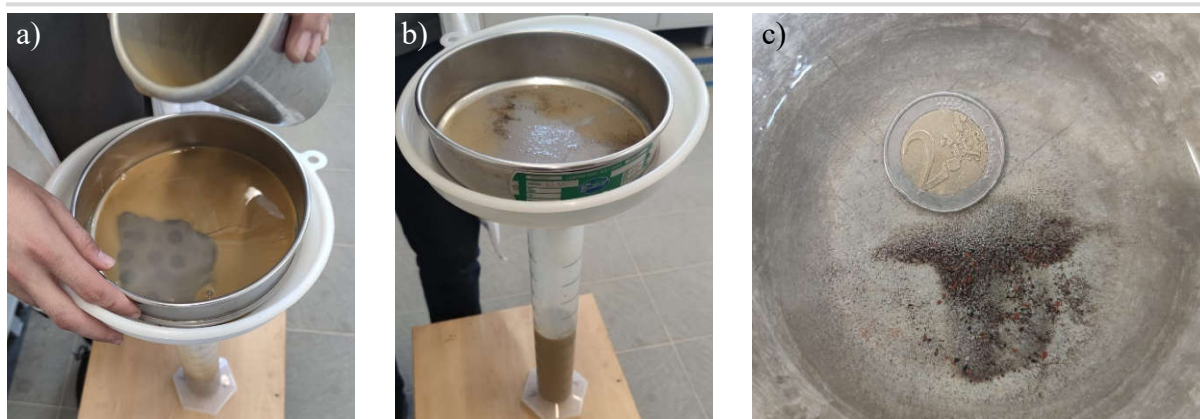
Dodani materijal korišten u ovom istraživanju dobiven je iz nepečenog glinenog crijeva (Slika 6-16 a) proizvedenog u tvrtki Dilj d.o.o. u Vinkovcima. Crijevovi su osušeni u sušioniku na temperaturi od 40 °C te su potom usitnjeni najprije valjkom s glatkim čeličnim kotačima (Slika 6-16 b), a nakon toga u uređaju za provođenje Los Angeles pokusa (Slika 6-16 c).



Slika 6-16 Dodani sitnozrnati materijal: a) nepečeni crijevi; b) usitnjavanje valjkom s glatkim čeličnim kotačima; c) usitnjavanje u uređaju za provođenje Los Angeles pokusa

6.2.1 Analiza granulometrijskog sastava

Analiza granulometrijskog sastava (Slika 6-17) provedena je u skladu s normom HRN EN ISO 17892-4 [310]. Nakon uzorkovanja materijala pripremljen je ispitni uzorak suhe mase 25 g. Ispitni uzorak je potopljen u destiliranu vodu 24 sata i zatim miješan posebnim mikserom kako bi se sva sitna zrna razdvojila i disperzirala u vodi. Tako dobivena disperzija je preko sita 0,063 izlivena u staklenu menzuru. Dio uzorka koji je ostao na situ osušen je u sušioniku te prosijan kroz sita veličine otvora 0,500, 0,250, 0,125 i 0,063 mm. Na dijelu uzorka koji je prošao kroz



Slika 6-17 Analiza granulometrijskog sastava: a) suspenzija; b) prosijavanje „mokrim“ postupkom; c) ostatak na situ veličine otvora 0,063 mm

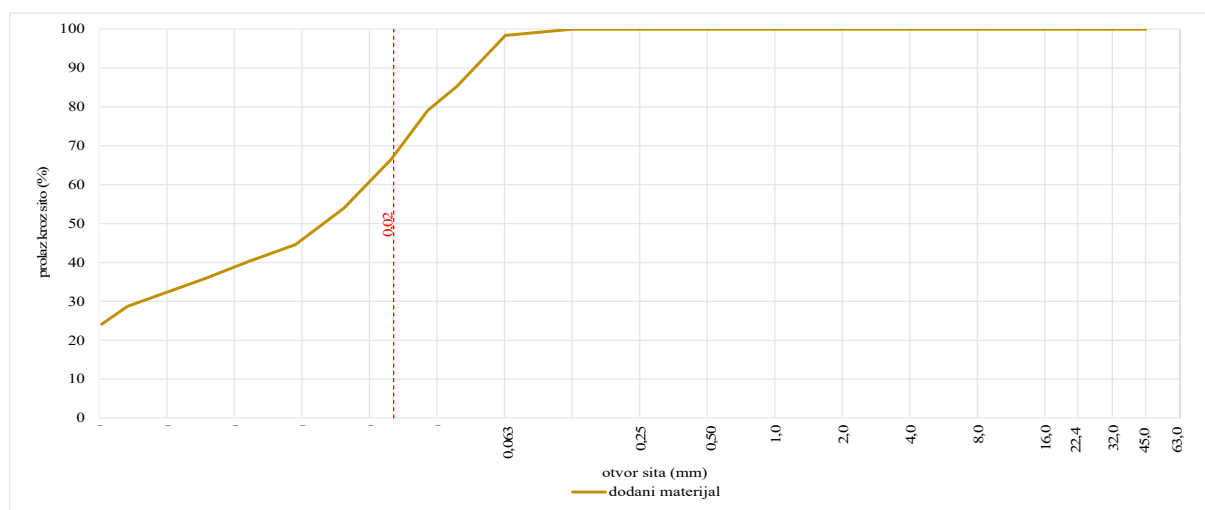
sito 0,063 mm u menzuru proveden je postupak areometriranja. Time je dobiven granulometrijski sastav zrna manjih od 0,063 mm. Postupak areometriranja opisan je u poglavlju 4.1.1. Rezultati analize granulometrijskog sastava (Tablice 6-7 i 6-8) prikazani su na slici 6-18. U sklopu analize granulometrijskog sastava određen je promjer najvećeg zrna (0,063 mm), koeficijent nejednolikosti (129,3), udio sitnih zrna čiji je promjer <0,02 mm (67,4%) i gustoća zrna promjera <0,02 mm (2,74 Mg/m³).

Tablica 6-7 Rezultati prosijavanja

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito %												
98,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tablica 6-8 Rezultati areometriranja

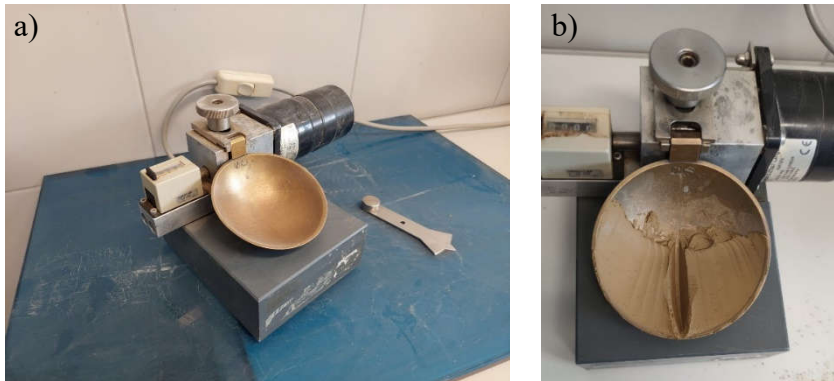
Promjer zrna (mm)								
0,0384	0,0284	0,0195	0,0120	0,0073	0,0045	0,0029	0,0013	0,010
Udio zrna %								
85,3	79,1	66,5	53,9	44,6	40,2	35,9	28,7	24,1



Slika 6-18 Analiza granulometrijskog sastava dodanog materijala

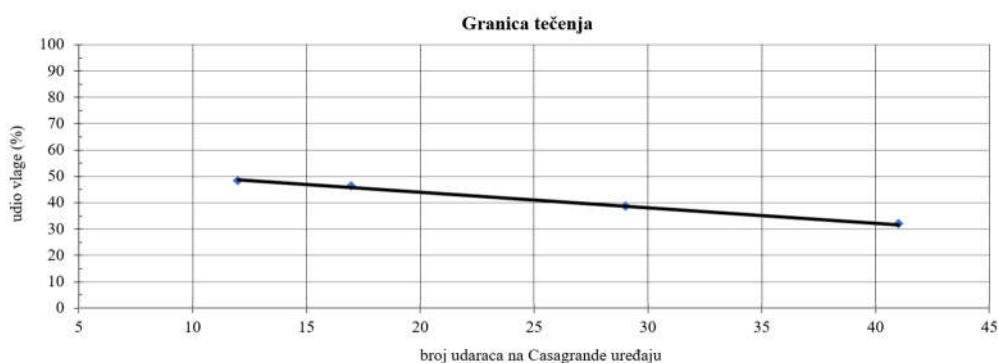
6.2.2 Atterberg-ove granice tečenja i plastičnosti

Sitnozrnatim materijalima se konzistentno stanje mijenja s promjenom udjela vlage. Kod niskog udjela vlage, oni se nalaze se u čvrstom konzistentnom stanju. S postupnim povećanjem udjela vlage materijal najprije prelazi u polučvrsto konzistentno stanje, a zatim u plastično konzistentno stanje. Pri visokim udjelima vlage sitnozrnati materijal prelazi u tekuće ili žitko konzistentno stanje i potpuno gubi čvrstoću. Na granicama između ovih različitih konzistentnih stanja, definirani su odgovarajući udjeli vlage. Te granice nazivaju se: granicom stezanja,



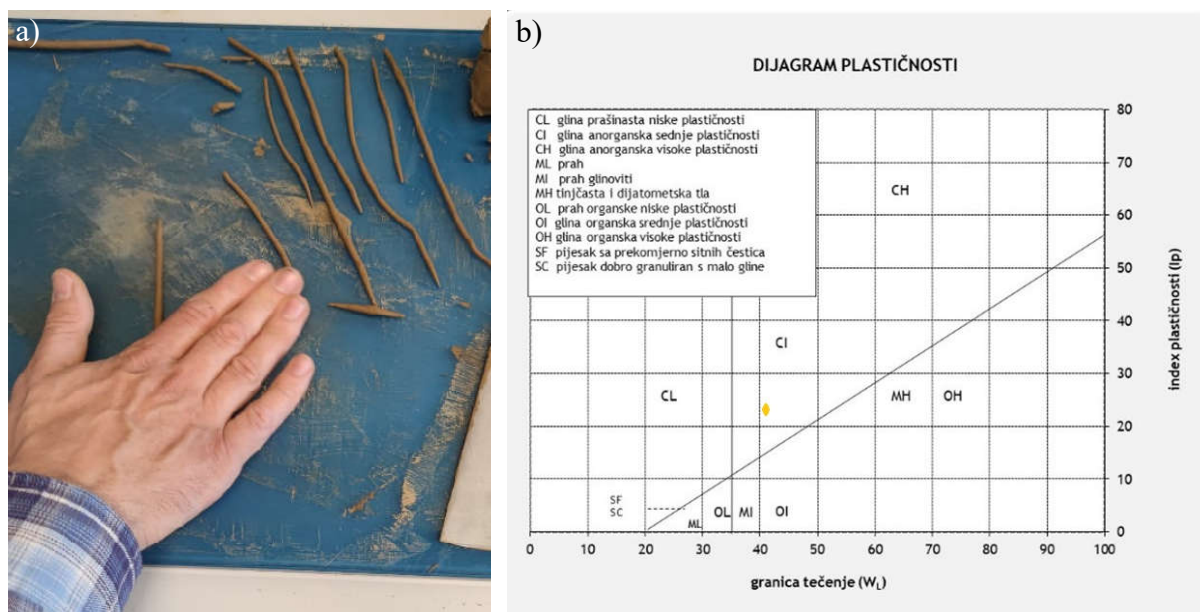
Slika 6-19 Određivanje granica tečenja: a) Casagrande-ov uređaj; b) ispitni uzorak

granicom plastičnosti i granicom tečenja [333]. Ove granice nazivaju se još i Atterberg-ovim granicama. Određivanje granica tečenja i plastičnosti provedeno je u skladu s normom HRN U.B1.020 [334]. Za određivanje granice tečenja korišten je Casagrande-ov uređaj (Slika 6-19 a). Uređaj se sastoji od ovalne zdjelice u koju se umeće vlažan uzorak u koji se utiskivanjem posebno oblikovanog noža oblikuje brazda širine 11 mm (Slika 6-19 b). Pokretanjem uređaja zdjelica kontinuirano pada s određene visine, a ispitivanje se prekida kada se brazda zatvori na duljini od približno 1 cm. Na uređaju se očitava broj udaraca. Opisani postupak proveden je pri četiri različite vlažnosti. Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 6-20. Na apscisi su nalaze vrijednosti broja udaraca, a na ordinati vlažnost pojedinog uzorka. Na dobivenoj se krivulji označi točka koja odgovara broju udaraca od 25. Vlažnost uzorka, koja odgovara toj točki je granica tečenja. Indeks tečenja ispitnog uzorka bio je 40,5%.



Slika 6-20 Određivanje granice tečenja

Granica plastičnosti određuje se valjanjem dijelova vlažnog uzorka u valjčiće (Slika 6-21 a). Valjanje počinje pri vlazi uzorka većoj od granice plastičnosti, a valjanje se provodi do debljine valjčića od 3 mm. Treba postići raspucavanje valjčića pri 3 mm debljine. Sve dok je u materijalu sadržaj vode iznad granice plastičnosti na valjčiću se neće pojaviti pukotine te je potrebno ponoviti postupak. Valjanje se zatim nastavlja uz povremeno gnječenje uzorka, pri čemu se smanjuje udio vlažnosti u uzorku. Nakon završetka pokusa, valjčići se izvažu, osuše te im se odredi udio vlage. Točnost rezultata opisanog postupka ovisi o osposobljenosti, iskustvu i pažnji ispitivača [335]. Granica plastičnosti ispitnog uzorka bila je 15,9%.



Slika 6-21 Određivanje granice plastičnosti: a) ručno valjanje valjčića; b) rezultati ispitivanja Granica plastičnosti i granica tečenja određuju raspon vlažnosti uzorka pri kojima se ponaša plastično. Indeks plastičnosti, izračunat je prema jednadžbi:

$$I_p = W_L - W_p \quad (4.14)$$

gdje su: I_p indeks plastičnosti (%); W_L granica tečenja (%); W_p granica plastičnosti (%). Indeks plastičnosti ispitnog uzorka iznosio je 24,6%. Prema dijagramu plastičnosti (Slika 6-21 b) dodani materijal je deklariran kao anorganska glina srednje plastičnosti.

6.3 Mješavine drobljenog kamenog i dodanog materijala

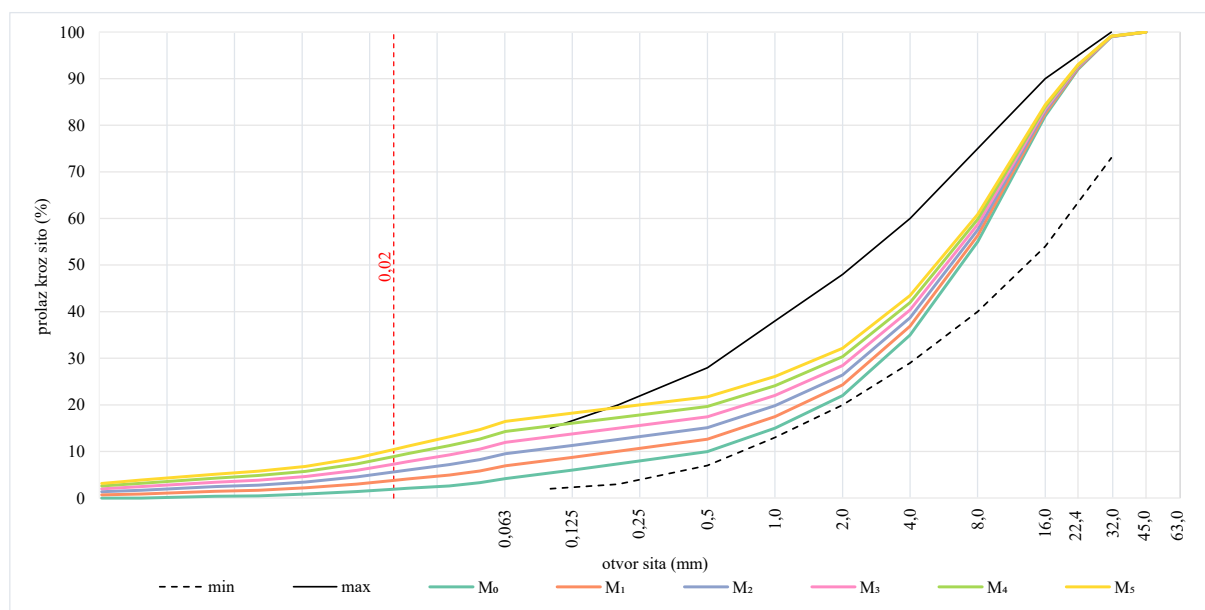
Drobljeni kameni materijal predstavljao je referentnu mješavinu M_0 kojoj se u različitim masenim udjelima dodavao dodani materijal. Dodani materijal doziran je u udjelima od 3 do 15% s korakom od 3% (Tablica 6-9).

Tablica 6-9 Udio dodanog sitnozrnatog materijala u pojedinoj mješavini

Oznaka mješavine	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
Udio dodanog materijala s obzirom na masu M_0 (%)	3	6	9	12	15

6.3.1 Analiza granulometrijskog sastava

U laboratoriju je izrađeno 5 mješavina od drobljenog kamenog materijala i dodanog materijala. Provedena je analiza granulometrijskog sastava istovjetnim postupcima kao u poglavlju 6.1.1. Rezultati granulometrijske analize prikazani su u prilogu 1 te na slici 6-22. Također, određen je maseni udio zrna promjera $\leq 0,02$ mm (Tablica 6-10). Mješavine M₀-M₄ nalaze se unutar prihvatljivog područja u pogledu granulometrijskog sastava. Međutim, samo mješavina M₀ zadovoljava u pogledu udjela sitnih zrna prema [313] te se isključivo ona smije primjenjivati za izradu MNS-a na javnim cestama.



Slika 6-22 analiza granulometrijskog sastava mješavina materijala

Tablica 6-10 Maseni udio zrna polumjera $\leq 0,02$ mm u pojedinoj mješavini materijala

Oznaka mješavine	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
Maseni udio zrna $R \leq 0,02$ mm (%)	1,900	3,802	5,597	7,293	8,898	10,419

6.3.2 Određivanje najveće suhe gustoće i optimalnog udjela vlage

Najveća suha gustoća uzorka i optimalni udio vlage pojedine mješavine određeni su modificiranim Proctorovim pokusom, prema normi HRN EN 13286-2:2010/Ispr [330] kao što je prikazano u poglavlju 6.1.10. Rezultati ispitivanja su prikazani prilogu 2.1 i u tablici 6-11. Vidljivo je da se suha gustoća povećavala s povećanjem udjela sitnih zrna do udjela od 7,293%. Dodatnim povećavanjem udjela sitnih zrna smanjuje se suha gustoća. Optimalni udio vlage kontinuirano se povećao s povećanjem udjela sitnih zrna.

Tablica 6-11 Najveća suhe gustoća i optimalni udio vlage za pojedine mješavine

Mješavina materijala	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
Najveća suha gustoća (Mg/m ³)	2,27	2,44	2,45	2,46	2,36	2,33
Optimalni udio vlage (%)	3,7	4,6	5,0	5,6	5,8	6,0

6.3.3 Ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti

Ispitivanje CBR mješavina materijala provedeno je u skladu s postupcima navedenim u poglavlju 6.1.11. Rezultati ispitivanja prikazani su u prilogu 2.2 i u tablici 6-12. Vidljivo je da se inicijalnim dodavanjem sitnog materijala povećava vrijednost CBR-a. Daljnjim povećavanjem udjela sitnog materijala vrijednost CBR-a se smanjuje. Mješavine materijala M₄ i M₅ imaju vrijednost CBR-a nižu od 80% te se prema [313] ne smiju promjenjivati na za izradu MNS-a.

Tablica 6-12 Vrijednosti CBR-a za pojedine mješavine materijala

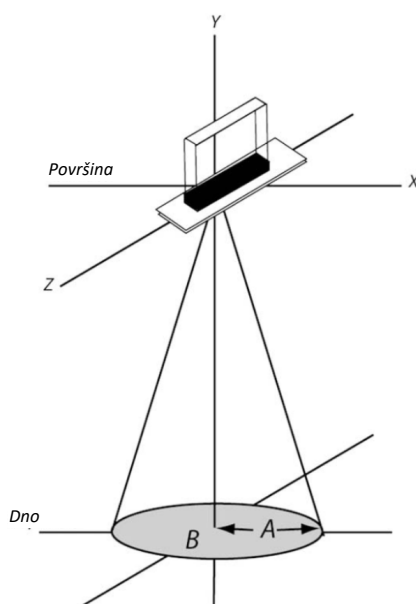
Mješavina materijala	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
CBR (%)	135	148	110	96	60	54

7 GLAVNA LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA

Glavna laboratorijska istraživanja provedena su s ciljem određivanja utjecaja promjene udjela sitnih zrna i vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti MNS-a. Kako bi se ostvario ovaj cilj određene su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti MNS-a pri različitim udjelima sitnih zrna i vlage primjenom GPR-a.

7.1 Odabir kalupa

Temeljem inicijalnog pregleda literature predviđena je izrada kalupa od polimerkrilata. Korištenjem polimerkrilata osiguralo bi se vizualno praćenje uzorka tijekom istraživanja i onemogućio utjecaj kalupa na širenje EM valova u uzorku. Planirane unutarnje dimenzije kalupa trebale su biti 50 x 80 x 30 cm. Međutim, nakon detaljnog pregleda literature i konzultiranja s proizvođačem GPR-a [336] zaključeno je da su navedene dimenzije nezadovoljavajuće u pogledu otiska antene (eng. footprint antenna i Fresnel zone). Otisak antene opisuje veličinu i oblik zračenja koji emitira GPR antena, a ovisi o tipu i frekvenciji antene, udaljenosti antene od površine uzorka, debljini uzorka i njegovoj relativnoj dielektričnoj permitivnosti [337–342]. Promjene dimenzije otiska antene najjednostavnije je objasniti usporedbom sa svjetlosnim snopom baterijske svjetiljke. Osvijetlimo li neku plohu te krenemo pomicati baterijsku svjetiljku mijenjat će se površina osvijetljenog područja. Približavanjem baterijske svjetiljke plohi osvijetljena površina će se smanjivati, dok će se udaljavanjem povećavati. Upravo zbog ovog efekta GPR-om prikupljeni podaci nisu prikupljeni samo u jednoj točki, koja se nalazi vertikalno ispod antene, kako se to često shematski prikazuje u literaturi. Jednadžbe za određivanje dimenzije A i B otiska ground-coupled antene (Slika 7-1)



Slika 7-1 Shematski prikaz otiska ground-coupled antene [343]

odredili su Annan i Cosway [344], a djelomično ih je modificirao Verdonck [337]. Dimenzije otiska antene A i B određuju se prema jednačbama:

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{d}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (7.1)$$

$$B = \frac{A}{2} \quad (7.2)$$

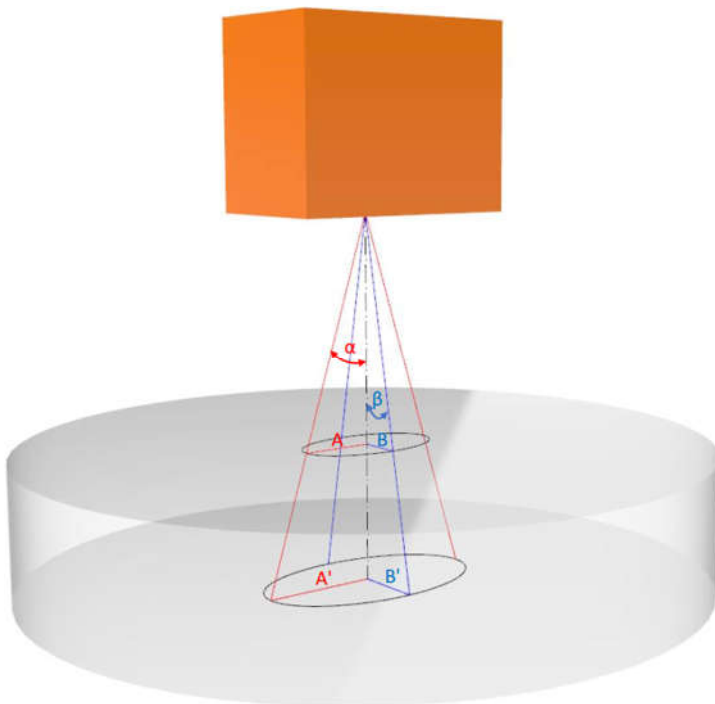
gdje su: λ valna duljina (m), d dubina (m); ϵ_r relativna dielektrična permitivnost medija. Frid i Frid [345] su u radu o naprednom prikupljanjem GPR podataka iz bespilotne letjelice objasnili postupak okvirnog izračunavanja otiska air-coupled antene. Dimenzija otiska A na površini terena (Slika 7-2) određena je jednačbom:

$$A = \frac{\lambda_1}{4} + \frac{\sqrt{h \cdot \lambda_1}}{2} \quad (7.3)$$

gdje su: h udaljenost između antene i površine terena (m); λ_1 valna duljina EM vala u zraku (m). Dimenzija otiska A' na nekoj dubini (Slika 7-2) određena je jednačbom:

$$A' = A + \frac{\sqrt{d \cdot \lambda_2}}{2} \quad (7.4)$$

gdje su: d debljina sloja (m); λ_2 valna duljina EM vala u sloju (m). U tablici 7-1 navedene su izračunate dimenzije otiska air-coupled antena nazivne frekvencije 1 i 2 GHz. Za izračun je pretpostavljeno da se antena nalazi 50 cm iznad uzorka, debljina uzorka je 30 cm, a vrijednost njegove relativne dielektrične permitivnosti je 5.

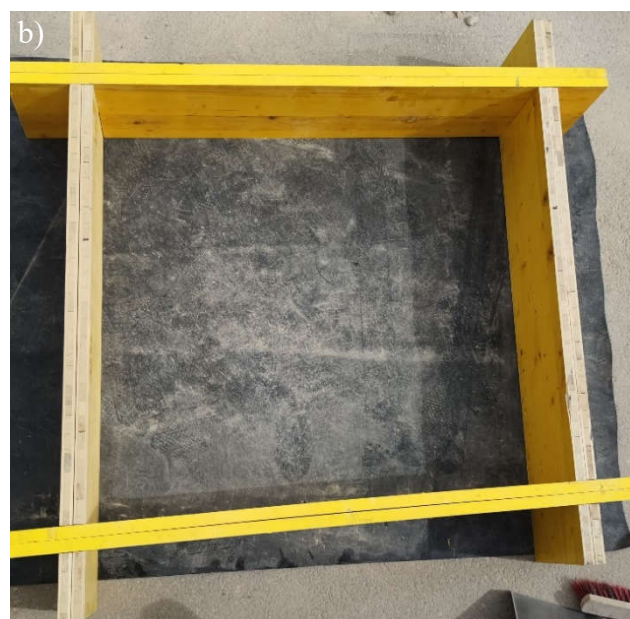


Slika 7-2 Shematski prikaz otiska air-coupled antene

Tablica 7-1 Dimenzije otiska air-coupled antena

Nazivna frekvencija antene	1 GHz	2 GHz
λ_1 (m)	0,30	0,15
λ_2 (m)	0,134	0,067
A (m)	0,269	0,174
A' (m)	0,369	0,245
B (m)	0,135	0,087
B' (m)	0,185	0,123

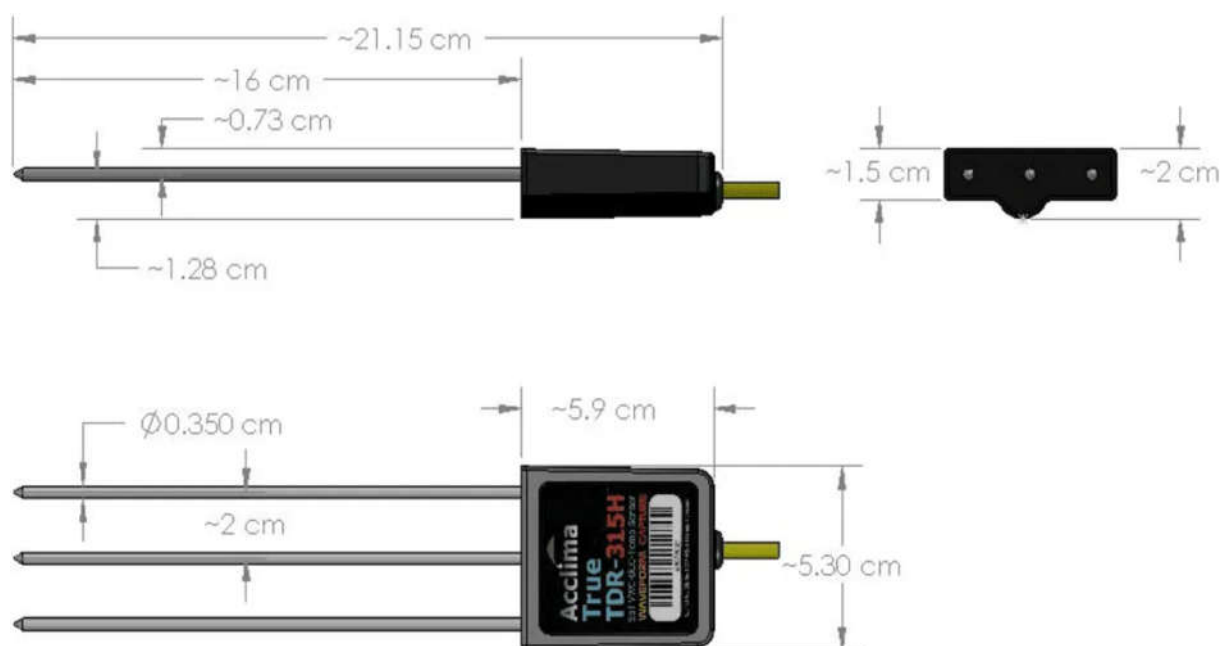
Uvažavajući sve prethodno navedeno, odabran je kalup koji se sastojao od PE 100 CPR 75-33 cijevi duple stijenke klase nosivosti SN 4 i dna napravljenog od HDPE ploče debljine 20 mm (Slika 7-3 a). Unutarnji promjer kalupa iznosio je 200 cm, a visina 60 cm. Nedostaci ovog kalupa ogledali su se u otežanoj manipulaciji (masa praznog kalupa iznosila je 295 kg), smanjenoj učinkovitosti zbijanja materijala zbog elastičnog dna te otežanom pražnjenju materijala iz kalupa nakon završetka ispitivanja. Stoga je kao konačno rješenje odabran kalup čije su stranice bile izrađene od troslojne opladne ploče debljine 2,7 cm (Slika 7-3 b). Svaku stranicu kalupa sačinjavale su dvije opladne ploče, a susjedne stranice međusobno su se spajale pomoću utora. Na ovaj način izbjegnuto je korištenje metalnih spojnih elemenata koji bi imali negativan utjecaj na prikupljanje podataka GPR-om, a ujedno je omogućena jednostavna demontaža stranica i pražnjenje kalupa nakon provedbe ispitivanja. Unutarnje dimenzije kalupa iznosile su 110 x 120 x 30 cm. Kalup nije imao čvrsto dno već se postavljao na vodonepropusnu membranu koja je sprječavala gubitak vlage iz uzorka. Ispod vodonepropusne membrane postavljena je aluminijska ploča debljine 3 mm s ciljem osiguranja potpune refleksije EM valova.



Slika 7-3 Kalupi: a) izrađen od PE cijevi s dnom od HDPE ploče; b) izrađen od oplatnih ploča

7.2 Odabir metode za određivanje vlage

Prvotno je planirano određivanje udjela vlage pomoću TDR-a. U preliminarnim istraživanjima korištena je centralna TDR jedinica SDI-12 s tri sonde TDR-315H proizvođača Acclima (Slika 5-1). Centralna jedinica omogućuje povezivanje s jednom sondom putem kabela te prikaz i pohranu podataka u stvarnom vremenu. Sonda TDR-315H (Slika 7-4) sastoji se od tri šipke duljine 16 cm izrađene od nehrđajućeg čelika. Dizajn sonde omogućuje jednostavnu instalaciju u uzorak te brzo i precizno određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, električne provodnosti, temperature i volumnog udjela vode u uzorku. Njene najvažnije tehničke karakteristike prikazane su u tablici 7-2. S obzirom da su uzorci izrađeni od kamenog materijala sonda nije bilo moguće zabosti u uzorak, a isto tako bilo je nemoguće izbušiti rupe u koje bi se umetnule šipke sonde. Stoga su sonde postavljene u uzorak za vrijeme ugradnje materijala (Slika 7-5). Sonde su postavljene u horizontalnom položaju na tri različite pozicije na dubinama 5, 15 i 25 cm. Na ovaj je način omogućilo se praćenje eventualnih promjena udjela vlage po dubini uzorka. Očitane vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, unutar pojedinačnog uzorka, značajno su razlikovale ovisno o poziciji sonde. Pažljivim otkopavanjem sondi primijećena je segregacija materijala i pojava šupljina u području šipki sonde. Granulometrijski sastav materijala i fotografije njegove ugradnje poslane su predstavnicima proizvođača TDR-a. Ustvrdili su [346] da materijal ima previše zrna čije su dimenzije veće od razmaka između šipki sonde te da zbog toga dolazi do pojave segregacije i šupljina. Naglasili su da šupljine koje se pojavljuju duž šipki sonde, ovisno o tome jesu li ispunjene zrakom ili vodom, mogu značajno povećati ili sniziti očitanu vrijednost relativne dielektrične



Slika 7-4 Dimenzije sonde TDR-315H [347]

Tablica 7-2 Parametri koji se mogu odrediti sandom TDR-315H [347]

Parametar	Najmanja vrijednost	Najveća vrijednost
relativna dielektrična permitivnost		
raspon	1	85
točnost	-2	2
električna provodnost		
-raspon ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0	2000
točnost (%)	-2,5	2,5
volumni udio vlage		
raspon (%)	0	100
točnost (%)	-2	2
temperatura		
raspon ($^{\circ}\text{C}$)	-40	55
točnost ($^{\circ}\text{C}$)	-0,5	0,5

permitivnosti te da uređaj nije pogodan za ovakav tip materijala. Pregledom dostupnih komercijalnih sonda nije pronađen model koji bi imao adekvatan razmak između šipki. Drugi nedostatak primjene TDR-a predstavljala je činjenica da se njime određuju volumni udjeli vlage u materijalu. U svim prethodnim laboratorijskim istraživanjima norme propisuju korištenje gravimetrijskog udjela vlage, koji podrazumijeva maseno izražavanje udjela vlage u usporedbi s masom suhog uzorka. Zbog spomenutih nedostataka odustalo se od primjene TDR-a te je odlučeno da će se vlaga određivati gravimetrijskom metodom. Ova metoda smatra se najtočnijom za određivanja udjela vlage u materijalu [348,349]. Sam postupak provođenja gravimetrijske metode objašnjen je u normi HRN EN 1097-5 [350].



Slika 7-5 Instalacija TDR sonda: a) postavljanje sonde na određenoj dubini; b) primarno ručno zbijanje; c) uzorak s tri ugrađene sonde

7.3 Postupak izrade uzoraka

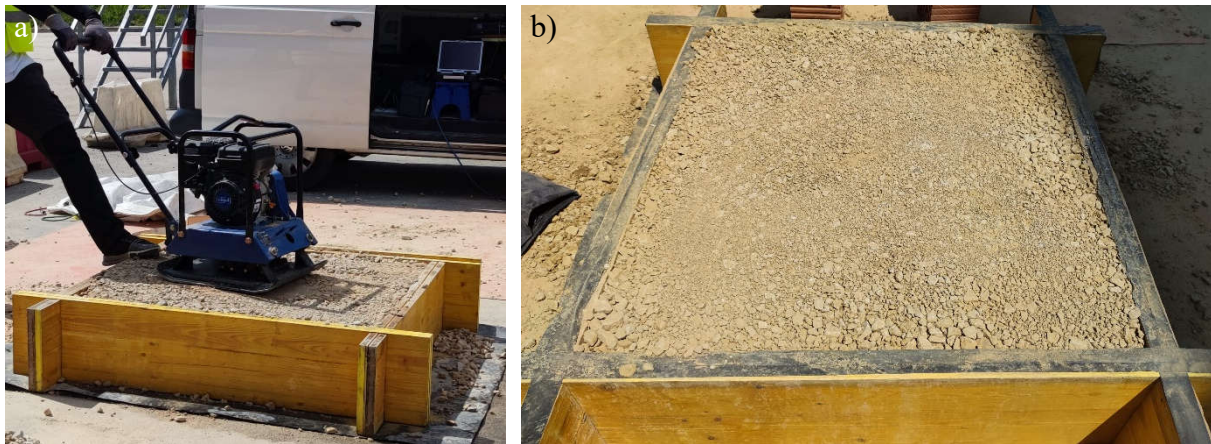
Izrada uzoraka započela je pripremom sastavnih materijala. Za pojedini uzorak, ovisno o udjelu dodane gline, bilo je potrebno između 820 i 900 kg drobljenog kamenog materijala. Usitnjena glina osušena je u sušioniku, a drobljeni kameni materijal sušio se direktnim izlaganjem sunčevu zračenju jer količine potrebne za izradu uzoraka nije bilo moguće osušiti u dostupnim

sušionicama u laboratoriju. Početni udio vlage u kamenom materijalu određen je u skladu s normom HRN EN 1097-5 [350]. Nakon sušenja kameni materijal transportiran je građevinskom kombinirkom do kolne vage pomoću koje mu je određena masa. Na mjestu pripreme uzoraka materijal je istovaren na sloj vodonepropusne membrane gdje je ručno izmiješan i ravnomjerno raspoređen (Slika 7-6). Sukladno prethodnim laboratorijskim istraživanjima korišteno je šest tipova mješavina drobljenog kamena i dodanog materijala, M_0 - M_5 , koje su se međusobno razlikovale po udjelu dodanog materijala od 0 do 15%, korak od 3%. Dodani materijal je dodavan s obzirom na masu suhog drobljenog kamena. Nakon dodavanja dodanog materijala ponovljen je proces miješanja. Voda je dozirana s obzirom na masu mješavine drobljenog kamena i gline. Korištena je kišnica jer za razliku od vode iz javnog vodovoda sadrži manje otopljenih minerala [351] koji bi mogli imati eventualni utjecaj na širenje EM valova u sloju. Najveći udio vlage razlikovao se kod svih mješavina, a definiran je na temelju laboratorijski određene optimalne vlažnosti, ugradljivosti uzorka i postignutog stupanja zbijenosti. Voda je nanesena ravnomjerno po cijeloj površini uzorka. Nakon dodavanja vode materijal je ponovno izmiješan te je prekriven PVC folijom do trenutka ugradnje u kalup kako bi se spriječilo isparavanje. Za svaku razinu vlažnosti pojedine mješavine materijala pripremljena su i ispitana po tri uzorka te ih je ukupno bilo 108. Nakon ubacivanja mješavine u kalup pristupilo se zbijanju pomoću vibro ploče. Korištena je vibro ploča proizvođača Scheppach snage motora 4,8 kW koja je pogodna za zbijanje slojeva debljine do 35 cm (Slika 7-7). Nakon završetka zbijanja pomoću aluminijske letve provjerena je visina uzorka u uzdužnom i poprečnom smjeru. Svi uzorci bili su visine 30 cm. Površina uzorka prekrivena je PVC folijom kako bi se spriječio nepovoljan utjecaj atmosferilija te se pristupilo prikupljanju podataka GPR-om. Nakon završetka prikupljanja podataka GPR-om određen su dinamički modul deformacije i stupanj



Slika 7-6 Priprema materijala za ugradnju u kalup

zbijenosti uzorka (Poglavlje 7.5) te su uzeti uzorci za određivanje udjela vlage i analizu granulometrijskog sastava. Ostatak uzorak izvađen je iz kalupa, a kalup i podloga na koju se postavlja kalup detaljno su očišćeni i pripremljeni za nastavak istraživanja.



Slika 7-7 Izrada uzorka: a) zbijanje uzorka; b) uzorak nakon zbijanja

7.4 Prikupljanje i obrada GPR podataka

U provedbi ovog istraživanja korišten je GPR proizvođača GSSI, a sastojao se od: centralne jedinice SIR 20, prijenosnog računala i dvije antene (Slika 7-8). Ova centralna jedinica omogućava istodobno korištenje dvije air-coupled ili ground-coupled antene [352]. Antene korištene u ovom ispitivanju su air-coupled. Model 4108 ima nazivnu frekvencije 1 GHz, dok je nazivna frekvencija modela 4105 2 GHz. Antene su postavljene na drveni nosač, a udaljenost između dna antene i površine uzorka bila je 49 cm, što je u skladu s preporukama proizvođača (46-51 cm). U blizini antene nije bilo značajnijih metalnih objekata ili predmeta koji su mogli utjecati na širenje EM valova. Prije početka prikupljanja podataka korištenjem određenih parametara i filtera (Tablica 7-3) optimizirana je vidljivost i oblik reflektiranog EM



Slika 7-8 Centralna jedinica SIR 20 i antene 4105 i 4108 proizvođača GSSI



Slika 7-9 Air-coupled antena za vrijeme kalibracije

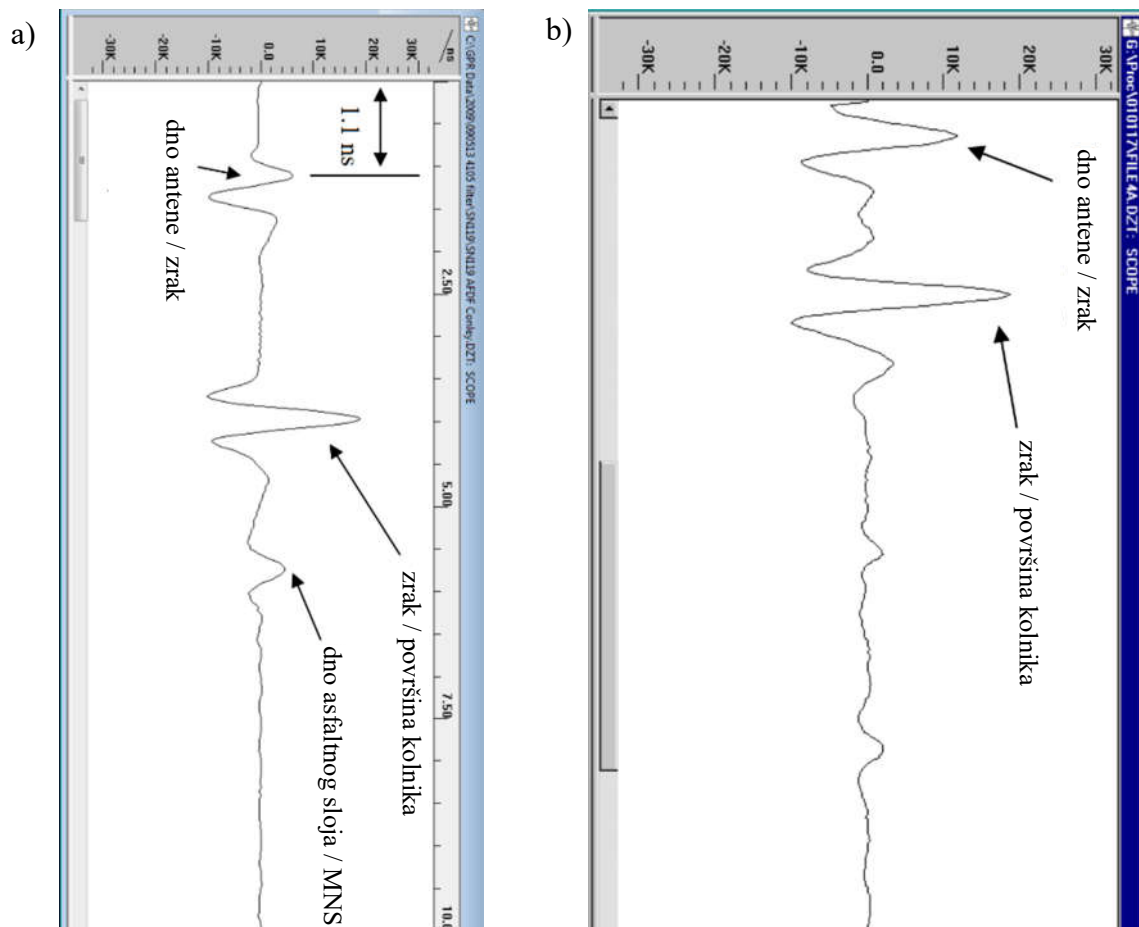
vala, tzv. A-sken. Parametrom Position kontrolira se, u nanosekundama, trajanje vremenskog odsječka tijekom kojeg sustav prikuplja podatke. Zadana vertikalna skala predstavlja povratno vrijeme reflektiranog EM vala. Parametar Range određuje dubinu širenja EM valova u medij. Većom vrijednosti Range-a definira se prikupljanje podataka na većoj dubini. Međutim najveća dubina širenja EM valova ne ovisi samo o postavkama već i vrijednostima relativne dielektrične permitivnosti i električne provodnosti medija pa stvarna dubina može biti niža od one definirane Range-om. Parametar Gain omogućava pojačavanje signala bez slanja dodatne energije iz antene. Gain je ključan za pravilnu interpretaciju podataka jer poboljšava slabije refleksije koje su uzorkovane dubinom prikupljanja podataka ili relativnom malom razlikom između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti dva susjedna medija. To omogućuje bolju vidljivost refleksija prilikom interpretacije i analize podataka. Korištenje parametra Gain zahtijeva određenu praksu, jer preveliko pojačanje može dovesti do zasićenja signala i gubitka važnih informacija, a s druge pak strane premalo pojačanje rezultirati slabom vidljivošću. Ključ

Tablica 7-3 Parametri i filteri korišteni u provedbi glavnih laboratorijskih istraživanja

Parametri i filteri	Variable	Antena 1 GHz	Antena 2 GHz
Position/Range	Pozicija (ns)	95,0	96,7
	Raspon (ns)	20,0	15,0
Gain	Točka	1	1
	Broj točaka	1	1
	Vrijednost	12	17
FIR filter	Low	3000	4000
	High	250	500
	Tip filtera	boxcar	boxcar
IIR filter	HLP	0	0
	HHP	0	0
	VLP	0	0
	VHP	0	0

za točnu interpretaciju prikupljenih podataka leži u optimalnom podešavanju parametra Gain [163]. FIR (eng. finite impulse Response) i IIR (infinite impulse response) su dva tipa digitalnih filtera koji se koriste za uklanjanje neželjenog visokofrekventnog i niskofrekventnog šuma. Kada su parametri i filteri ispravno podešeni izgledi A-skenova slični su onima na slici 7-10. Prije početka prikupljanja podataka antene su uključene te su radile približno 40 minuta kako bi se zagrijale, odnosno dok se na zaslonu računala ne uoči da su se amplitude i povratno vrijeme signala dovoljno ustalili. Za kalibraciju antena korištena je aluminijska ploča debljine 3 mm koja je postavljena na površinu uzorka (Slika 7-9). Prikupljanje podataka izvršeno je u stacionarnom modu korištenjem računalnog programa SIR-20 [352]. Na svakom uzorku GPR podaci su prikupljeni u uzdužnom i poprečnom smjeru kako bi se u obzir uzeo utjecaj orijentacije antene. Obrada i interpretacija prikupljenih GPR podataka izvršena je u računalnom programu RADAN 6.6 u skladu s priručnikom [353]. Refleksije EM valova na granicama različitih medija vizualno su identificirane na B-skenu. Veći dielektrični kontrasti između medija podrazumijevaju izraženiju refleksiju EM valova. Kao što je prikazano na slici 3-4, kontinuirana jaka refleksija definira očiglednu granicu između sloja zraka i uzorka. Također, refleksija je bila izražena između uzorka i aluminijske ploče postavljene na dnu uzorka. Debljina sloja određena je ručnim postupkom, kontroliranom poluautomatskom interpretacijom na temelju pronalaska najvećih amplitude reflektiranih EM valova. Interpretacijom GPR podataka povratno vrijeme reflektiranog EM vala određeno u nanosekundama se transformiralo u debljinu uzorka izraženu u metrima [165]. Interpretacija je napravljena korištenjem dvije metode kalibracije SRM i KHM. Rezultati temeljeni na SRM kalibraciji pokazali su značajno odstupanje određene debljine uzorka u usporedbi sa njegovom stvarnom debljinom. Pregledom literature ustanovljeno je da su i drugi istraživači zaključili da SRM metoda nije pouzdana ako se primjenjuje na uzorcima od drobljenog kamenog materijala. Clark i suradnici [26] ističu da nejednoliko zbijanje uzoraka kao i nepravilna veličina te oblik zrna unutar sloja od kamenog materijala raspršenje EM valove tijekom prikupljanja GPR podataka. Ako je valna duljina manja ili neznatno veća od prosječnih dimenzija zrna, mogu se pojaviti šumovi. Stoga autori preporučuju korištenje antene s nižom vrijednosti nazivne frekvencije. Do sličnih saznanja došli su Benedetto i suradnici [254]. Oni smatraju da je veličina i nepravilan oblik zrna materijala te postavke same SRM glavni uzrok zbog kojeg vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene SRM-om nisu u skladu s vrijednostima koje su određene metodom biranja signala u vremenskoj domeni (eng. time domain signal picking- TDSP). S druge pak strane vrijednosti određene TDSP-om podudarale su se s vrijednostima određenim pomoću volumetrijske formule mješavine (eng. volumetric mixing formula- VMF) zasnovane na teorijskom

višefaznom modeliranju. Saarenketo [29] tvrdi da SRM nije prikladna za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti sloja zastorne prizme. Potencijalni razlozi za to su heterogenost drobljenog kamenog materijala i izražena površinska refleksija. Sloj od nevezanog kamenog materijala ima neujednačenu i nepravilnu strukturu koja uzrokuje difuznu refleksiju EM valova. Time se otežava dobivanje jasnih refleksija potrebnih za točnu interpretaciju podataka. Do identičnog zaključka došli su Artagan i Borecky [207]. Naime, rezultati njihova ispitivanja pokazali su da se primjenom SRM-a postižu za približno 14% niže vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti u usporedbi s KHM i CRIM. Tosti i suradnici [354,355] ističu da uporaba SRM-e nije prikladna za određivanje relativne dielektrične permitivnosti zastorne prizme jer nije ostvarena glavna pretpostavke na kojoj se bazira SRM, a to je homogenost materijala u sloju. Također, veća osjetljivosti SRM-a na hrapavost površine sloja rezultira nezadovoljavajućim vrijednostima relativnih dielektričnih permitivnosti. Uvažavajući spoznaje drugih znanstvenika i vlastite rezultate inicijalnih istraživanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene su KHM-om.



Slika 7-10 Ispravan izgled A-skena [356]: a) antena 2 GHz; b) antena 1 GHz

7.5 Određivanje dinamičkog modula deformacije i stupnja zbijenosti

Nakon završetka prikupljanja podataka GPR-om određeni su dinamički modul deformacije i stupanj zbijenosti uzorka. Za određivanje dinamičkog modula deformacije korištena je dinamička ploča (eng. light weight deflectometer- LWD) ZFG 3.0 proizvođača Zorn instruments (Slika 7-11). LWD se sastoji od podnožne ploče promjera 30 cm sa senzorom, opruge, utega mase 10 kg, šipke poznate visine niz koju pada uteg, ručke s otpusnom polugom te kontrolne jedinice za obradu i pohranu rezultata mjerenja. Mjerenje je provedeno prema normi TSC 06.720 [357]. Dubina mjerenja iznosi približno 60 cm, tj. jednaka je dvostrukom promjeru podnožne ploče [358]. Ispitivanju prethodi predopterećenje sloja koje se izvodi s tri pada utega. Zatim se uključi kontrolna jedinica te se na podnožnu ploču uteg ispusti tri puta. Za svako ispuštanje utega uređaj određuje amplitudu slijeganja. Na temelju srednje vrijednosti amplitude slijeganja izračunava se vrijednost dinamičkog modula deformacije:

$$E_{vd}=0,75 \cdot \frac{p}{s} \cdot D \quad (8.5)$$

gdje su: E_{vd} dinamički modul deformacije (MN/m^2); p najveći pritisak na površinu koji se ostvari pri padu utega (100 kPa); s slijeganje ploče (mm); D promjer podnožne ploče (300 mm).



Slika 7-11 Dinamička ploča

Stupanj zbijenosti određen je usporedbom najveće suhe gustoće pri optimalnoj vlažnosti s gustoćom uzorka. Prvi korak bio je određivanje volumena primjenom volumometra u skladu s normom HRN EN ISO 18125-2 [359]. Na površinu uzorka položena je podnožna ploča prstenastog oblika poznate površine otvora (Slika 7-12 a). Unutar otvora iskopan je površinski dio uzorka dubine 5 cm. Ostaci iskopanog materijala uklonjeni su prikladnim alatom. Na podnožnu ploču postavljen je volumometar te je guranjem klipa balon priljubljen uz površinu uzorka. Na mjernoj skali očitana je nulta vrijednost $L_{0,1}$. Zatim je uređaj zaokrenut u lijevo i

desno za 120° te su očitane vrijednosti $L_{0,2}$ i $L_{0,3}$. Postupkom s tri očitavanja postigla se veća pouzdanost ispitivanja. Očitavanje L_0 predstavlja srednju vrijednost očitavanja $L_{0,1}$, $L_{0,2}$ i $L_{0,3}$. Nakon nultog očitavanja uređaj je uklonjen s podnožne ploče te je iskopana rupa do dna uzorka pazeći da se podnožna ploča ne pomakne (Slika 7-12 b). Iskopani materijal se pohranio u vodonepropusnu vrećicu te je u laboratoriju određena vlažnost i masa iskopanog materijala. Volumometar se potom ponovno postavio na podnožnu ploču, balon se utisnuo i iskopanu rupu na ranije opisani način (Slika 7-12 c) te je izračunata vrijednost L_1 koja predstavlja srednju vrijednost očitavanja $L_{1,1}$, $L_{1,2}$ i $L_{1,3}$. Na temelju razlike očitavanja L_1 i L_0 te površine otvora podnožne ploče izračunat je volumen rupe koji se reducira s obzirom na udio vlage u uzorku. Kada je određen reducirani volumen i masa suhog materijala koji je iskopan iz uzorka izračunala se gustoća uzorka. Dijeljenjem gustoće uzorka s najvećom suhom gustoćom izračunat je stupanj zbijenosti.

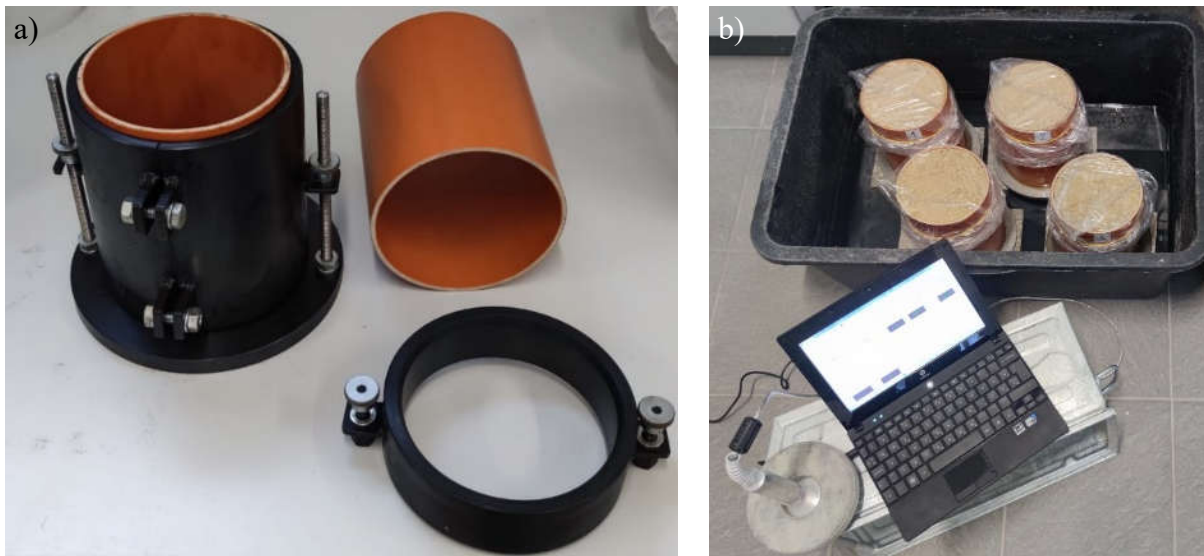


Slika 7-12 Određivanje volumena volumometrom: a) podnožna ploča, b) rupa u koju se utiskuje balon; c) volumometar

7.6 Provođenje Tube suction test-a

Za svaku mješavinu izrađena su po dva ispitna uzorka za TST. Mješavine su pri optimalnoj vlažnosti ugrađene u PVC-e podkalupe promjera 160 mm i visine 200 mm (Slika 7-13). Uzorci su zbijeni u skladu s preporukama za provedbu modificiranog Proctorovog pokusa s tim da je zbog visine kalupa zbijanje provedeno u šest slojeva. Prije provođenja TST-a uzorci su osušeni u sušioniku do postizanja konstante mase (cca 96 sati) na temperaturi od 45°C . Na dno plastične posude postavljeni su betonski podlošci kvadratnog oblika na koje su postavljeni perforirani diskovi s uzorcima. Na ovaj način omogućen je nesmetan dotok vode s donje strane uzorka. Gubitak sitnozrnatog materijala iz uzorka spriječen je korištenjem filter papira. Razina destilirane vode mjerena od dna uzorka iznosila je 1 cm. Površina uzoraka zaštićena je od utjecaja vlage PVC vrećicom. U ispitivanju je korišten Adek-ov sustav s DSF (digital surface

fixed frequency) sondom. Očitavanja su provedena na gornjoj površini uzorka na način da je pet vrijednosti očitano po rubu uzorka i jedan u sredini. Odbačene su najmanja i najveća vrijednost, a s preostale četiri vrijednosti izračunata je aritmetička sredina. Prvo očitavanje provedeno je na potpuno suhim uzorcima. Drugo očitavanje izvršeno je nakon 12 sati od postavljanja uzoraka u vodu. Vremenski razmak između narednih očitavanja iznosio je 24 sata.



Slika 7-13 Tube suction test: a) kalup i podkalup za izradu uzorka; b) izvođenje istraživanja

7.7 Rezultati glavnih laboratorijskih istraživanja

Nakon provedbe glavnih laboratorijskih istraživanja obrađeni su i analizirani prikupljeni podaci. Temeljem provedene analize određena su fizikalno-mehanička i elektromagnetska svojstva uzoraka te su prikazani rezultati TST-a. Od fizikalno-mehanička svojstva razmatrani su granulometrijski sastav, udio vlage, stupanj zbijenosti te dinamički modul deformacije. Elektromagnetna svojstva obuhvaćala su određivanje brzina EM vala u uzorku te vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzorka.

7.7.1 Fizikalno-mehanička svojstva mješavina materijala

Rezultati analize granulometrijskog sastava prikazani su u prilogu 3. Usporedbom s rezultatima prethodnih laboratorijskih istraživanja kod svih mješavina (Slika 6-22) uočena je razlika u pojedinačnom prolasku materijala kroz određene veličine otvora sita. Najznačajnije smanjenje prolaza materijala zabilježeno je na sitima otvora 31,5 i 22,5 mm. Smanjenje prolaza zrna je na oba sita iznosilo približno 30%. S druge pak strane, kod svih mješavina, uočen je povećan pojedinačni prolaz zrna na sitima veličine otvora 8 i 2 mm. Na situ veličine otvora 2 mm prolaz materijala se povećao za 40%, dok je na situ veličine otvora 8 mm povećanje iznosilo 10%. Razlike u granulometrijskom sastavu upućuju na djelomično predrobljavanje krupnijih zrna prilikom zbijanja uzoraka vibro pločom. Udio sitnih zrna u pojedinom uzorku prikazan je u

prilogu 3, a prosječne vrijednosti za pojedinu mješavinu navedene su tablici 7-4. Također, kao rezultat predrobljavanja zrna prilikom zbijanja uzorka uočeno je povećanje udjela sitnih zrna.

Tablica 7-4 Srednja vrijednost udjela sitnih zrna za pojedine mješavine materijala

Mješavina	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
Srednja vrijednost udjela sitnih zrna (%)	3,045	5,152	6,889	8,308	9,531	11,515
Koeficijent varijacije (%)	0,409	1,390	1,297	1,548	1,039	1,726

Udio vlage određen je za svaki uzorak te je naveden u prilogu 4. Kao što je prethodno navedeno kod svake mješavine materijala varirano je šest različitih udjela vlage. Za svaki udio vlage izrađena su po tri uzorka, a srednje vrijednosti udjela vlage prikazane su u tablici 7-5.

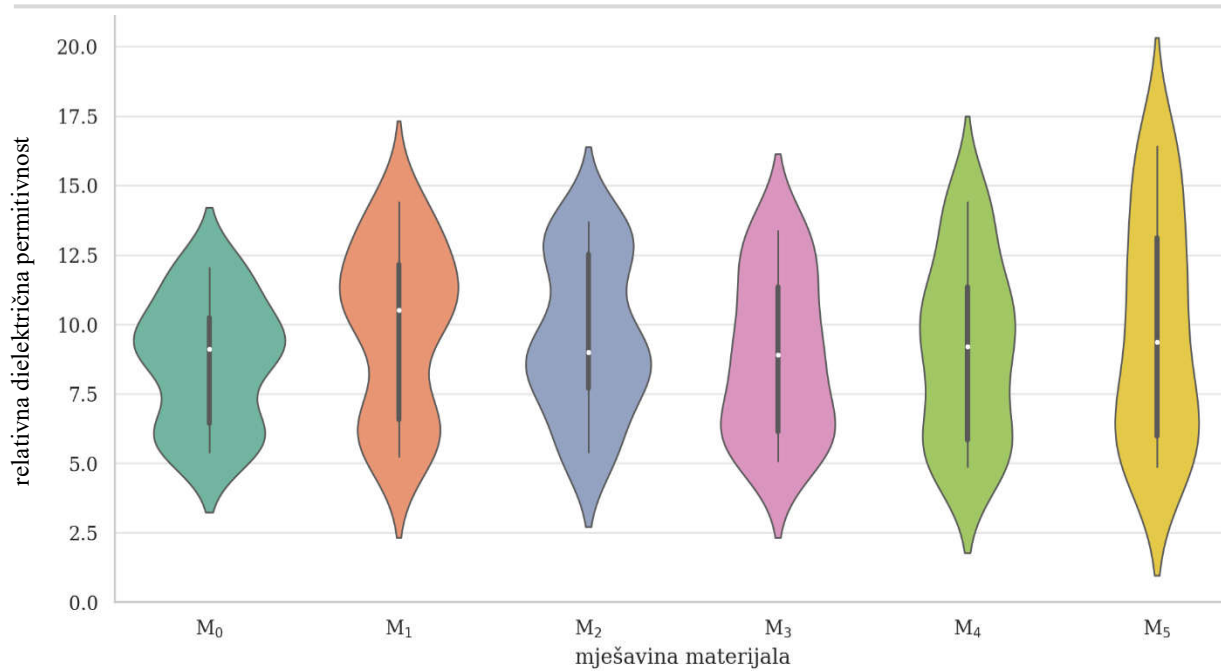
Tablica 7-5 Srednje vrijednosti udjela vlage za pojedine mješavine materijala

Mješavina	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
Srednja vrijednost 1. udjela vlage (%)	0,04	0,09	0,06	0,03	1,14	0,38
Srednja vrijednost 2. udjela vlage (%)	1,23	1,75	1,45	1,38	2,33	2,83
Srednja vrijednost 3. udjela vlage (%)	3,13	3,82	3,07	2,82	3,04	4,55
Srednja vrijednost 4. udjela vlage (%)	3,53	4,65	4,17	3,65	5,26	5,77
Srednja vrijednost 5. udjela vlage (%)	4,29	5,20	5,61	5,84	6,39	6,87
Srednja vrijednost 6. udjela vlage (%)	4,98	5,77	5,84	6,21	7,28	8,17

Rezultati određivanja stupnja zbijenosti navedeni su u prilogu 4. Vidljivo je da je u gotovo svim slučajevima postignuta najveća zbijenost uzorka. Izuzetak su uzorci s najnižim udjelom vlage, odnosno uzorci kod kojih je udio vlage bio znatno veći od optimalnog udjela ili uzorci s visokim udjelom sitnih zrna. Usprkos zadovoljavajućoj zbijenosti većine uzoraka, rezultati ispitivanja dinamičkog stupnja zbijenosti nisu pokazali nikakav trend (Prilog 4). Uzrok za to ogleda se u činjenici da se uzorci izvedeni na 3 mm debeloj aluminijskoj ploči ispod koje se nalazila kolnička konstrukcija. Kao što je već prethodno spomenuto na rezultate ispitivanja koja se provede dinamičkom pločom utjecaj imaju slojevi do dubine od otprilike 60 cm mjereno od površine na kojoj se nalazi uređaj. U svakom slučaju evidentno je da su najmanji dinamički stupnjevi zbijenosti dobiveni u slučaju uzoraka s visokim udjelom sitnih zrna i vlage.

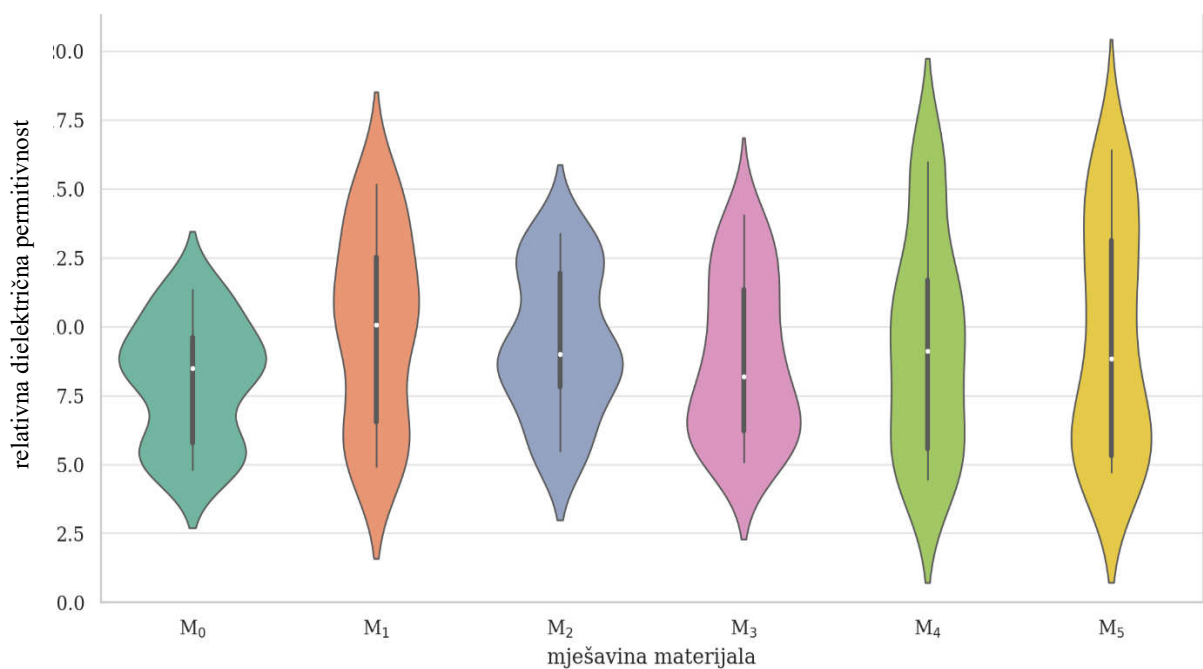
7.7.2 Elektromagnetska svojstva mješavina materijala

Brzine prolaska EM valova kroz pojedini uzorak navedene su u prilogu 5. Analizom rezultata uočeno je da se brzina EM valova smanjuje s povećanjem udjela vlažnosti. Približno jednake vrijednosti brzina EM valova postignute su pri poprečnoj i uzdužnoj orijentaciji antene. S obzirom na brzinu EM valova izračunate su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti pojedinog uzorka. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti prikazane su u prilogu 6. Također, u prilogu 6 su navedeni rezultati deskriptivne statističke analize. Međusobna, statistička usporedba mješavina prikazana je na slikama 7-14 i 7-15. Violina dijagram pruža sve podatke kao dijagram pravokutnika (eng. box-and-whisker plot) s tim da dodatno



Slika 7-14 Distribucija vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 1 GHz

omogućava uvid u gustoću pojedinih vrijednosti u uzorku. Širi dijelovi dijagrama predstavljaju veću učestalost neke vrijednosti u promatranom skupu podataka. U slučaju vrijednosti relativnih dielektričnih permitivnosti određenih temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, analizom dijagrama vidljivo je da mješavina materijala M₅ u usporedbi s preostalim mješavinama pokazuje izraženiju varijabilnost s obzirom na najširi interkvartilni raspon (Slika 7-14). Nasuprotno tome, mješavina M₀ pokazuje najmanju varijabilnost indiciranu užim interkvartilnim rasponom. Analiza simetričnosti distribucije



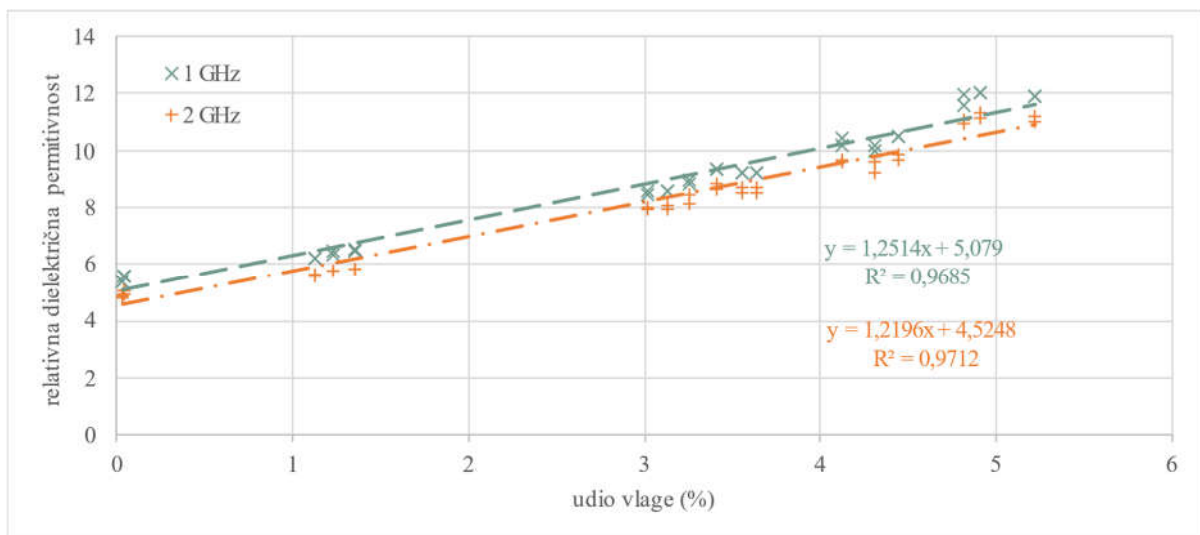
Slika 7-15 Distribucija vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 2 GHz

pokazuje da mješavina M_5 ima relativno simetričnu distribuciju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, s medijanama koji su centralizirani unutar interkvartilnog raspona. To ukazuje na ravnomjernu rasprostranjenost podataka oko središnje vrijednosti. Isti trendovi uočeni su i za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene na temelju podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz (Slika 7-15). U oba primjera, netipične vrijednosti (eng. outliers) relativne dielektrične permitivnosti nisu zabilježane.

7.7.3 *Elektromagnetska svojstva mješavina materijala- utjecaj vlage*

Sljedeći korak bio je zasebna analiza pojedine mješavine materijala. Cilj je bio definirati kako promjena udjela vlage utječe na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. U statističkoj analizi svake mješavine korišteno je ukupno 36 setova podataka. Na svakom uzorku prikupljena su po dva seta podataka, jedan u uzdužnom smjeru uzorka, a drugi u poprečnom smjeru. Svaki set podataka sastojao se od udjela vlage i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti.

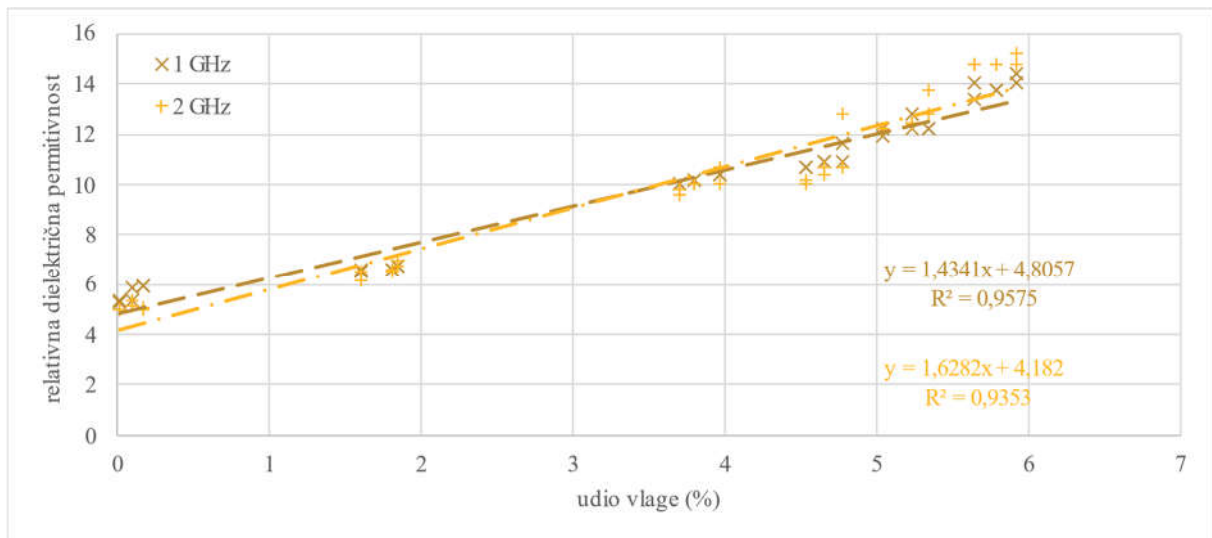
Kod mješavine materijala M_0 (Slika 7-16) povećanjem udjela vlage s 0,04 na 4,98% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, koja je određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, povećala se s 5,401 na 12,034. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz, povećala se s 4,807 na 11,343 prilikom promjene udjela vlage s 0,03 na 4,91%. U oba slučaja opažen je linearni trend s koeficijentom determinacije 0,97.



Slika 7-16 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_0

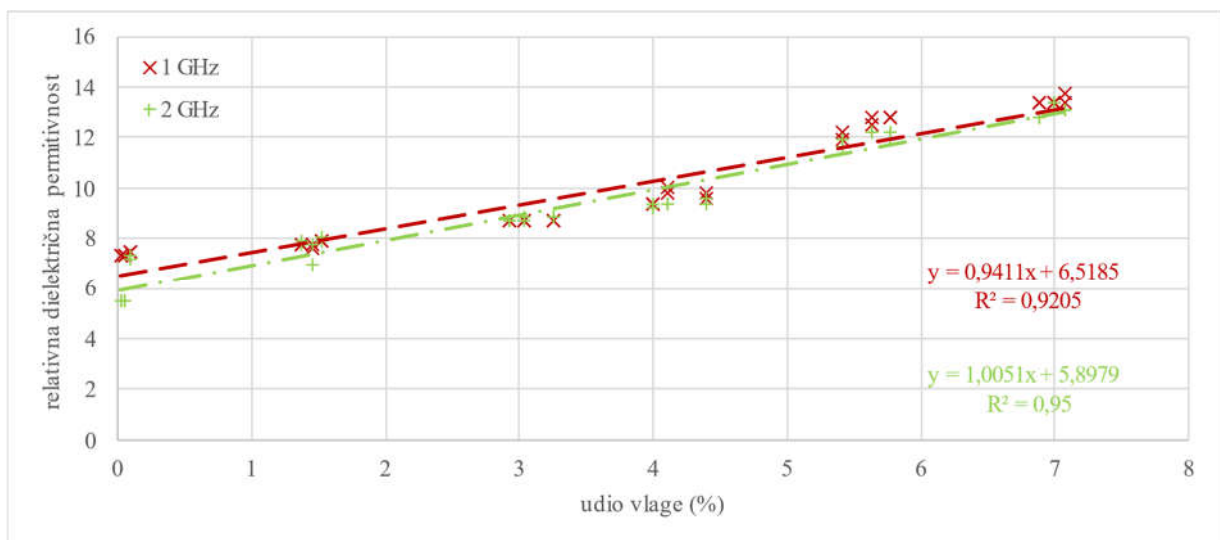
U slučaju mješavine M_1 (Slika 7-17) povećanjem udjela vlage s 0,01 na 5,91% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, povećala se linearno s 5,237 na 14,401. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne

frekvencije 2 GHz, povećala se linearno s 4,931 na 15,159. Koeficijent determinacije iznosio je 0,96 za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz. Odnosno 0,94, za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz.



Slika 7-17 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_1

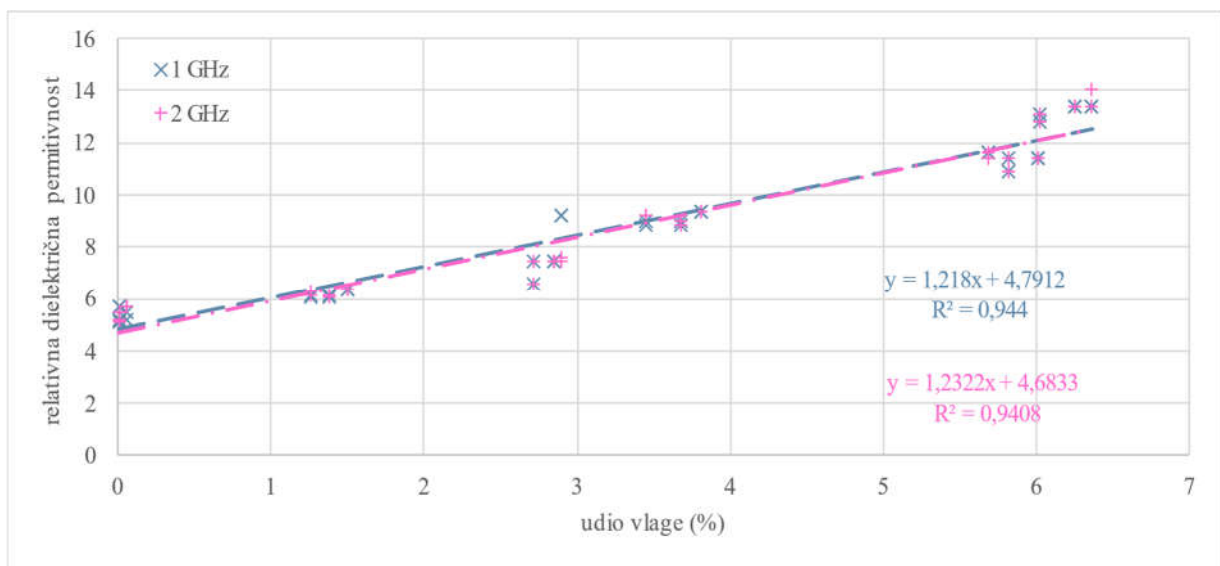
Porast vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, koja je određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, s 5,401 na 13,698 prilikom promjene udjela vlage s 0,02 na 7,07% zabilježen je kod mješavine materijala M_2 (Slika 7-18). Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz, povećala se s 5,486 na 13,366. Koeficijent determinacije iznosio je



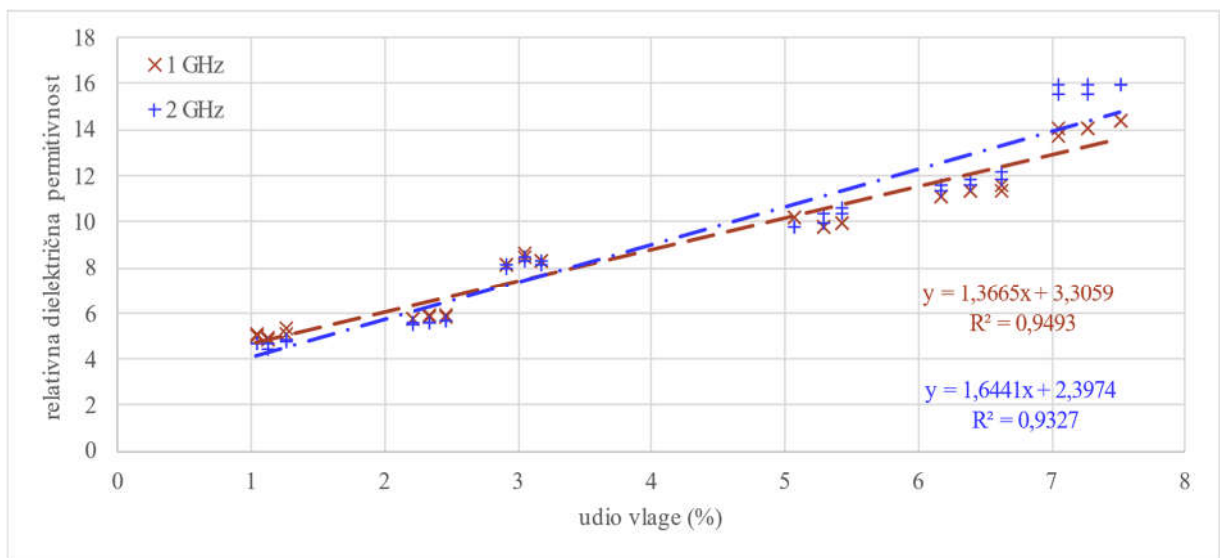
Slika 7-18 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_2

0,92 za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, odnosno 0,95 za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz.

Kod mješavine materijala M_3 (Slika 7-19) povećanjem udjela vlage s 0,01 na 6,36% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, povećala se s 5,081 na 13,366. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz, porasla je s 5,081 na 14,043. U oba slučaja, zamječen je linearni trend s koeficijentom determinacije 0,94.



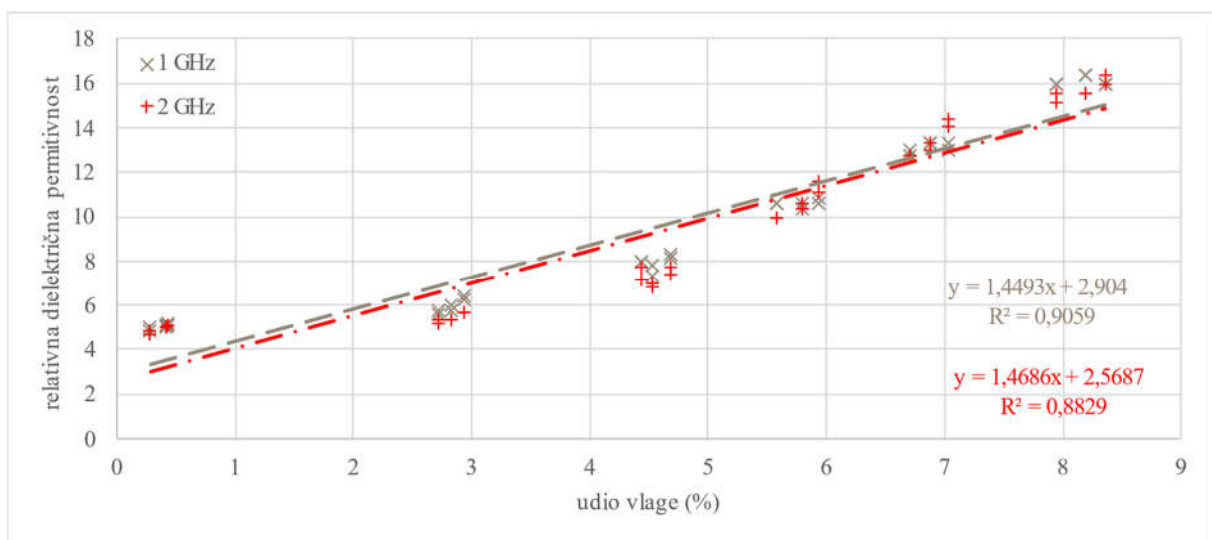
Slika 7-19 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_3



Slika 7-20 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_4

U slučaju mješavine M₄ (Slika 7-20) povećanjem udjela vlage s 1,12 na 7,51% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, povećala se linearno s 4,859 na 14,401. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz, povećala se s 4,457 na 15,978. Uočen je linearni trend s koeficijentom determinacije 0,95 za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, odnosno 0,93 za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz.

Porast vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, koja je određena temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz s 4,859 na 16,143 prilikom promjene udjela vlage s 0,28 na 8,19% zabilježen je kod mješavine materijala M₅ (Slika 7-21). Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, koja je određena temeljem podataka prikupljenih antenom nazivne frekvencije 2 GHz, povećala se s 4,719 na 16,413 pri povećanju udjela vlage s 0,28 na 8,36%. Koeficijent determinacije iznosio je 0,91 za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 GHz, odnosno 0,88 za vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene temeljem podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 2 GHz.



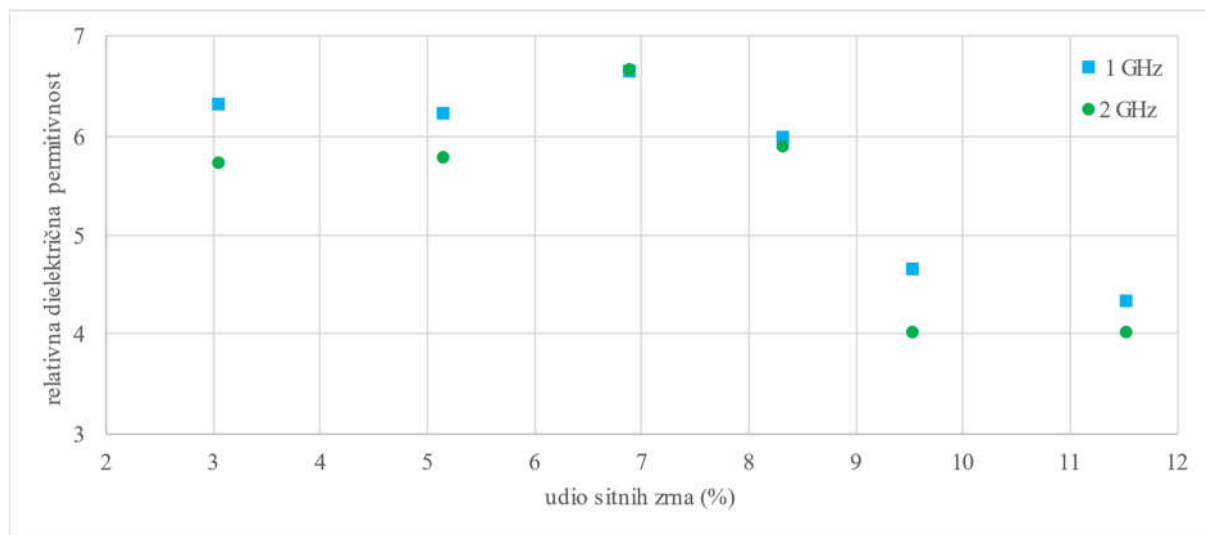
Slika 7-21 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M₅

Zaključno, kod svih mješavina materijala bez obzira na udio sitnih zrna s povećanjem udjela vlage linearno se povećala vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Nadalje, nije uočena značajnija razlika između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određena na temelju podataka prikupljenih s antenom nazivne frekvencije 1 i 2 GHz.

7.7.4 Elektromagnetska svojstva mješavina materijala- utjecaj sitnih zrna

S obzirom da je kod svih mješavina materijala model linearne regresije jako dobro prilagođen podacima ($R^2 > 0,88$) i pokazuje da se relativna dielektrična permitivnost može dobro predvidjeti pomoću udjela vlage za svaku mješavinu izračunata je vrijednost relativne dielektrične permitivnosti pri udjelima vlage od 1, 3 i 5%. Na ovaj način analiziran je utjecaj udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti pri određenim udjelima vlage.

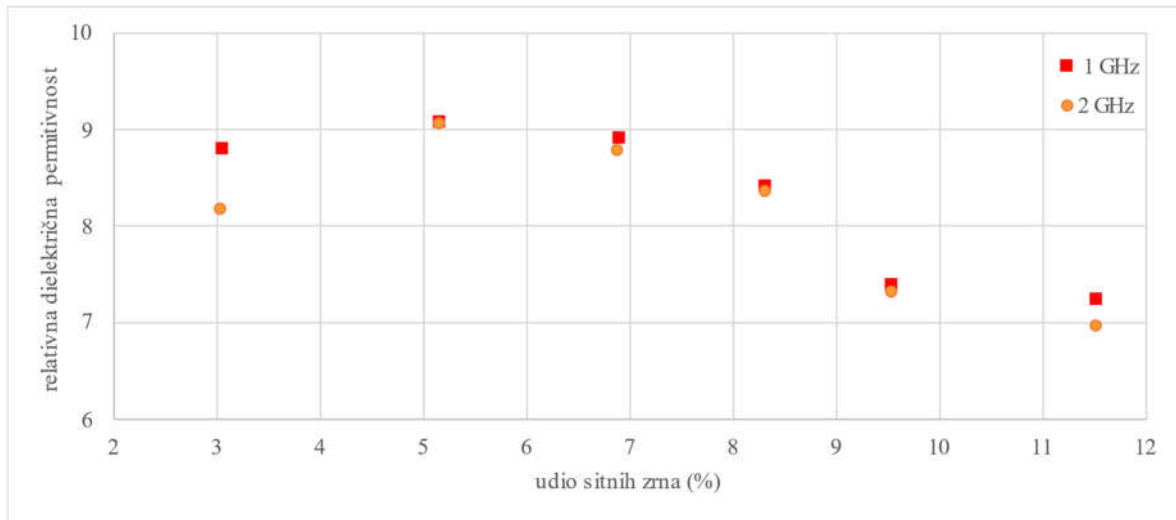
Pri udjelu vlage 1% (Slika 7-22), u slučaju podataka prikupljenih antenom nazivne frekvencije 1 GHz, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti blago opada s povećanjem udjela sitnih zrna do udjela 5,152%. Povećanjem udjela sitnih zrna na 6,889% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti poveća se za 0,419. S povećanjem udjela sitnih zrna preko 6,889% uočeno je kontinuirano smanjenje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, koja je određena s obzirom na podatke prikupljene s antenom nazivne frekvencije 2 GHz, raste s povećanjem udjela sitnih zrna do udjela 6,889%. Pritom se vrijednost relativne dielektrične permitivnosti poveća za 0,939. S povećanjem udjela sitnih zrna preko 6,889% uočeno je kontinuirano smanjenje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti do udjela sitnih zrna 9,531%, a nakon toga s povećanjem udjela sitnih zrna vrijednost relativne dielektrične permitivnosti ostaje gotovo nepromijenjena.



Slika 7-22 Utjecaj promjene udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti pri udjelu vlage od 1%

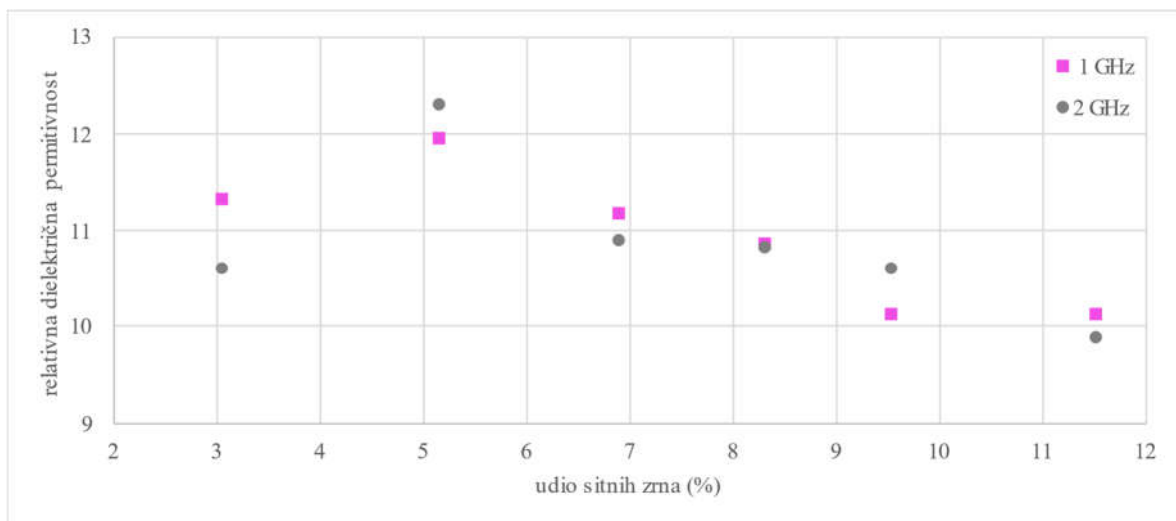
U slučaju udjela vlage 3% (Slika 7-23), kod podataka prikupljenih antenom nazivne frekvencije 1 GHz, vidljivo je da se pri povećanju udjela sitnih zrna do vrijednosti 5,152% povećava vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Daljnjim povećanjem udjela sitnih zrna opada vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Pri povećanju udjela sitnih zrna s 5,152 na 11,515% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti smanjila se s 9,108 na 7,252. Istovjetan

trend uočen je kod podataka prikupljenih antenom nazivne frekvencije 2 GHz. Pri povećanju udjela sitnih zrna s 5,152 na 11,426% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti se smanjila s 9,531 na 6,889%.



Slika 7-23 Utjecaj promjene udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti pri udjelu vlage od 3%

Kod udjela vlage 5% (Slika 7-24) vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, koja je izračunata temeljem podataka prikupljenih antenom centralne frekvencije 1 GHz, raste s povećanjem udjela sitnih zrna dok ne dosegne udio od 5,152%. Nakon toga s povećanjem udjela sitnih zrna počinje opadati vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Ovaj trend je vidljiv do udjela sitnih zrna od 9,531%. Zatim s povećanjem udjela sitnih zrna vrijednost relativne dielektrične permitivnosti počinje ponovno blago rasti. Prilikom povećanja udjela sitnih zrna s 5,152 na 9,531% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti smanjila se s 11,976 na 10,138. Za isti udio vlage, kod podataka prikupljenih antenom nazivne frekvencije 2 GHz, uočen je rast



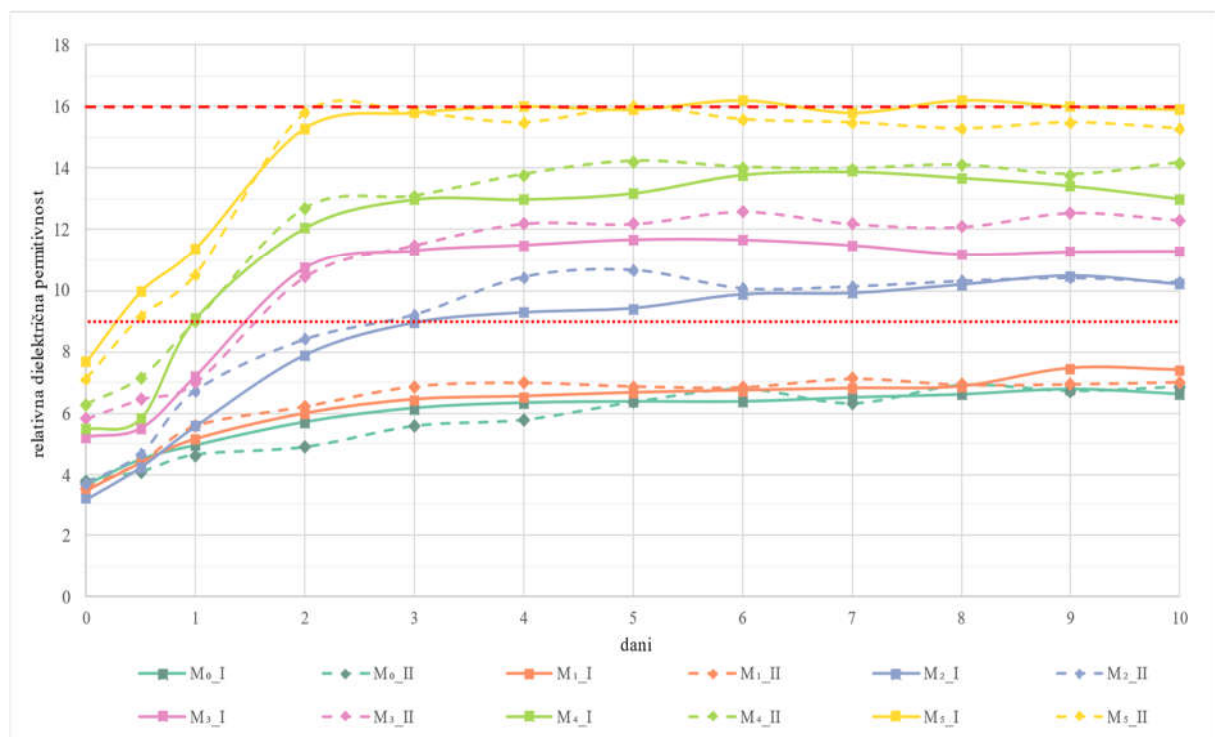
Slika 7-24 Utjecaj promjene udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti pri udjelu vlage od 5%

vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti s povećanjem udjela sitnih zrna dok se ne dosegne udio 5,152%. Nakon toga s povećanjem udjela sitnih zrna opada vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Prilikom povećanja udjela sitnih zrna s 5,152 na 11,515% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti smanjila se s 12,323 na 9,912.

Zaključno, globalno je uočen trend početnog povećanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti s povećanjem udjela sitnih zrna. Daljnje povećavanjem udjela sitnih zrna dovodi do opadanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti.

7.7.5 *Rezultati Tube suction test-a*

Utjecaj sitnih zrna na udio vlage u uzorku te njihov međusobni utjecaj na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti dodatno je istražen provedbom TST-a. Iz rezultata TST-a (Slika 7-25) vidljivo je da se mješavine M_0 i M_1 nalaze u dobrom području. Srednja vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka mješavine M_0 , izmjerene desetog dana, iznosila je 6,75, odnosno 7,22 u slučaju mješavine M_1 . U području upitne kvalitete nalazila se preostale mješavine. Srednja vrijednost relativne dielektrične permitivnosti mješavine M_2 iznosila je 10,23. Vrijednosti TST-a mješavine M_3 bile su 11,30 i 12,32. Srednja vrijednost relativne dielektrične permitivnosti na kraju ispitivanja mješavine M_4 odnosno M_5 bila je 13,60 odnosno 15,60. Tijekom desetodnevnog ispitivanja pojedina očitavanja relativne dielektrične permitivnosti uzorka M_5_I mješavine M_5 nalazila su se u području loše kvalitete. Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti odmah nakon početka testa pri udjelu vlage 0% pokazale su, za



Slika 7-25 Promjena vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti tijekom TST-a

razliku od GPR-a, da se vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti povećavaju s povećanjem udjela sitnih zrna. Također, nakon provedbe TST-a uzorci su izvagani kako bi se odredila apsorpcija vlage tijekom desetodnevnog ispitivanja (Tablica 7-6) te je određen udio sitnih zrna.

Tablica 7-6 Rezultati TST-a

Uzorak	M _{0_I}	M _{0_II}	M _{1_I}	M _{1_II}	M _{2_I}	M _{2_II}	M _{3_I}	M _{3_II}	M _{4_I}	M _{4_II}	M _{5_I}	M _{5_II}
Rdp	6,61	6,88	7,40	7,03	10,20	10,25	11,30	12,32	13,02	14,18	15,90	15,30
Vlaga (%)	1,38	1,65	2,08	1,96	3,13	3,32	3,99	4,19	4,46	4,57	5,36	5,51
Sitna zrna (%)	3,005	3,013	5,096	5,089	6,752	6,770	8,005	8,017	9,577	9,575	11,407	11,394

Rezultati TST-a pokazuju da na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti nerazdvojiv utjecaj ima udio vlage i sitnih zrna. Povećanje udjela sitnih zrna u uzorku dovelo je do pojave kapilarnosti u uzorku. Navedeno je rezultiralo povećanjem udjelu vlage, a u konačnici i povećanjem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Temeljem vrijednosti na slici 7-25 vidljivo je da nakon petog dana nije bilo značajnijih promjena u vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. To upućuje da je glavnina vlage apsorbirana u prvih pet dana ispitivanja.

8 TERENSKI ISTRAŽNI RADOVI

Terenski istražni radovi provedeni su sredinom srpnja 2022. godine na 30 lokacija na području grada Petrinje (Slika 8-1). Istražnim radovima obuhvaćene su državne, županijske i lokalne ceste te gradske ulice. Svrha istražnih radova bila je prikupljanje podataka GPR-om te uzimanje uzoraka MNS-a kako bi se odredio utjecaj promjene udjela sitnih zrna i vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Istražni radovi provedeni su u tri faze: prikupljanje podataka GPR-om na određenoj lokaciji, određivanje stupnja zbijenosti, dinamičkog modula deformacije i debljine MNS-a te uzimanje uzoraka za analizu granulometrijskog sastava i određivanje udjela vlage. Za prikupljanje GPR podataka korišteno je mjerno vozilo opremljeno centralnom jedinicom GSSI SIR-20 te antenama nazivne frekvencije 1 i 2 GHz (Slika 3-1). GPR podaci su prikupljeni u stacionarnom modu. Postavke korištene prilikom prikupljanja GPR podataka navedene su u tablici 8-1. Nakon prikupljanja podataka GPR-om na lokacijama istraživanja uklonjeni su slojevi asfalta kako bi se mogao odrediti stupanj zbijenosti MNS-a te su uzeti uzorci za određivanje udjela vlage i granulometrijsku analizu. Uobičajeno se uzorak MNS-a može uzorkovati kroz rupu promjera 300 mm. Međutim, prilikom bušenja i vađenja jezgre asfaltnih slojeva u MNS dospijeva znatna količina vode koja služi za hlađenje bušeće garniture. Na ovaj način uzorkovanja dobiju se udjeli vlage znatno viši od stvarnih. Stoga je odlučeno da se koriste istražne jame za prikupljanje uzoraka MNS-a. Zarezana je površina asfalta približnih dimenzija 250 x 200 cm tako da se pozicija na kojoj su prikupljeni GPR podaci nalazila približno u sredini spomenute površine. Zatim su strojno uklonjeni asfaltni slojevi. Na

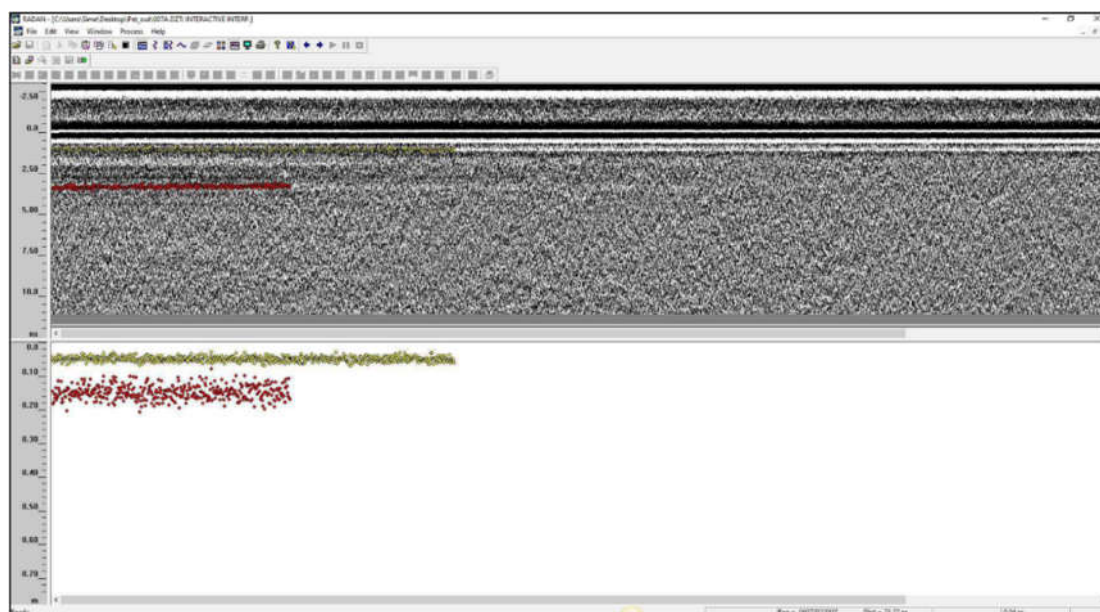


Slika 8-1 Shematski prikaz lokacija u Petrinji na kojima su provedeni terenski istražni radovi

Tablica 8-1 Postavke GPR pri provedbi terenskih istražnih radova

Parametri i filteri	Varijable	Antena 1 GHz	Antena 2 GHz
Pozicija/Raspon	Pozicija (ns)	96,5	96,5
	Raspon (ns)	20,0	15,0
Range gain	Točka	1	1
	Broj točaka	1	1
	Vrijednost	14	17
FIR filter	Low	5000	6000
	High	300	300
	Tip filtera	boxcar	boxcar
IIR filter	HLP	0	0
	HHP	0	0
	VLP	0	0
	VHP	0	0

površini MNS-a najprije je provedeno ispitivanje dinamičkog modula deformacije s dinamičkom pločom [357] te stupnja zbijenosti primjenom volumetra u skladu s normom [359]. Potom je uzet uzorak MNS-a. Uzorci MNS-a pohranjeni su u plastične vreće čime se spriječio gubitak vlage. Zatim su iskopane istražne jame do dubine posteljice. Pomoću mjerne vrpce određene su debljine pojedinih slojeva kolničke konstrukcije. Obrada i interpretacija prikupljenih GPR podataka provedena je u računalnom programu Radan 6.6. Na svim lokacijama određene su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za metodama SRM i KHM. Podaci prikupljeni s antenom nazivne frekvencije 2 GHz nisu se mogli koristiti zbog šumova unatoč korištenju odgovarajućih filtera (Slika 8-2). Pojave šumova u urbanim sredinama može biti uzrokovana različitim čimbenicima poput EM smetnji čiji su izvor mobilni telefoni, Wi-Fi mreže, električni vodovi, transformatori i drugi elektronički uređaji [360,361]. Metalne konstrukcije poput zgrada, mostova, cjevovoda i drugih objekata mogu reflektirati i



Slika 8-2 Rasipanje vrijednosti debljina MNS-a zbog EM šuma

raspršivati GPR signal, cijevi, kablove i kanalizaciju, također može uzrokovati refleksije i smetnje, stvarajući šum i otežavajući interpretaciju podataka. Nadalje urbana područja obiluju brojnim izvorima radio valova, poput radio stanica, televizijskih postaja i komunikacijskih sustava, koji mogu interferirati s GPR-om.

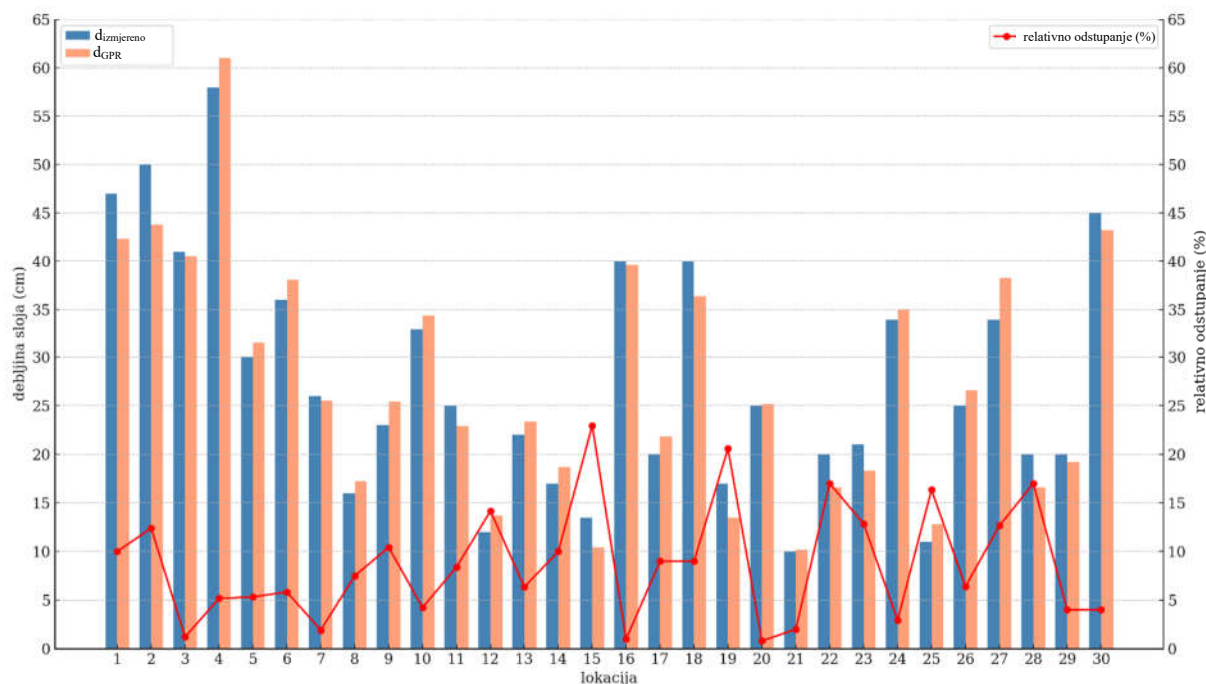
U laboratoriju je za svaki uzorak MNS-a napravljena analiza granulometrijskog sastava, određen udio vlage i izračunat stupanj zbijenosti. U prilogu 7 detaljno su prikazane karakteristike MNS-a na pojedinim lokacijama poput debljine, stupnja zbijenosti, dinamičkog modula deformacije, granulometrijskog sastava itd. U tablici 8-2 navedeni su udjeli vlage i sitnih zrna.

Tablica 8-2 Prikaz udjela vlage i sitnih zrna na lokacijama u Petrinji

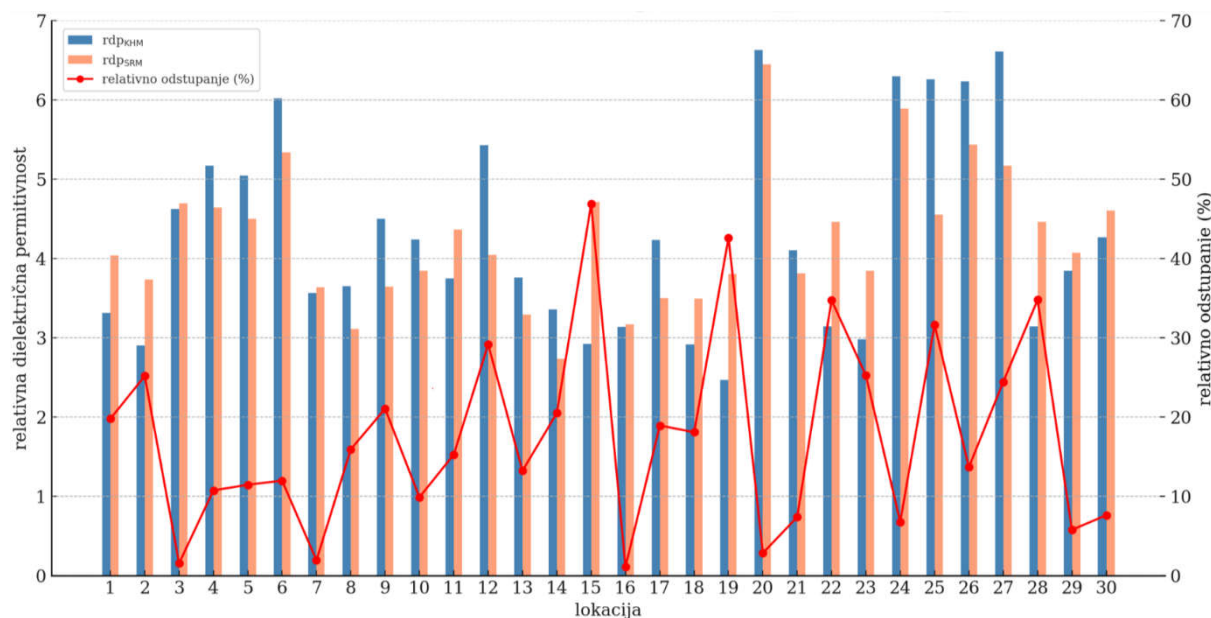
Lokacija	Udio vlage (%)	Udio sitnih zrna (%)
1	0,23	1,9
2	0,06	4,9
3	0,11	2,3
4	0,33	1,8
5	0,47	2,4
6	0,59	6,1
7	0,06	3,5
8	0,06	6,6
9	0,15	3,2
10	0,26	2,0
11	0,53	2,7
12	0,18	5,6
13	0,16	6,9
14	0,33	5,6
15	0,22	6,9
16	0,18	4,8
17	0,45	4,0
18	0,36	5,4
19	0,66	4,4
20	0,08	4,3
21	0,11	11,4
22	0,28	8,5
23	0,34	3,8
24	0,72	4,6
25	0,03	2,2
26	0,65	3,3
27	1,04	12,0
28	0,25	11,0
29	0,06	0,1
30	0,12	0,6

Debljine MNS-a su se međusobno značajno razlikovale te su varirale od 10 do 58 cm (Slika 8-3). Debljine određene pomoću mjerne vrpce na terenu uspoređene su s onima određenim nakon interpretacije GPR podataka. Prilikom interpretacije korištena je metoda SRM zza određivanje

debljine MNS-a. Nakon analize rezultata uočeno je da se relativno odstupanje debljina određenih na temelju podataka prikupljenih GPR-om u odnosu na stvarne debljine MNS-a kreće između 0,8 i 23,0% (Prilog 7.2 i Slika 8-3). Usporedimo li ove rezultate s rezultatima drugih znanstvenika možemo zaključiti da je postignuta uobičajena točnost prikupljanja i obrade GPR podataka.



Slika 8-3 Usporedba debljina MNS-a određenih direktnim mjerenjem i GPR-om



Slika 8-4 Usporedba vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određen s KHM i SRM

Debljine MNS-a određene direktnim mjerenjem na terenu iskorištene su za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti metodom KHM. S druge pak strane, za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti metodom SRM korištene su

debljine MNS-a određene interpretacijom prikupljenih podataka. Usporedba vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti prikazana je u prilogu 7.3 te na slici 8-4. Najveće vrijednosti relativnog odstupanja uočena su na lokaciji 15 i 19, a iznosile su 46,9 odnosno 42,7%. Ovakve značajne razlike u relativnom odstupanju između metode SRM i KHM najvjerojatnije su uzrokovane malom razlikom između vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti posteljice i MNS-a. Zbog navedenog, tijekom obrade i interpretacije podataka, granica između slojeva na B-skenu nije jasno vidljiva. Najmanja vrijednost relativnog odstupanja zabilježena je na lokaciji 16, a iznosila je 1,2%.

Rezultati terenskih istražnih radova iskorišteni su za testiranje izrađenih matematičkih modela u realnim uvjetima (Poglavlje 9).

9 DISKUSIJA

Provedbom dodatne statističke analize glavnih laboratorijskih ispitivanja i terenskih istražnih radova određen je utjecaj promjene udjela vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Također, s obzirom na usporedbu vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene percometer-om i GPR-om određene su granične vrijednosti za ocjenu kvalitete MNS-a i kvantifikaciju vlage i sitnih zrna. Na kraju je ocijenjena mogućnost primjene predloženog pristupa za kvantifikaciju vlage i sitnih zrna u stvarnim uvjetima.

Utjecaj vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti (1GHz)

Za provedbu dodatne statističke analize korišten je programski jezik Python te biblioteke programskog jezika (Pandas, Statsmodels, NumPy, scikit-learn, Matplotlib i Seaborn) za numeričke izraze i vizualizacije. U statističkoj analizi korišteno je ukupno 216 setova podataka. Na svakom uzorku prikupljena su po dva seta podataka, po jedan u svakom smjeru (uzdužni i poprečni). Svaki set podataka sastojao se od tri vrijednosti: udjela vlage, udjela sitnih zrna i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti određena je iz podataka prikupljenih antenom nazivne frekvencije 1 GHz. Primijenjena je deskriptivna statistička analiza s ciljem pružanja jasnog i preglednog prikaza vrijednosti pojedinog podataka. Rezultati deskriptivne statističke analize prikazani su u tablici 9-1.

Tablica 9-1 Rezultati deskriptivne statističke analize- 1 GHz

Komponenta deskriptivne statističke analize	Udio vlage (%)	Udio sitnih zrna (%)	Relativna dielektrična permitivnost
Najmanja vrijednost	0,01	3,029	4,859
Najveća vrijednost	8,36	11,926	16,413
Prosječna vrijednost	3,716	7,407	9,310
Standardna devijacija	2,295	2,795	3,040
Donji kvartil	1,580	5,182	6,347
Medijan	5,362	7,584	9,221
Gornji kvartil	8,360	9,561	11,606

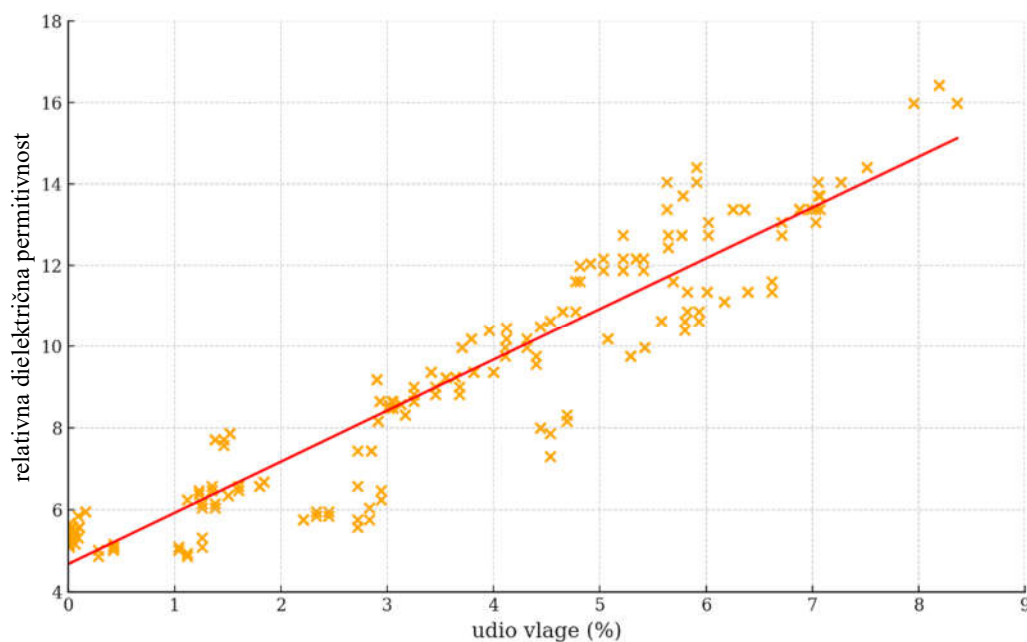
Sljedeći korak bio je provedba regresijske analize. Jednostavnom linearnom regresijom dodatno je istražena korelacija udjela vlage i relativne dielektrične permitivnosti te udjela sitnih zrna i relativne dielektrične permitivnosti. Korelacija udjela vlage i relativne dielektrične permitivnosti definirana je jednadžbom:

$$z=4,667+1,250 \cdot x \quad (9.1)$$

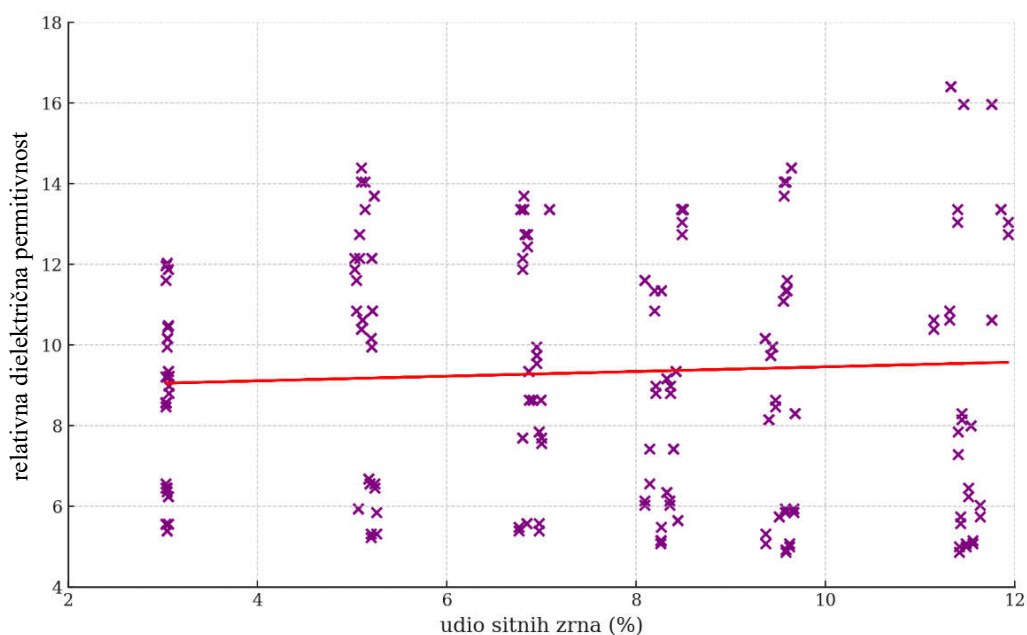
gdje su: z relativna dielektrična permitivnost; x udio vlage. Koeficijent determinacije je $R^2=0,890$ iz čega proizlazi da jednadžba 9.1 u kojoj je udio vlage nezavisna varijabla objašnjava 89,0% varijacije u relativnoj dielektričnoj permitivnosti (Slika 9-1). Statistička povezanost sitnih zrna i relativne dielektrične permitivnosti definirana je jednadžbom:

$$z = 8,880 + 0,058 \cdot y \quad (9.2)$$

gdje je y udio sitnih zrna. Koeficijent determinacije iznosi $R^2 = 0,003$ na temelju čega je zaključeno da trend nije linearan (Slika 9-2).

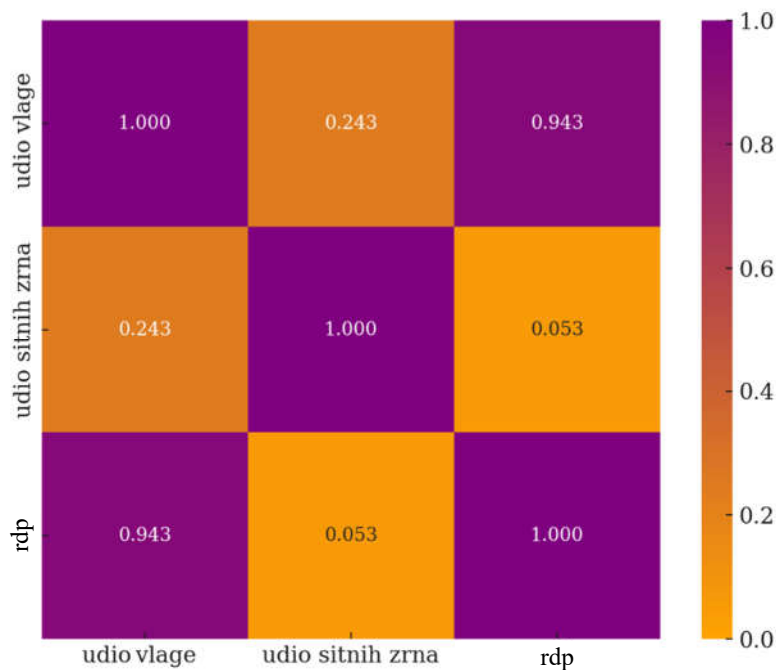


Slika 9-1 Linearna regresija za udio vlage i relativnu dielektričnu permitivnost- 1 GHz



Slika 9-2 Linearna regresija za udio sitnih zrna i relativnu dielektričnu permitivnost- 1 GHz

Nadalje, korištena je Pearson-ova korelacija, koja je standardna metoda za procjenu linearne povezanosti između dviju varijabli. Grafički prikaz Pearson-ove korelacije dan je na slici 9-3. Korelacijski koeficijent između udjela vlage i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti pokazuje vrlo jaku pozitivnu korelaciju 0,943. S druge pak strane između udjela sitnih zrna i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uočena je vrlo slaba korelacija 0,053.



Slika 9-3. Pearson-ova matrica korelacije- 1 GHz

Za svaku mješavinu materijala, primijenjen je Shapiro-Wilk test kako bi se provjerila normalnost distribucije određenih vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Rezultati testa su prikazani u tablici 9-2. Za sve mješavine, p-vrijednosti su niže od 0,05, a to znači da vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti nisu normalno distribuirane. Sve vrijednosti W su manje od 1, što također ukazuje na odstupanje od normalne distribucije.

Tablica 9-2 Rezultati Shapiro-Wilk testa- 1 GHz

Mješavina materijala	W	p-vrijednost
M ₀	0,912	0,0073
M ₁	0,899	0,0033
M ₂	0,906	0,0049
M ₃	0,905	0,0046
M ₄	0,913	0,0080
M ₅	0,896	0,0026

Nadalje, Levene-ovim testom je procijenjeno je li varijanca relativne dielektrične permitivnosti unutar različitih mješavina materijala jednaka. Vrijednost statistike testa W=4,259 ukazuje na značajnu razliku u varijancama između mješavina materijala. Ova vrijednost je rezultat izračuna omjera međugrupne i unutargrupne varijance apsolutnih devijacija. P-vrijednost od $103,943 \times 10^{-5}$ je znatno manja od tipičnog nivoa značajnosti 0,05. Ovo znači da varijance relativne dielektrične permitivnosti nisu jednake za sve testirane mješavine. Iz rezultata Shapiro-Wilk i Leveneova test zaključeno je da analiza varijance (ANOVA) analize, nije prikladna za predmetni skup podataka. Stoga je odabran Kruskal-Wallis test, neparametrijski statistički test koji se koristi za utvrđivanje postojanja statistički značajnih razlika između

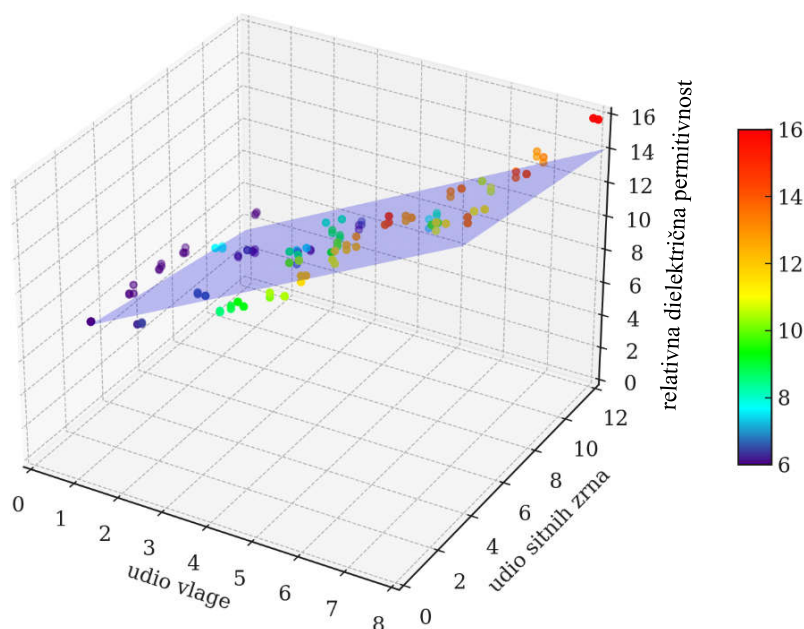
medijana više od dvije neovisne skupine [362]. Alternativa je ANOVA-i kada pretpostavke normalnosti distribucije i homogenosti varijanci nisu zadovoljene. Nulta hipoteza Kruskal-Wallis test glasila je:

$$H_0: \eta_{M_0} = \eta_{M_1} = \eta_{M_2} = \eta_{M_3} = \eta_{M_4} = \eta_{M_5}$$

a alternativna hipoteza bila je:

$$H_a: \exists i, j \text{ takav da } \eta_{M_i} \neq \eta_{M_j} \text{ za } i \neq j$$

Nulta hipoteza znači da ne postoji značajna razlika u medijanama relativne dielektrične permitivnosti između različitih mješavina materijala. Alternativna hipoteza znači da postoji barem jedna mješavina koja se značajno razlikuje u medijanu vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti u odnosu na druge mješavine materijala. Rezultati Kruskal-Wallis testa, $H=4,683$ i $p\text{-vrijednost}=0,456$ sugeriraju da, s obzirom na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, udio sitnih zrna među mješavinama ne uzrokuje značajne razlike u medijanama. S obzirom na dobivenu $p\text{-vrijednost}$ od 0,456, koja je veća od uobičajenog nivoa značajnosti 0,05, ne možemo odbaciti nultu hipotezu. To znači da nema dovoljno dokaza za zaključak da postoje značajne razlike između medijana relativne dielektrične permitivnosti za različite mješavine. Rezultati provedene statističke analize, u praktičnom smislu, sugeriraju da mješavine imaju slične karakteristike u pogledu dielektričnih svojstava. Odnosno postupno povećanje udjela sitnih zrna nema značajan utjecaj na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti.



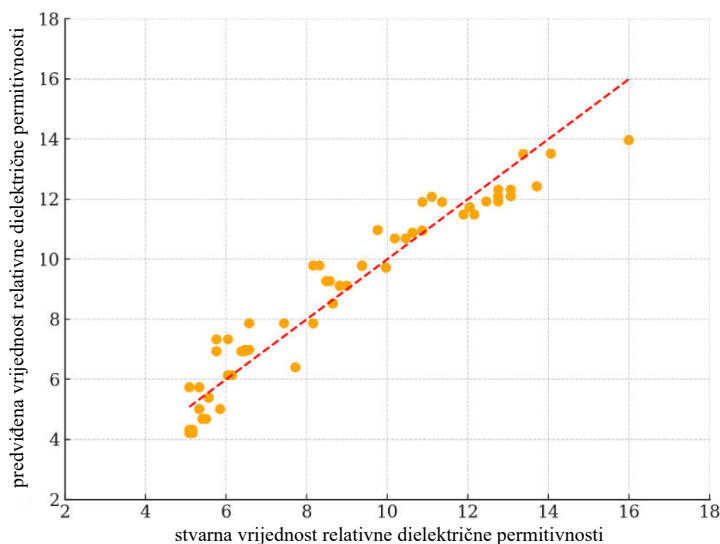
Slika 9-4 Podaci korišteni za izradu modela- 1 GHz

Provedbom višeparametarske linearne regresije napravljen je matematički model za predviđanje vrijednost relativne dielektrične permitivnosti s obzirom na određeni udio vlage i sitnih zrna. Za izradu modela korištena su 144 seta podataka. Setovi podataka su izabrani na

način da su po dva seta podataka odabrana za specifični udio sitnih zrna i vlage te određenu orijentaciju antene. Preostali set podataka je iskorišten za validaciju modela. Ukupno su iskorištena 72 seta podataka za validaciju modela. Model uključuje dvije nezavisne varijable x i y te zavisnu varijablu z (Slika 9-4). Model je definiran jednadžbom:

$$z=5,982+1,327 \cdot x-0,219 \cdot y \quad (9.3)$$

gdje su: z relativna dielektrična permitivnost; x udio vlage; y udio sitnih zrna. Rezultati validacije modela prikazani su na slici 9-5. Na dijagramu koordinata svake točke predstavlja par vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Apscisa pojedine točke predstavlja stvarnu vrijednost relativne dielektrične permitivnosti izračunate na temelju podataka prikupljenih u sklopu glavnih ispitivanja. Ordinata pojedine točke predstavlja vrijednost relativne dielektrične permitivnosti predviđenu ovim modelom. Crvena isprekidana linija predstavlja idealan model,



Slika 9-5 Validacija modela za predviđanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 1 GHz

odnosno ukoliko bi se sve točke nalazile na njoj ne bi postojalo odstupanje između stvarnih i modelom određenih vrijednosti. Na kraju je provjerena pouzdanost modela. Koeficijent determinacije iznosio je 0,919. Visoki koeficijent determinacije sugerira da model vrlo dobro objašnjava varijacije u relativnoj dielektričnoj permitivnosti kombinacijom udjela vlage i udjela sitnih zrna. Srednja kvadratna pogreška (eng. mean squared error-MSE) iznosila je 0,730, a srednja apsolutna pogreška (eng. mean absolute error-MAE) 0,734. Korijen srednje kvadratne pogreške (eng. root mean squared error-RMSE) iznosio je 0,855. Relativno mala razlika između RMSE i MEA, ukazuje da nema značajnijih odstupanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određenih ovim modelom. Zaključno, povećanjem udjela vlage za 1% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti povećat će se za 1,327. Nadalje, povećanjem udjela sitnih zrna za 1% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti smanjuje se za 0,219.

Utjecaj vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti- 2 GHz

Kao što je već navedeno prethodno, statistička analiza je provedena na 216 setova podataka. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti određena je iz podataka prikupljenih antenom nazivne frekvencije 2 GHz. Rezultati deskriptivne statističke analize prikazani su u tablici 9-3.

Tablica 9-3 Rezultati deskriptivne statističke analize- 2 GHz

Komponenta deskriptivne statističke analize	Udio vlage (%)	Udio sitnih zrna (%)	Relativna dielektrična permitivnost
Najmanja vrijednost	0,010	3,029	4,457
Najveća vrijednost	8,360	11,926	16,413
Prosječna vrijednost	3,716	7,407	9,179
Standardna devijacija	2,295	2,795	3,258
Donji kvartil	1,580	5,182	5,992
Medijan	5,362	7,584	8,816
Gornji kvartil	8,360	9,561	11,606

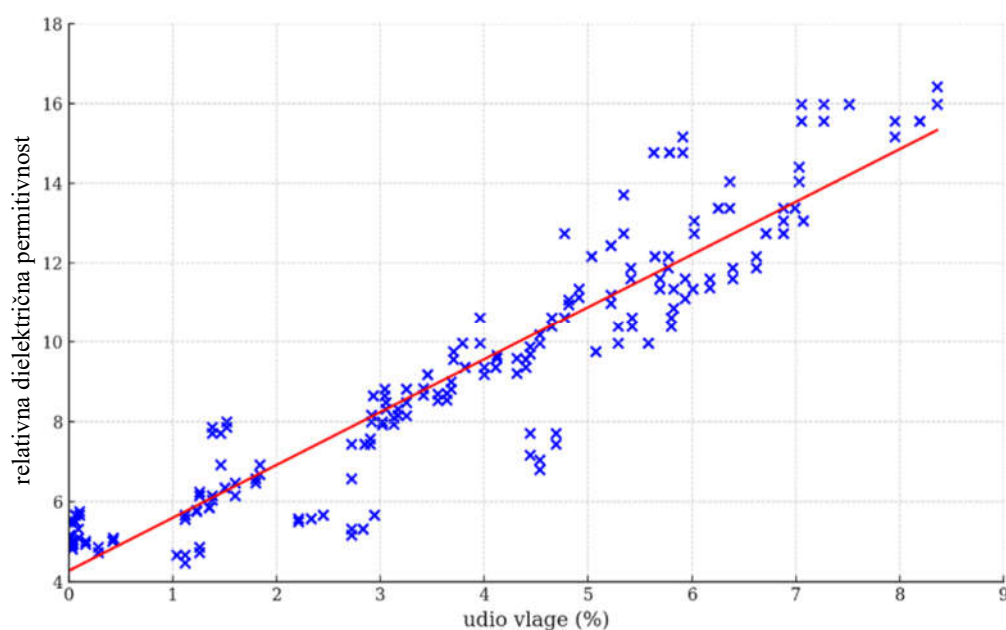
Temeljem rezultata linearne regresije definirana je jednadžba korelacija udjela vlage i relativne dielektrične permitivnosti:

$$z=4,262+1,323 \cdot x \quad (9.4)$$

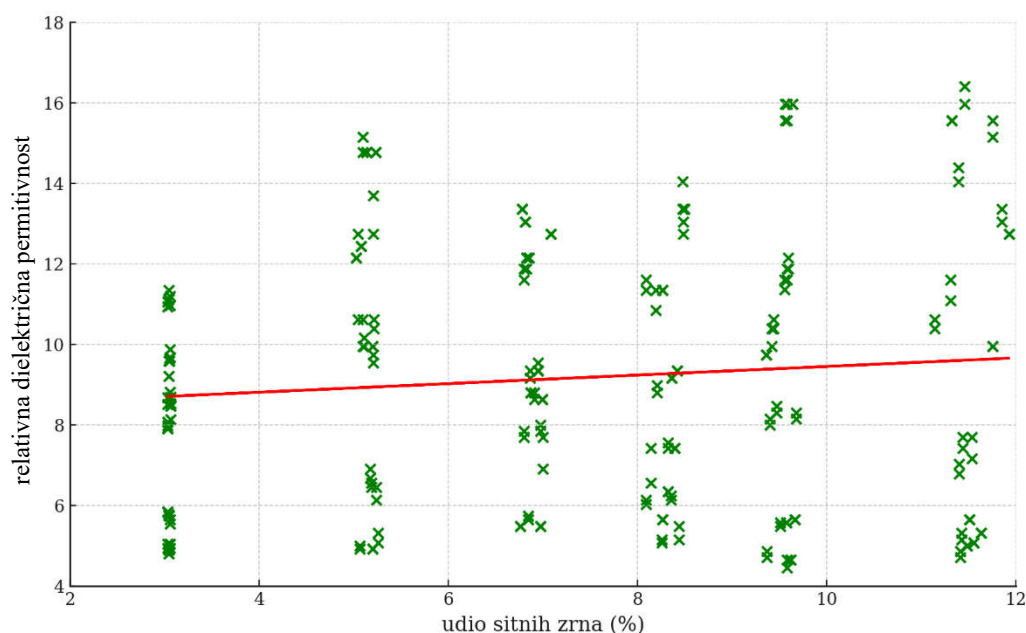
gdje su: z relativna dielektrična permitivnost; x udio vlage. Koeficijent determinacije je $R^2=0,868$ na temelje čega je zaključeno da se 86,82% varijabilnosti u relativnoj dielektričnoj permitivnosti objašnjava promjenom udjela vlage (Slika 9-6). Korelacija sitnih zrna i relativne dielektrične permitivnosti određena je jednadžbom:

$$z=8,389+0,107 \cdot y \quad (9.5)$$

gdje je y udio sitnih zrna. Koeficijent determinacije je $R^2=0,008$ na temelje čega je zaključeno da trend nije linearan (Slika 9-7).

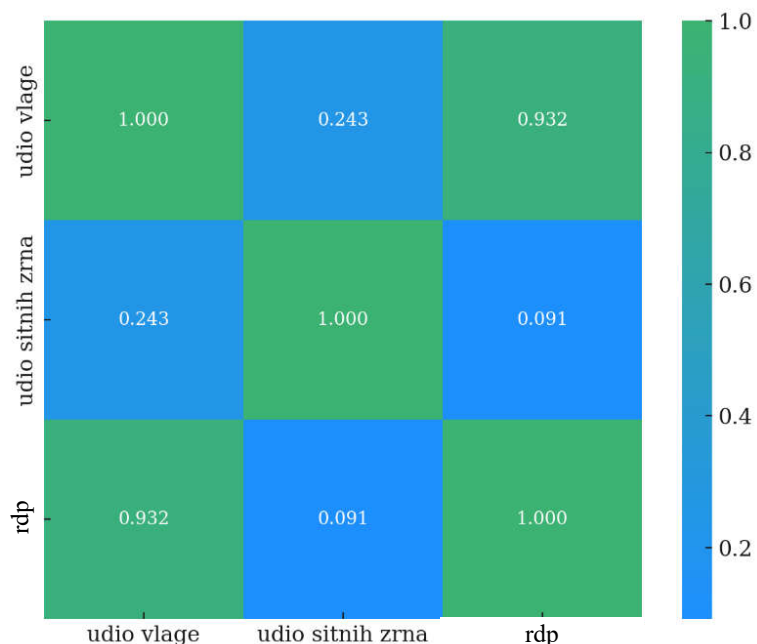


Slika 9-6 Linearna regresija za udio vlage i relativnu dielektričnu permitivnost- 2 GHz



Slika 9-7 Linearna regresija za udio sitnih zrna i relativnu dielektričnu permitivnost- 2 GHz

Grafički prikaz Pearson-ove korelacije dan je na slici 9-8. Korelacijski koeficijent udjela vlage i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti pokazuje vrlo jaku pozitivnu korelaciju 0,932. S druge pak strane između udjela sitnih zrna i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uočena je vrlo slaba pozitivna korelacija 0,089.



Slika 9-8 Matrica Pearson-ove korelacije- 2 GHz

Rezultati Shapiro-Wilkov testa su prikazani u tablici 9-4. Za sve mješavine, p-vrijednosti su niže 0,05, što znači da vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti svih mješavina materijala nisu normalne distribuirane. Sve vrijednosti W su manje od 1, što također ukazuje na odstupanje od normalne distribucije.

Tablica 9-4 Rezultati Shapiro-Wilkov testa- 2 GHz

Mješavina materijala	W	p-vrijednost
M ₀	0,908	0,0057
M ₁	0,912	0,0076
M ₂	0,918	0,0111
M ₃	0,907	0,0054
M ₄	0,903	0,0041
M ₅	0,878	0,0009

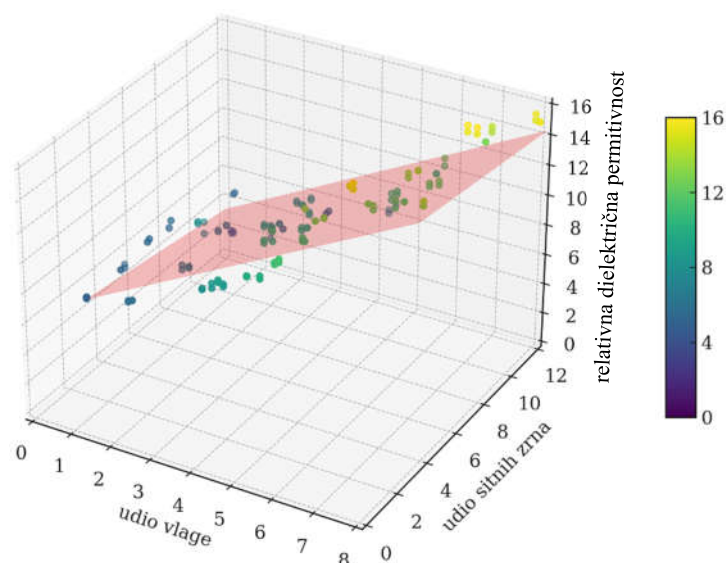
Nadalje, rezultati Levene-ovog testa $W=6,175$ ukazuju na značajnu razliku u varijancama između mješavina materijala. P-vrijednost od $2,309 \cdot 10^{-5}$ je znatno manja od tipičnog nivoa značajnosti 0,05. Ovo znači da varijance relativne dielektrične permitivnosti nisu jednake za sve testirane mješavine. Nulta hipoteza Kruskal-Wallis test bila je:

$$H_0: \eta_{M_0} = \eta_{M_1} = \eta_{M_2} = \eta_{M_3} = \eta_{M_4} = \eta_{M_5}$$

Alternativna hipoteza glasila je:

$$H_a: \exists i, j \text{ takav da } \eta_{M_i} \neq \eta_{M_j} \text{ za } i \neq j$$

Nulta hipoteza znači da ne postoji značajna razlika u medijanama relativne dielektrične permitivnosti između različitih mješavina materijala. Alternativna hipoteza znači da postoji barem jedna mješavina koja se značajno razlikuje u medijanu vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti u odnosu na druge mješavine materijala. Rezultati Kruskal-Wallis testa, $H=6,669$ i p-vrijednost=0,247, sugeriraju da s obzirom na relativnu dielektričnu permitivnost, udio sitnih zrna među mješavinama materijala ne uzrokuje značajne razlike u medijanama pa se nije mogla odbaciti nulta-hipoteza. To znači da nema dovoljno dokaza za tvrdnju da postoje značajne razlike u medijanama relativne dielektrične permitivnosti između različitih mješavina na razini značajnosti od 5%.

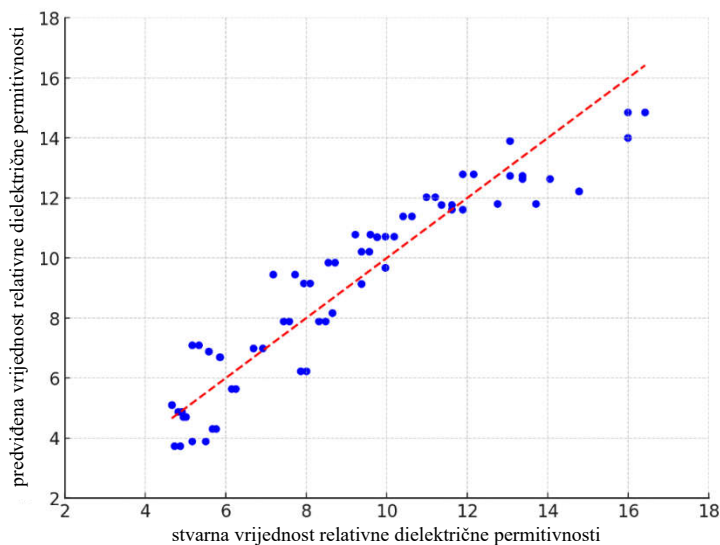


Slika 9-9 Podaci korišteni za izradu modela- 2 GHz

Provedbom višeparametarske linearne regresije napravljen je matematički model za predviđanje vrijednost relativne dielektrične permitivnosti s obzirom na određeni udio vlage i sitnih zrna. Za izradu modela korištena su 144 seta podataka, dok su za validaciju modela korištena 72 seta. Model uključuje dvije nezavisne varijable x i y te zavisnu varijablu z (Slika 9-9). Varijabla z određena je jednadžbom:

$$z=5,384+1,376 \cdot x-0,178 \cdot y \quad (9.6)$$

gdje su: z relativna dielektrična permitivnost; x udio vlage; y udio sitnih zrna. Rezultati validacije modela prikazani su na slici 9-10. Koeficijent determinacije je $R^2=0,887$. MSE je iznosila 1,257, a MAE je bila 0,939. RMSE je iznosio je 1,121. Visoka vrijednost R^2 pokazuje da model dobro objašnjava varijacije u podacima, dok vrijednosti MAE, MSE, i RMSE ukazuju na točnost modela, ali i na postojanje nešto veće prosječne pogreške u usporedbi s modelom razvijenim na temelju podataka prikupljenih air-coupled antenom nazivne frekvencije 1 GHz. Zaključno, povećanjem udjela vlage za 1% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti povećat će se za 1,376. Nadalje, s povećanjem udjela sitnih zrna za 1% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti smanjuje se za 0,178.



Slika 9-10 Rezultati validacije modela- 2 GHz

Statistička analiza podataka prikupljenih antenama nazivne frekvencije 1 i 2 GHz nedvosmisleno ukazuje da je udio vlage glavni faktor koji utječe na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti tla. Kako se udio vlage povećava, tako raste i relativna dielektrična permitivnost, što potvrđuje ključnu ulogu vode u određivanju elektromagnetskih svojstava tla. S druge strane, povećanje udjela sitnih zrna u MNS-u ima složeniji učinak. Ovaj naizgled paradoksalan učinak može se objasniti kroz fenomen kapilarnog uzdizanja vlage, koja se javlja s povećanjem udjela sitnih zrna u materijalu. Kapilarno uzdizanje potiče povećanje vlage u

uzorku i njeno zadržavanje u porama uzorka, što dovodi do povećanja vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti. Ova interakcija između udjela vlage i sitnih zrna ukazuje na to da se ovi parametri ne mogu promatrati izolirano; njihovo međudjelovanje zahtijeva zajedničku kvantifikaciju kako bi se postiglo točno razumijevanje dielektričnih svojstava mješavina materijala.

Korelacija rezultata određenih percometer-om i GPR-om

Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene s percometer-om ne mogu se direktno usporediti s onima od GPR-a. Nazivna frekvencija percometer-a je osjetno niža, iznosi svega 43 MHz [363]. Teoretski, percometer omogućuje širenje EM valova do 5 cm dubine iako je ta dubina u praksi osjetno niže i kreće se oko 2 cm. Iz uzoraka korištenih u TST-a po završetku ispitivanja određen je udio sitnih zrna. Udio vlage mogao se odrediti samo za posljednji dan ispitivanja s obzirom da zbog točnosti TST-a uzorci nisu svaki dan vađeni iz vode i vagani. U model za predviđanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti s obzirom na određeni udio vlage i sitnih zrna (Jednadžba 9.3) uvrštene su vrijednosti iz TST-a (Tablica 7-6). Na ovaj je način omogućena korelacija vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene percometer-om i GPR-om s air-coupled antenom nazivne frekvencije 1 GHz. Analizom rezultata vidljivo je da su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene percometer-om znatno veće. U tablici 9-5 navedene su apsolutne (Δ) i relativne (δ) razlike.

Tablica 9-5 Usporedba vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 1 GHz

rdp_{PERCO}	6,61	6,88	7,40	7,03	10,20	10,25	11,30	12,32	13,02	14,18	15,90	15,30
rdp_{GPR_1}	7,155	7,512	7,626	7,468	8,657	8,905	9,524	9,786	9,803	9,949	10,597	10,798
Δ	0,545	0,632	0,226	0,438	1,543	1,345	1,776	2,534	3,217	4,231	5,303	4,502
δ (%)	8,24	9,19	3,05	6,23	15,13	13,12	15,72	20,57	24,71	29,83	33,35	29,42

Nadalje, analizirane su linearna, eksponencijalna, logaritamska i kvadratna funkcija s ciljem razvijanja pouzdanog modela za korelaciju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene GPR-om s air-coupled antenom nazivne frekvencije 1 GHz ($\text{rdp}_{\text{GPR}_1}$) i percometer-om ($\text{rdp}_{\text{PERCO}}$). S obzirom na visoku vrijednost koeficijenta determinacije $R^2=0,974$ odabrana je linearna funkcija. Model je određen jednadžbom:

$$\text{rdp}_{\text{GPR}_1}=0,377 \cdot \text{rdp}_{\text{PERCO}}+4,882 \quad (9.7)$$

Sljedeći korak bio je određivanje kvalitativnih granica za MNS te kvantificiranje udjela vlage i sitnih zrna u MNS-u temeljem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene GPR-om s air-coupled antenom nazivne frekvencije 1 GHz. S obzirom na rezultate dosadašnjih istraživanja kao i rezultate ispitivanja provedenih u sklopu ovog rada odlučeno je da se koriste tri kategorije kvalitete MNS-a: dobra, upitna i loša. Granice između pojedinih kategorija

određene su uvrštavanjem graničnih vrijednosti [28,364], 9 odnosno 16, za TST u model za korelaciju određen jednačbom 9.7. Temeljem izračunate vrijednosti određeno je da materijali dobre kvalitete, odnosno s niskim udjelom vlage i sitnih zrna (<5%) imaju vrijednost relativne dielektrične permitivnosti nižu od 8,28. Materijali upitne kvalitete imaju vrijednost relativne dielektrične permitivnosti između 8,28 i 10,91. Mješavine materijala čija je relativna dielektrična permitivnost viša od 10,91 smatraju se neprihvatljive kvalitete odnosno imaju neprihvatljive udjele vlage i sitnih zrna (8%).

Isti princip primijenjen je za podatke prikupljene s antenom nazivne frekvencije 2 GHz. Udio vlage i sitnih zrna zabilježeni na kraju TST-a (Tablica 7-6) uvršteni su u jednačbu 9.6. Analiza rezultata pokazala je da su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene percometer-om (rdp_{PERCO}) znatno veće od onih koje su određene GPR-om (rdp_{GPR_2}). U tablici 9-6 navedena su apsolutne (Δ) i relativne razlike (δ).

Tablica 9-6 Transformacija vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 2 GHz

rdp_{PERCO}	6,61	6,88	7,40	7,03	10,20	10,25	11,30	12,32	13,02	14,18	15,90	15,30
rdp_{GPR_2}	6,708	7,077	7,32	7,156	8,485	8,804	9,198	9,534	9,991	10,153	11,206	11,432
Δ	0,154	0,299	0,44	0,247	2,879	2,645	3,79	4,496	5,519	6,518	8,393	7,553
δ (%)	2,33	4,35	5,95	3,51	28,22	25,8	33,54	36,49	42,38	45,95	52,78	49,37

Odabrana je linearna funkcija zbog visokog koeficijenta determinacije $R^2=0,987$. Korelacijski model određen je jednačbom:

$$rdp_{GPR_2}=0,708 \cdot rdp_{PERCO}+3,729 \quad (9.8)$$

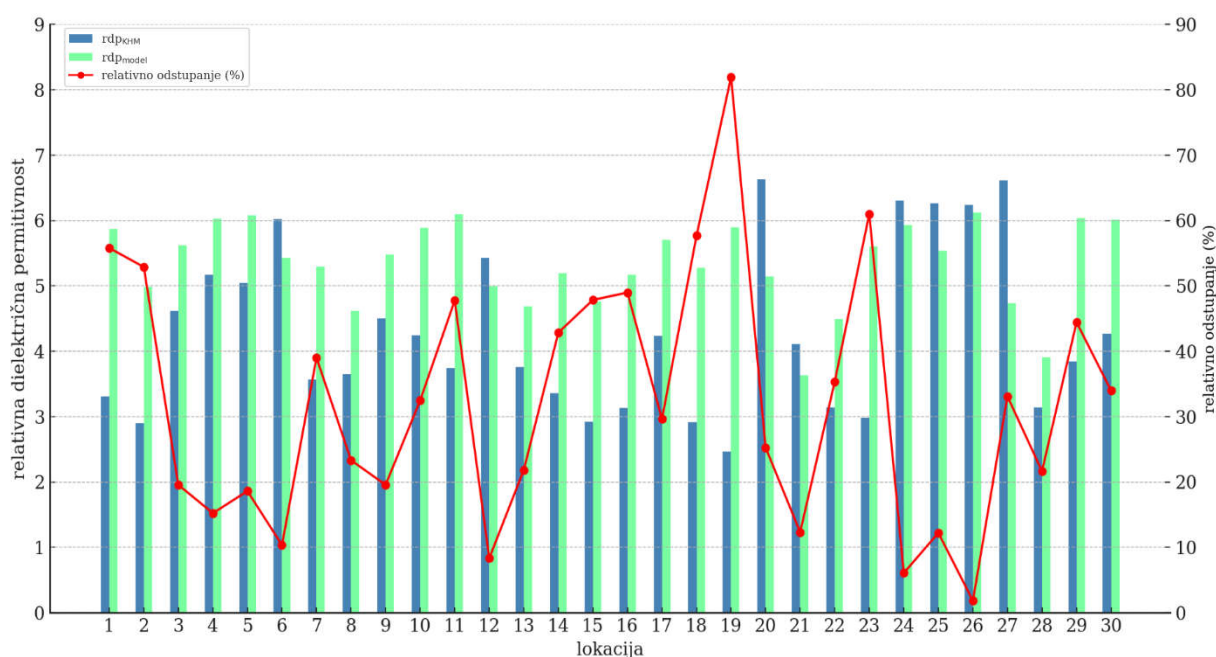
Uvrštavanjem graničnih vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za kategorizaciju rezultata TST-a, 9 odnosno 16, i rješavanjem jednačbe 9.8 određene su granične vrijednosti za GPR s air-coupled antenom nazivne frekvencije 2 GHz. Temeljem izračuna određeno je da materijali dobre kvalitete, odnosno s niskim udjelom vlage i sitnih zrna (<5%) imaju vrijednost relativne dielektrične permitivnosti nižu od 8,03. Materijali upitne kvalitete imaju vrijednost relativne dielektrične permitivnosti između 8,03 i 11,38. Mješavine materijala čija je relativna dielektrična permitivnost viša od 11,38 smatraju se mješavinama loše kvalitete jer imaju neprihvatljive udjele vlage i sitnih zrna (>8%).

Testiranje modela u realnim uvjetima

Na ukupno 30 lokacija prikupljeni su podaci GPR-om s ciljem testiranja razvijenih modela za predviđanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti te postupka za kvalitativnu ocjenu MNS-a i kvantificiranje udjela vlage i sitnih zrna. Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju podaci prikupljeni antenom nazivne frekvencije 2 GHz nisu uzeti u razmatranje jer su zbog prevelikog EM šuma bili nepouzdati. Na predmetnim lokacijama provedeno je uzorkovanje

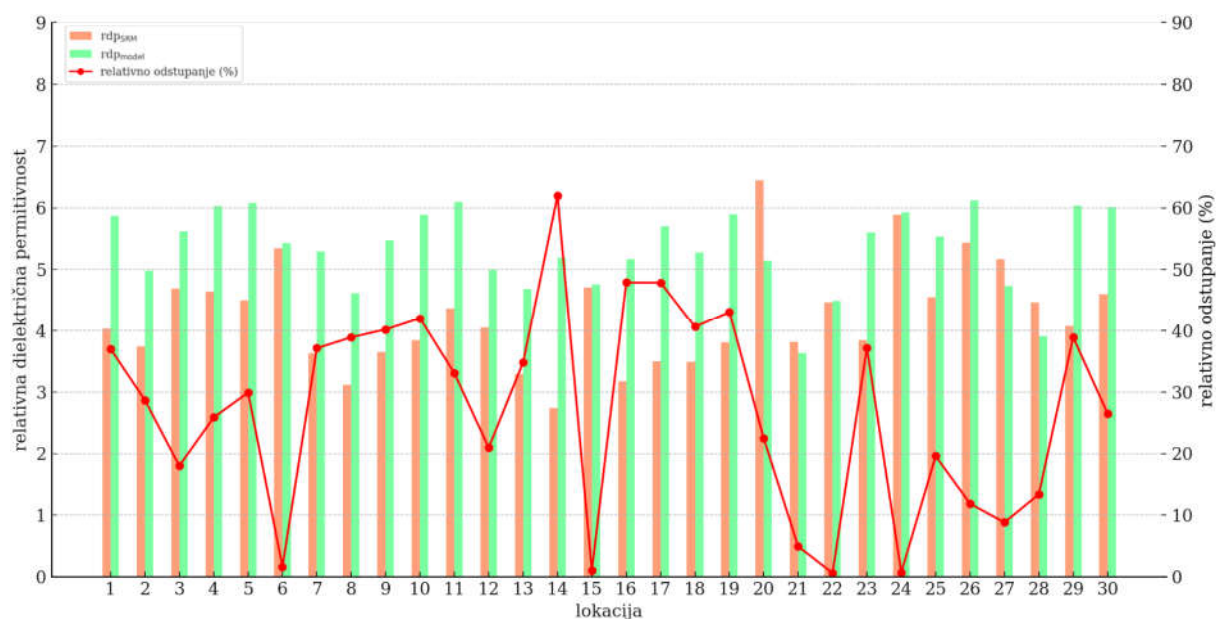
MNS-a te su u laboratoriju određeni udjeli vlage i sitnih zrna. Na slikama 9-11 i 9-12 prikazane su vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene metodama KHM i SRM te izračunate prema modelu za predviđanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uvrštavanjem udjela vlage i sitnih zrna. Analizom rezultata zaključeno je da su vrijednosti $rdp_{izračunata}$ u većini slučajeva bile više od rdp_{SRM} i rdp_{KHM} . Svim uzorcima MNS-a bio je zajednički izrazito niski udio vlage, niži od 1,04%. To je značajno niže od vrijednosti koje su korištene u glavnim laboratorijskim ispitivanjima. Zbog toga razvijene model ne bi trebalo primjenjivati kada je mješavina materijal gotovo u potpunosti suha. Također, u laboratorijskim ispitivanjima korišten je drobljeni kameni materijal, a na većini lokacija MNS se sastojao od šljunka i pijeska. Prema pojedinim autorima [11,25] razlika u podrijetlu kamenog materijala može prouzročiti promjenu vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti od 1 do 4. Nadalje, pregledom literature uočeno je da se vrijednost relativne dielektrične permitivnosti vlažne gline kreće između 5 i 40, ovisno o vrsti gline. Na posljertku je ispitana mogućnost primjene postupka za kvalitativnu ocjenu MNS-a i kvantificiranje udjela vlage i sitnih zrna GPR-om sa air-coupled antenom 1 GHz.

Prema rezultatima istraživanja, neovisno o primijenjenoj metodi za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti (Slike 9-11 i 9-12), uzorci MNS-a na svim lokacijama se nalaze u području dobre kvalitete. Drugim riječima vrijednost relativne dielektrične permitivnosti niža je od 8,28. Međutim, temeljem provedenih laboratorijskih ispitivanja je ustanovljeno da na 11 lokacija udio sitnih zrna prelazi vrijednost od 5% (Tablica 8-2). Prema rezultatima TST-a i razvijenog korelacijskog modela za pretpostaviti je da bi na ovim



Slika 9-11 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene KHM i modelom

lokacijama da nije bio sušni period godine vrijednost relativne dielektrične permitivnosti bila iznad 8,28. Ovdje je također vidljivo da predloženi postupak nije pouzdan u slučajevima niskog udjela vlage u uzorku. Stoga je potrebna provedba daljnjih istraživanja i poboljšanja modela.



Slika 9-12 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene SRM i modelom

Zaključno, jedan od glavnih čimbenika koji utječe na smanjenje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti MNS-a tijekom ljeta je smanjenje udjela vlage. Ljetni mjeseci u Republici Hrvatskoj su karakterizirani visokim temperaturama i intenzivnim isparavanjem. Budući da voda ima visoku vrijednost relativne dielektrične permitivnosti (81), smanjenjem njezinog udjela u sloju smanjuje se vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Ova promjena značajno utječe na vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti MNS-a. Na temelju rezultata laboratorijskih mjerenja i terenskih istraživanja te dodatnih statističkih analiza može se zaključiti da predloženi postupak ima potencijal za kvantifikaciju vlage i sitnih zrna te ocjenu kvalitete MNS-a, ali ukoliko se primjenjuje u sušnom razdoblju godine može dovesti do pogrešnih zaključaka. Odnosno, ukoliko podzemna voda nije prisutna na granici posteljice i MNS-a te nema kapilarnog uzdizanja vlage, vrijednost relativne dielektrične permitivnosti bit će približno jednaka za mješavine materijala s različitim udjelima sitnih zrna.

10 ZAKLJUČAK

U doktorskom radu istražena je mogućnost kvantifikacije vlage i sitnih zrna u MNS-u kolničke konstrukcije primjenom GPR-a s air-coupled antenama. Rad je usmjeren na rješavanje ključnog problema u održavanju cestovne infrastrukture, a to je pravovremeno poduzimanje mjera održavanja i sanacije temeljem stvarnog stanja kolnika. Kvalitativni parametri kao što su udio vlage i sitnih zrna imaju značajan utjecaj na svojstva MNS-a, a samim time i na uporabni vijek cjelokupne kolničke konstrukcije.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da GPR ima potencijal za praćenje promjena udjela vlage i sitnih zrna, na temelju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, u slojevima izrađenim od nevezanog kamenog materijala. Međutim, u praksi ovaj pristup još uvijek nije u potpunosti implementiran zbog nedostatka detaljnih studija koje bi potvrdile pouzdanost i efikasnost u različitim uvjetima. Dosadašnja istraživanja u najvećoj mjeri provedena su na željezničkoj zastornoj prizmi. Istraživanja provedena na MNS-u bila su uglavnom usmjerena na laboratorijska ispitivanja koja su provedena na pojedinačnim frakcijama, a ne na mješavini materijala prikladnoj za izradu MNS-a. Također, prilikom ispitivanja je korištena oprema prilagođena laboratorijskim zahtjevima i kao takva nije prikladna za terenske istražne radove koji se mogu implementirati u okviru sustava održavanja kolnika.

Cilj rada bio je razvoj novog postupka za kvantifikaciju vlage i sitnih zrna u MNS-u kroz analizu vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti, određene GPR-om s air-coupled antenama. Za potrebe ostvarivanja ovog cilja provedena su opsežna laboratorijska ispitivanja i terenska istraživanja. Preliminarnim laboratorijskim ispitivanjima definirani su tehnološki parametri i metodologija izrade uzoraka. Glavna su istraživanja obuhvatila ispitivanje šest različitih mješavina materijala pri različitim udjelima sitnih zrna i vlage. Rezultati ispitivanja su pokazali da udio vlage ima dominantan utjecaj na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti, što je posljedica visoke vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti vode u usporedbi s većinom cestograđevnih materijala. Kod svih ispitnih mješavina materijala uočen je linearni porast vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti pri povećanju udjela vlage. Statistički gledano udio sitnih zrna nije imao značajniji utjecaj na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Međutim, povećanje udjela sitnih zrna rezultirao je povećanjem vjerojatnosti nastanak kapilarnog uzdizanja vlage u sloju. Stoga se udjeli vlage i sitnih zrna ne mogu promatrati pojedinačno jer je njihova interakcija ključna za dielektrična svojstva materijala.

Nakon provedbe dodatne statističke analize rezultata glavnih laboratorijskih ispitivanja

definirani su modeli za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti s obzirom na udio vlage i sitnih zrna. Ustanovljeno je da će se povećanjem udjela vlage za 1% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti povećati za 1,33 u slučaju modela nastalog na temelju podataka prikupljenih air-coupled antenom nazivne frekvencije 1 GHz. Također, kod istog modela uočeno je smanjenje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za 0,22 pri povećanju udjela sitnih zrna za 1%. Kod modela razvijenog na temelju podataka prikupljenih air-coupled antenom nazivne frekvencije 2 GHz povećanjem udjela vlage za 1% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti će se povećati za 1,38. Povećanjem udjela sitnih zrna za 1% vrijednost relativne dielektrične permitivnosti smanjit će se za 0,18.

Provedbom TST-a ocijenjene su mješavine materijala u pogledu osjetljivosti na vlagu. U kategoriju dobre kvalitete svrstane su mješavine materijala s 0 i 3% dodanog materijala, a preostale mješavine materijala bile su upitne kvalitete. Rezultati TST-a iskorišteni su za razvoj korelacijskih modela s obzirom na relativnu dielektričnu permitivnost određenu percometerom i GPR-om. Uvrštavanjem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti koje u TST-u predstavljaju kvalitativnu granicu u prethodno spomenute modele korelacije određene su granične vrijednosti za GPR. U slučaju podataka prikupljenih antenom nazivne frekvencije 1 GHz vrijednost relativne dielektrične permitivnosti niža od 8,28 upućuju da se radi o materijalu dobre kvalitete s udjelom sitnih zrna nižim od 5% i niskim udjelom vlage. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti veća od 10,91 upućuju na materijal loše kvalitete s visokim udjelom vlage i sitnih zrna (>8%). Granične vrijednosti, određene na temelju podataka prikupljenih s air-coupled antenom nazivne frekvencije 2 GHz, su 8,03 i 11,38.

Terenska istraživanja, koja su uključivala prikupljanje podataka GPR-om na 30 različitih lokacija, provedena su s ciljem ocjene mogućnosti primjene razvijenih modela u realnim uvjetima. Analiza rezultata pokazala je da predloženi model značajno odstupa u usporedbi s postojećim metodama KHM i SRM. Jedan od mogućih razlog za to može biti niski udio vlage u sloju u usporedbi s uvjetima provedbe glavnih laboratorijskih ispitivanja. Također, potrebno je naglasiti da je vrsta materijala korištena u provedbi terenskih istraživanja bila drugačija od one koja je korištena u glavnim laboratorijskim ispitivanjima. Pregledom literature uočeno je da se razlike u vrsti materijala mogu značajno odraziti na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Temeljem svih do sada analiziranih rezultat zaključeno je da predloženi modeli imaju potencijal za kvantifikaciju vlage i sitnih zrna te ocjenu kvalitete MNS-a, ali su potrebna dodatna istraživanja u cilju njegova poboljšanja.

Na temelju provedenih ispitivanja i istraživanja te definiranih zaključaka, ostvareni su sljedeći znanstveni doprinosi:

- Proširena su dosadašnja saznanja o utjecaju udjela vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti MNS-a.
- Za pojedinačne mješavine materijala s različitim udjelom sitnih zrna definiran je odnos između udjela vlage i vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti.
- Dokazana je interakcija između udjela vlage i sitnih zrna te je zaključeno da se ovi parametri ne mogu promatrati pojedinačno.
- Definirani su modeli za predviđanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti MNS-a s obzirom na udio vlage i sitnih zrna.
- Definirani su modeli za korelaciju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene percometer-om i GPR-om s air-coupled antenom.
- Definiran je postupak za kvalitativnu ocjenu MNS-a i kvantifikaciju vlage i sitnih zrna u MNS-u temeljem vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene iz podataka prikupljenih GPR-om.
- Primjenom modela dobivenih statističkom analizom rezultata laboratorijskih ispitivanja na rezultate terenskih mjerenja uočeno je da da pri niskim udjelima vlage ($<1\%$), bez obzira na udio sitnih zrna, vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti sugeriraju da je MNS dobre kvalitete.

S obzirom da hipotezu rada nije bilo moguće potvrditi u realnim uvjetima pojavila su se dodatna pitanja na koja u budućnosti treba pokušati odgovoriti. Nastavno na to preporuke za buduća istraživanja su:

- Provesti terenska istraživanja, a potom na uzorkovanom materijalu iz istražnih jama provesti laboratorijska ispitivanja. Time bi se osigurala primjena istovjetnog materijala u svim fazama istraživanja.
- Potrebno je tijekom različitih vremenskih perioda godine, pri različitim udjelima vlage, vršiti prikupljanje podatka GPR-om kako bi se mogla dati konačna ocjena predloženog modela.
- Ugraditi u MNS odgovarajuće senzore za praćenje udjela vlage. Na ovaj način bi se mogao odrediti optimalni trenutak za prikupljanje GPR podataka.
- U istraživanje treba uključiti različite tipove GPR-a antena prije svega ground-coupled antene. S obzirom da zbog interferencije s EM valovima iz okoline podaci prikupljeni antenom nazivne frekvencije 2 GHz nisu bili upotrebljivi potrebno je istražiti mogućnost primjene nižih frekvencija od 350 do 900 MHz. Korištenje antena frekvencije više od 2 GHz nije preporučljivo jer je dubina širenja EM valova plića od

dna MNS-a.

Svi navedeni zaključci i dane preporuke za buduća istraživanja temelje se na rezultatima dobivenim u sklopu ovog istraživanja s obzirom na istraživane mješavine materijala i korištenu opremu, a mogu poslužiti kao orijentacija za daljina istraživanja kvantifikacije vlage i sitnih zrna u nevezanim nosivim slojevima.

LITERATURA

- [1] Stefan Gerwens, Road Asset Management, Brussels, 2014.
- [2] E.U.R. Federation, Road Network 2020, (2020). <https://erf.be/statistics/road-network-2020/> (accessed August 18, 2024).
- [3] International Transport Forum, Road infrastructure investments (new build and maintenance), (n.d.). https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=ITF_INV-MTN_DATA (accessed June 10, 2020).
- [4] A. Lalagüe, Use of Ground Penetrating Radar for Transportation Infrastructure Maintenance, Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- [5] V. Dragčević, Ž. Korlaet, T. Rukavina, Katalog oštećenja asfaltnih kolnika, Zagreb, 2004.
- [6] T. Saevarsdottir, S. Erlingsson, Water impact on the behaviour of flexible pavement structures in an accelerated test, Road Mater. Pavement Des. 14 (2013) 256–277. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.779308>.
- [7] F. Salour, Moisture influence on structural behaviour of pavements field and laboratory investigations, Royal Institute of Technology, 2015.
- [8] W. Muller, Characterising moisture within unbound granular pavements using multi-offset Ground Penetrating Radar, University of Queensland, 2017. https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:449439/s40155335_phd_correctedthesis.pdf?dsi_version=c74ee3ef4e3948286018558a1168f6a8.
- [9] P. Dobriyal, A. Qureshi, R. Badola, S.A. Hussain, A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management, J. Hydrol. 458–459 (2012) 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>.
- [10] W.B. Muller, H. Bhuyan, A. Scheuermann, A comparison of modified free-space (MFS), GPR, and TDR techniques for permittivity characterisation of unbound granular pavement materials, in: Int. Symp. Non-Destructive Test. Civ. Eng., Berlin, Germany, 2015: pp. 1–7.
- [11] D.J. Daniels, Ground Penetrating Radar, 2nd ed., The Institution of Engineering and Technology, 2004. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53348-7.x0001-4>.
- [12] H. Bhuyan, A. Scheuermann, D. Bodin, R. Becker, Soil moisture and density monitoring methodology using TDR measurements, Int. J. Pavement Eng. 21 (2020) 1263–1274. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1537491>.
- [13] A. Benedetto, F. Tosti, B. Ortuani, M. Giudici, M. Mele, Mapping the spatial variation

- of soil moisture at the large scale using GPR for pavement applications, *Near Surf. Geophys.* 13 (2015) 269–278. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015006>.
- [14] L. Pajewski, S. Fontul, M. Solla, Ground-penetrating radar for the evaluation and monitoring of transport infrastructures, in: R. Persico, S. Piro, Neil Linford (Eds.), *Innov. Near-Surface Geophys.*, Elsevier, 2019: pp. 341–398. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812429-1.00010-6>.
- [15] A. Benedetto, L. Pajewski, eds., *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*, 1st ed., Springer International Publishing, Cham, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0>.
- [16] W. Wai-Lok Lai, X. Dérobert, P. Annan, A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis, *NDT E Int.* 96 (2018) 58–78. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.04.002>.
- [17] E. Carrick Utsi, *Ground Penetrating Radar: Theory and Practice*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2017.
- [18] H. Stoffregen, T. Zenker, G. Wessolek, Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data, *J. Hydrol.* 267 (2002) 201–206. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00150-6).
- [19] K. Grote, S. Hubbard, J. Harvey, Y. Rubin, Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques, *J. Appl. Geophys.* 57 (2005) 129–153. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2004.10.002>.
- [20] J. Domitrović, Optimizacija sastava nevezanih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija s dodatkom recikliranog asfaltnog agregata, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [21] J. Ekblad, U. Isacson, Influence of Water on Resilient Properties of Coarse Granular Materials, *Road Mater. Pavement Des.* 7 (2006) 369–404. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690043>.
- [22] A.A. Araya, *Characterization of unbound granular materials for pavements*, Delft University of Technology, 2011.
- [23] F. Tosti, C. Patriarca, E. Slob, A. Benedetto, S. Lambot, Clay content evaluation in soils through GPR signal processing, *J. Appl. Geophys.* 97 (2013) 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.006>.
- [24] F. Tosti, A. Benedetto, L.B. Ciampoli, S. Lambot, C. Patriarca, E.C. Slob, GPR analysis of clayey soil behaviour in unsaturated conditions for pavement engineering and
-

-
- geoscience applications, Near Surf. Geophys. 14 (2016) 127–144. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016011>.
- [25] Z. Leng, I.L. Al-Qadi, Railroad ballast evaluation using ground-penetrating radar, Transp. Res. Rec. (2010) 110–117. <https://doi.org/10.3141/2159-14>.
- [26] M.R. Clark, R. Gillespie, T. Kemp, D.M. McCann, M.C. Forde, Electromagnetic properties of railway ballast, NDT E Int. 34 (2001) 305–311. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00006-2).
- [27] T. Scullion, T. Saarenketo, Using suction and dielectric measurements as performance indicators for aggregate base materials, Transp. Res. Rec. (1997) 37–44. <https://doi.org/10.3141/1577-05>.
- [28] T. Saarenketo, Tube suction test-results of round robin tests on unbound aggregates, Rovaniemi, 2000.
- [29] T. Saarenketo, Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys, University of Oulu, 2006.
- [30] T. Saarenketo, P. Kolisoja, N. Vuorimies, S. Ylitapio, Suction and deformation properties of base course aggregates, Helsinki, 2001.
- [31] J. Neves, A.C. Freire, A. Roque, I. Martins, M. Antunes, G. Faria, Utilization of recycled materials in unbound granular layers validated by experimental test sections, Ninth Int. Conf. Bear. Capacit. Roads, Railw. Airfields (2013) 1–8.
- [32] P.M. Pereira, C.S. Vieira, A Literature Review on the Use of Recycled Construction and Demolition Materials in Unbound Pavement Applications, Sustain. 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/su142113918>.
- [33] P. Kumar, S. Shukla, Flexible pavement construction using different waste materials: A review, Mater. Today Proc. 65 (2022) 1697–1702. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.713>.
- [34] R. Mohammad Shafigur, Characterising the Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Structures, KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [35] F. Lekarp, Resilient and permanent deformation behavior of unbound aggregates under repeated loading, KTH Royal Institute of Technology, 1999.
- [36] Y.H. Huang, Pavement Analysis and Design, Pearson India, 2003.
- [37] X. Chu, A. Dawson, J. Zhang, N. Thom, C. Guo, L. Qin, Sensitivity analysis of pavement response to subgrade moisture variations, J. Build. Eng. 69 (2023) 106285. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106285>.
- [38] S. Werkmeister, Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in
-

- Pavement Constructions, Dresden University of Technology, 2003.
- [39] P. Di Tullio, Effect of Fines Content on Strength of Granular Materials, McMaster University, 2015.
- [40] H.B. Seed, C.K. Chan, C.E. Lee, Resilient characteristics of subgrade soils and their relations to fatigue in asphalt pavements, in: A. Arbor (Ed.), Proc. Int. Conf. Struct. Des. Asph. Pavements, Michigan, USA, 1962: pp. 611–636.
- [41] A. Kancherla, Resilient Modulus and Permanent Deformation Testing of Unbound Granular Materials, Texas A&M University, 2004.
- [42] A. Alnedawi, K.P. Nepal, R. Al-Ameri, Permanent Deformation Prediction Model of Unbound Granular Materials for Flexible Pavement Design, Transp. Infrastruct. Geotechnol. 6 (2019) 39–55. <https://doi.org/10.1007/s40515-018-00068-1>.
- [43] J. Hussain, D.J. Wilson, T.F.P. Henning, D. Alabaster, Comparing Results between the Repeated Load Triaxial Test and Accelerated Pavement Test on Unbound Aggregate, J. Mater. Civ. Eng. 26 (2014) 476–483. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000822](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000822).
- [44] A. Fouad, R. Hassan, A. Mahmood, Evaluation of permanent deformation and resilient modulus of pavement base with different gradations and percentages of clay plasticiser, Transp. Geotech. 31 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100679>.
- [45] S. Erlingsson, B.R. Magnúsdóttir, Prediction of stiffness of unbound granular materials based on the CBR value, in: Proc. 7th Int. Conf. Bear. Capacit. Roads, Railw. Airfields, Trondheim, Norway, 2005: pp. 1–11.
- [46] H. Andresdottir, H. Mork, Plate load testing - Effects of in-situ conditions, test procedure and calculation method, in: I. Hoff, H. Mork, R. Saba (Eds.), Elev. Int. Conf. Bear. Capacit. Roads, Railw. Airfields, Vol. 2, CRC Press, London, 2022: pp. 14–25. <https://doi.org/10.1201/9781003222897-2>.
- [47] R. Kleizienė, A. Vaitkus, A. Zofka, R. Simanavičienė, An alternative method for determination of compaction level for the pavement granular layers, Road Mater. Pavement Des. (2023) 1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2182128>.
- [48] H. Soliman, A. Shalaby, Permanent deformation behavior of unbound granular base materials with varying moisture and fines content, Transp. Geotech. 4 (2015) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.06.001>.
- [49] L.D. Hicks, Design and Construction of Base Courses, in: 35th Annu. Meet. Highw. Res. Board Bull., Washington, DC, USA, 1956: pp. 1–9.
- [50] T.F. Yideti, Packing theory-based Framework for Performance Evaluation of Unbound
-

- Granular Materials, KTH Royal Institute of Technology School of Architecture and the Built Environment, 2014.
- [51] M.R. Thompson, K.L. Smith, Repeated Triaxial Characterization of Granular Bases, *Transp. Res. Rec.* 1278 (1990) 7–17.
- [52] J.P. Bilodeau, C.O. Plamondon, G. Doré, Estimation of resilient modulus of unbound granular materials used as pavement base: combined effect of grain-size distribution and aggregate source frictional properties, *Mater. Struct. Constr.* 49 (2016) 4363–4373. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0793-9>.
- [53] M.A. Kamal, A.R. Dawson, T. Farouki, D.A. B Hughes, A.A. Sha, M.A. Kamal, Field and Laboratory Evaluation of the Mechanical Behavior of Unbound Granular Materials in Pavements, *Transp. Res. Rec.* 1406 (1993) 88–97.
- [54] N.H. Thom, S.F. Brown, Effect of Moisture on the Structural Performance of a Crushed-Limestone Road Base, in: 66th Annu. Meet. Transp. Board, Washington District of Columbia, 1987: pp. 50–56.
- [55] R. Ghabchi, M. Zaman, N. Khoury, H. Kazmee, P. Solanki, Effect of gradation and source properties on stability and drainability of aggregate bases: A laboratory and field study, *Int. J. Pavement Eng.* 14 (2013) 274–290. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.711475>.
- [56] D. Stolle, P. Guo, Y. Liu, Resilient modulus properties of granular highway materials, *Can. J. Civ. Eng.* 36 (2009) 639–654. <https://doi.org/10.1139/L08-141>.
- [57] J.P. Bilodeau, G. Doré, Relating resilient behaviour of compacted unbound base granular materials to matrix and interlock characteristics, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.036>.
- [58] R.G. Hicks, C.L. Monismith, Factors influencing the resilient properties of granular materials., *Transp. Res. Rec.* 1227 (1971) 15–31.
- [59] B.N. Jorenby, R.G. Hicks, Base Course Contamination Limits., *Transp. Res. Rec.* (1986) 86–101. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)93011-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)93011-2).
- [60] J.A. Gandara, A. Kancherla, G. Alvarado, S. Nazarian, T. Scullion, Impact of Aggregate Gradation on Base Material Performance, El Paso, 2005. <https://trid.trb.org/view/842608>.
- [61] E.J. Yoder, M.W. Witczak, Principles of Pavement Design, second, John Wiley & Sons, Inc., 1975. <https://doi.org/10.1002/9780470172919>.
- [62] G.K. Arnold, Rutting of Granular Pavements, University of Nottingham, 2004.
- [63] J.H. Maree, Aspects of the Design and Behaviour of Pavements with Granular Base
-

- Layers, University of Pretoria, 1982.
- [64] J.H. Haynes, E.J. Yoder, Effect of Repeated Loading on Gravel and Crushed Stone Base Course Materials used in AASHO Road Test, Highw. Res. Board (1963) 82–96.
- [65] R.D. Barksdale, S.Y. Itani, Influence of aggregate shape on base behavior, Transp. Res. Rec. (1989) 173–182.
- [66] ASTM D2487-06, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2010.
- [67] K. Farooq, H. Mujtaba, S. Munir, S.Z. Ashiq, S.M.S. Kazmi, M.J. Munir, Evaluation of the Impact of Fines on the Performance of Sub-Base Materials, Appl. Sci. 12 (2022) 1–12. <https://doi.org/10.3390/app12094513>.
- [68] B. Babić, A. Prager, T. Rukavina, Effect of fine particles on some characteristics of granular base courses, Mater. Struct. 33 (2000) 419–424. <https://doi.org/10.1007/BF02480660>.
- [69] L. Uthus, A. Hermansson, I. Horvli, I. Hoff, A study on the influence of water and fines on the deformation properties and frost heave of unbound aggregates, in: Proc. Int. Conf. Cold Reg. Eng., American Society of Civil Engineers, Reston, VA, Maine, 2007: p. 65. [https://doi.org/10.1061/40836\(210\)65](https://doi.org/10.1061/40836(210)65).
- [70] B. Caicedo, O. Coronado, J.M. Fleureau, A.G. Correia, Resilient behaviour of non standard unbound granular materials, Road Mater. Pavement Des. 10 (2009) 287–312. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690196>.
- [71] D. Mishra, E. Tutumluer, Aggregate Physical Properties Affecting Modulus and Deformation Characteristics of Unsurfaced Pavements, J. Mater. Civ. Eng. 24 (2012) 1144–1152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000498](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000498).
- [72] Members of the WATMOVE team, Water in Road Structures, 1st ed., Springer Netherlands, Dordrecht, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8>.
- [73] G. Dore, H. Zubeck, Cold Regions Pavement Engineering, 1st editio, McGraw Hill, 2008.
- [74] K. Hansson, L.-C. Lundin, J. Šimůnek, Modeling Water Flow Patterns in Flexible Pavements, Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 1936 (2005) 132–141. <https://doi.org/10.1177/0361198105193600116>.
- [75] B. Babić, Projektiranje kolničkih konstrukcija, Hrvatski savez građevinskih inženjera (HSGI), Zagreb, 1997.
- [76] X. Chu, I. Campos-Guereta, A. Dawson, N. Thom, Sustainable pavement drainage systems: Subgrade moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness,
-

-
- | | | | | | |
|---------|--------|--------|-----|--------|---------|
| Constr. | Build. | Mater. | 364 | (2023) | 129950. |
|---------|--------|--------|-----|--------|---------|
- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129950>.
- [77] S. Erlingsson, M. Brenčič, A. Dawson, Water Flow Theory for Saturated and Unsaturated Pavement Material, in: A. Dawson (Ed.), Water Road Struct. Movement, Drain. Eff., Springer Netherlands, Dordrecht, 2009: pp. 23–44. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_2.
- [78] E. Sangsefidi, D.J. Wilson, T.J. Larkin, P.M. Black, The Role of Water in Unbound Granular Pavement Layers: a Review, Transp. Infrastruct. Geotechnol. 6 (2019) 289–317. <https://doi.org/10.1007/s40515-019-00084-9>.
- [79] D.S. Apul, K. Gardner, T. Eighmy, J. Benoit, L. Brannaka, A Review of water movement in the highway environment: Implications for recycled materials use, Recycl. Mater. Resour. Center, Univ. New Hampshire, Durham, New Hampsh. (2002) 112. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.137.2437&rep=rep1&type=pdf>.
- [80] D.S. Apul, K.H. Gardner, T.T. Eighmy, A Review of Roadway Water Movement for Beneficial Use of Recycled Materials, in: Water Pollut., Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005: pp. 241–269. <https://doi.org/10.1007/b11431>.
- [81] D.H. Chen, R. Sun, Z. Yao, Impacts of aggregate base on roadway pavement performances, Constr. Build. Mater. 48 (2013) 1017–1026. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.101>.
- [82] D.J. Li, W. & Wilson, Investigating Aggregate Marginality Through Their Water Absorption Capabilities, Investig. Aggreg. Marginality Toward Better Treat. Methods (2016) 1–11.
- [83] B. Saad, Analysis of excess water impact on the structural performance of flexible pavements, Int. J. Pavement Eng. 15 (2014) 409–426. <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.790546>.
- [84] A. Dawson, Water Movement in Road Pavements and Embankments, 2007.
- [85] B.R. Christopher, V.C. McGuffey, Pavement subsurface drainage systems, Washington, DC:, 199AD.
- [86] B.R. Christopher, C. Schwartz, Richard Boudreau, Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual, Washington, D.C., 2006.
- [87] H.R. Cedergren, Why All Important Pavements Should Be Well Drained, 1188, Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board. No. 56-62., Pp. (1988) 56–62.
- [88] R. Charlier, P. Hornych, M. Sršen, Å. Hermansson, G. Bjarnason, S. Erlingsson, P.
-

-
- Pavšič, Water Influence on Bearing Capacity and Pavement Performance: Field Observations, in: A. Dawson (Ed.), Water Road Struct. Movement, Drain. Eff., Springer, Dordrecht, Dordrecht, 2006: pp. 175–192. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_8.
- [89] J.P. Bilodeau, G. Doré, Water sensitivity of resilient modulus of compacted unbound granular materials used as pavement base, *Int. J. Pavement Eng.* 13 (2012) 459–471. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.573556>.
- [90] D. Andrei, Development of a predictive model for the resilient modulus of unbound materials, Arizona State University, 2003.
- [91] F.A. Molina Gómez, J.F. Camacho-Tauta, O.J. Reyes-Ortiz, Stiffness of a granular base under optimum and saturated water contents, *Rev. Tecnura* 20 (2016) 75. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a05>.
- [92] Y. Guan, E.C. Drumm, N.M. Jackson, Weighting Factor for Seasonal Subgrade Resilient Modulus, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1619 (1998) 94–101. <https://doi.org/10.3141/1619-11>.
- [93] P. Kolisoja, Large Scale Dynamic Triaxial Test with Coarse Grained Aggregates, in: 4th Int. Conf. Bear. Capacit. Roads Airfields, Minneapolis, 1994: pp. 883–897.
- [94] S. Waqar Haider, M. Munum Masud, K. Chatti, Influence of moisture infiltration on flexible pavement cracking and optimum timing for surface seals, *Can. J. Civ. Eng.* 47 (2020) 487–497. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0008>.
- [95] L. Uthus, Deformation Properties of Unbound Granular Aggregates, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology, 2007.
- [96] L. Raad, G.H. Minassian, S. Gartin, Characterization of saturated granular bases under repeated loads, *Adv. Geotech. Eng.* (1992) 73–82.
- [97] L. Korkiala-tanttu, R. Laaksonen, J. Törnqvist, Effect of spring and overload on the rutting of a low-volume road, Helsinki, 2003. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3524.4009>.
- [98] G. Gidel, P. Hornych, J.J. Chauvin, D. Breysse, A. Denis, Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés, *Bull. Des Lab. Des Ponts Chaussees* (2001).
- [99] R. Charlier, L. Laloui, M. Brenčič, S. Erlingsson, K. Hansson, P. Hornych, Modelling Coupled Mechanics, Moisture and Heat in Pavement Structures, in: A. Dawson (Ed.), Water Road Struct. Movement, Drain. Eff., Springer Netherlands, Dordrecht, 2009: pp.
-

- 243–281. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_11.
- [100] F. Salour, S. Erlingsson, Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer, *Road Mater. Pavement Des.* 14 (2013) 141–158. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.754600>.
- [101] F. Salour, S. Erlingsson, Pavement Unbound Materials Stiffness-Moisture Relationship during Spring Thaw, in: *Cold Reg. Eng. 2012*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2012: pp. 402–412. <https://doi.org/10.1061/9780784412473.040>.
- [102] S. Erlingsson, G. Bjarnason, V. Thorison, Seasonal variation of moisture and bearing capacity in roads with a thin surface dressing wearing course, in: *9th Int. Conf. Asph. Pavements 2002 (ISAP 2002)*, Copenhagen, Denmark, 2002.
- [103] L. Korkiala-Tanttu, A. Dawson, Relating full-scale pavement rutting to laboratory permanent deformation testing, *Int. J. Pavement Eng.* 8 (2007) 19–28. <https://doi.org/10.1080/10298430600783509>.
- [104] P. Rokitoski, J. Bzówka, M. Grygierek, Influence of high moisture content on road pavement structure: A Polish case study, *Case Stud. Constr. Mater.* 15 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00594>.
- [105] A. Benedetto, S. Pensa, Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques, *J. Appl. Geophys.* 62 (2007) 107–123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.09.001>.
- [106] J. Hussain, D.J. Wilson, P.M. Black, The effect of moisture and relative proportions of clay minerals (smectite, chlorite and illite) on the performance of unbound granular base course (UGM), *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 47 (2014) 169–176. <https://doi.org/10.1144/qjegh2013-018>.
- [107] E.C. Hansen, Unsteady Pressure-Driven Viscous Flows Beneath Concrete Pavement Slabs, *J. Hydraul. Eng.* 117 (1991) 713–724. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:6\(713\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:6(713)).
- [108] J.A. Croveti, B.J. Dempsey, Hydraulic Requirements of Permeable Bases, *Transp. Res. Rec.* (1993) 28–36.
- [109] M. Sršen, M. Kovačić, D. Kaučić, Određivanje dubine smrzavanja tla ispod kolničke konstrukcije, *Građevinarevinar* 56 (2004) 145–154.
- [110] M. Badiane, J. Yi, G. Doré, J.P. Bilodeau, F. Prophète, Monitoring of Flexible Pavement Structures during Freezing and Thawing, *Proc. Int. Conf. Cold Reg. Eng. 2015-Janua* (2015) 205–216. <https://doi.org/10.1061/9780784479315.019>.
- [111] T. Ishikawa, T. Lin, S. Kawabata, S. Kameyama, T. Tokoro, Effect evaluation of freeze-

- thaw on resilient modulus of unsaturated granular base course material in pavement, *Transp. Geotech.* 21 (2019) 100284. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100284>.
- [112] T. Ishikawa, S. Kawabata, S. Kameyama, R. Abe, T. Ono, Effects of freeze-thawing on mechanical behavior of granular base in cold regions, in: *Adv. Transp. Geotech. II - Proc. 2nd Int. Conf. Transp. Geotech. ICTG 2012*, Taylor and Francis - Balkema, 2012: pp. 118–124.
- [113] T. Ishikawa, Y. Zhang, T. Tokoro, S. Miura, Medium-size triaxial apparatus for unsaturated granular subbase course materials, *Soils Found.* 54 (2014) 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.007>.
- [114] F. Salour, S. Erlingsson, Pavement structural behaviour during spring thaw Interpretation of FWD measurements by monitoring environmental data from county road 126 at Torpsbruk (VTI report 738A), Linköping, 2012. www.vti.se/publications%0Ahttps://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:670611.
- [115] H.M. Jol, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier, 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4>.
- [116] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, *Maxwellove jednadžbe*, Mrežno Izd. Hrvat. Encikl. (2021). <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=70457> (accessed May 16, 2023).
- [117] J.F. Mulligan, ed., *Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)- A Collection of Articles and Addresses*, Routledge, London, 2019. <https://doi.org/10.4324/9780429198960>.
- [118] G. Galati, *100 Years of Radar*, Springer International Publishing, Cham, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00584-3>.
- [119] F.T. Gizzi, G. Leucci, Global Research Patterns on Ground Penetrating Radar (GPR), *Surv. Geophys.* 39 (2018) 1039–1068. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9475-1>.
- [120] S. Sahni, P.K. Garg, R.K. Tiwari, A sneak peek into ground penetrating radar, *Everymans Sci.* XLIX (2015) 301–306.
- [121] D. Vuković, *Radarska tehnika*, Hrvat. Vojn. (2005). <https://hrvatski-vojn timer.hr/radarska-tehnika/>.
- [122] A. Yarovoy, Microwave Subsurface Propagation and Scattering, in: E.G. Njoku (Ed.), *Encycl. Remote Sens.*, Springer New York, New York, NY, 2014: pp. 398–402. https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9_103.
- [123] N. Blindow, D. Eisenburger, B. Illich, H. Petzold, T. Richter, Ground Penetrating Radar, in: K. Knödel, G. Lange, H.-J. Voigt (Eds.), *Environ. Geol. Handb. F. Methods Case*
-

- Stud., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007: pp. 283–335. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3_10.
- [124] R.K. Sinharay, Applications and future of ground penetrating radar (GPR) as a near-surface geophysical technique: A review, *J. Eng. Geol.* XLIV (2019) 12–17.
- [125] H.K. Chlaib, W. Abdulnaby, N. Abd, Application of the ground penetrating radar to detect weapons caches and unexploded ordnance: laboratory experiments, *IOSR J. Appl. Geol. Geophys.* 2 (2014) 41–50. <https://doi.org/10.9790/0990-0254150>.
- [126] E. Pettinelli, B. Cosciotti, S.E. Lauro, E. Mattei, An overview of GPR subsurface exploration of planets and moons, *Lead. Edge* 41 (2022) 672–680. <https://doi.org/10.1190/tle41100672.1>.
- [127] B.L. Jolliff, G. Ryder, Workshop on New Views of the Moon: Integrated Remotely Sensed, Geophysical, and Sample Datasets, Houston, Texas, 1998.
- [128] A. Ristić, M. Govedarica, L. Pajewski, M. Vrtunski, Ž. Bugarinović, Using ground penetrating radar to reveal hidden archaeology: The case study of the württemberg-stambol gate in Belgrade (Serbia), *Sensors (Switzerland)* 20 (2020) 1–19. <https://doi.org/10.3390/s20030607>.
- [129] R. Caldecott, M. Poirier, D. Scofea, D.E. Svoboda, A.J. Terzuoli, Underground mapping of utility lines using impulse radar, *IEE Proc. F Commun. Radar Signal Process.* 135 (1988) 343–361. <https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1988.0041>.
- [130] N. Osumi, K. Ueno, Detection of buried plant, *IEE Proc. F Commun. Radar Signal Process.* 135 (1988) 330–342. <https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1988.0040>.
- [131] R.M. Morey, Continuous Subsurface Profiling by Impulse Radar, in: 1974.
- [132] M.C. Hironaka, R.D. Hitchcock, J.B. Forrest, Detection of Voids Underground and Under Pavements, Port Hueneme, 1975. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA030997.pdf>.
- [133] A. Kovacs, R.M. Morey, Detection of cavities under concrete pavement, Hanover, 1983. <https://erdc-library.erdcdren.mil/jspui/bitstream/11681/9301/1/CR-83-18.pdf>.
- [134] D. Goodman, S. Piro, GPR remote sensing in archaeology, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31857-3>.
- [135] L.B. Conyers, Ground-penetrating Radar and Magnetometry for Buried Landscape Analysis, 2018.
- [136] L.B. Conyers, Ground-penetrating radar for archaeology, 1st ed., AltaMira Press, 2004.
- [137] L.B. Conyers, Ground-Penetrating Radar for Archaeology, 3rd ed., AltaMira Press, Lanham, 2013. <https://doi.org/10.1002/arp.1518>.
- [138] J.B. Busby, R.J. Cuss, M.G. Raines, D. Beamish, Application of ground penetrating radar

- to geological investigations, 2004.
- [139] J.P. Honings, C.M. Wicks, S.T. Brantley, Ground-Penetrating Radar Detection of Hydrologic Connectivity in a Covered Karstic Setting, *Hydrology* 9 (2022) 168. <https://doi.org/10.3390/hydrology9100168>.
- [140] X. Liu, X. Dong, D.I. Leskovar, Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review, *Int. Agrophysics* 30 (2016) 533–543. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0010>.
- [141] D. Hu, L. Chen, J. Du, J. Cai, S. Li, Seeing through Disaster Rubble in 3D with Ground-Penetrating Radar and Interactive Augmented Reality for Urban Search and Rescue, *J. Comput. Civ. Eng.* 36 (2022). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0001038](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001038).
- [142] P.M. Barone, R.M. Di Maggio, Forensic geophysics: ground penetrating radar (GPR) techniques and missing persons investigations, *Forensic Sci. Res.* 4 (2019) 337–340. <https://doi.org/10.1080/20961790.2019.1675353>.
- [143] F. Lombardi, M. Lualdi, F. Picetti, P. Bestagini, G. Janszen, L.A. Di Landro, Ballistic Ground Penetrating Radar Equipment for Blast-Exposed Security Applications, *Remote Sens.* 12 (2020) 717. <https://doi.org/10.3390/rs12040717>.
- [144] M. Solla, V. Pérez-Gracia, S. Fontul, A Review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices, *Remote Sens.* 13 (2021) 672. <https://doi.org/10.3390/rs13040672>.
- [145] C. Gregoiree, A. Van der Wielen, C. Van Geem, J.-P. Drevet, Methodologies for the Use of Ground-Penetrating Radar in Pavement Condition Surveys, Belgian Road Research Centre, Brussels, 2016.
- [146] F.I. Rial, M. Pereira, H. Lorenzo, P. Arias, A. Novo, Resolution of GPR bowtie antennas: An experimental approach, *J. Appl. Geophys.* 67 (2009) 367–373. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.05.003>.
- [147] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Relativna dielektrična permitivnost, Mrežno Izd. Hrvat. Encikl. (2021). <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69741> (accessed February 13, 2023).
- [148] E. Heggy, S.M. Clifford, R.E. Grimm, C.L. Dinwiddie, D.Y. Wyrick, B.E. Hill, Ground-penetrating radar sounding in mafic lava flows: Assessing attenuation and scattering losses in Mars-analog volcanic terrains, *J. Geophys. Res.* 111 (2006) E06S04. <https://doi.org/10.1029/2005JE002589>.
- [149] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Električna provodnost, Mrežno Izd. Hrvat. Encikl. (2021). <https://enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69718> (accessed February

- 13, 2023).
- [150] J.A. Doolittle, F.E. Minzenmayer, S.W. Waltman, E.C. Benham, J.W. Tuttle, S.D. Peaslee, Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States, *Geoderma* 141 (2007) 416–421. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.015>.
- [151] I.L. Al-Qadi, S. Lahouar, Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice, *Constr. Build. Mater.* 19 (2005) 763–772. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2005.06.005>.
- [152] H. Liu, M. Sato, in situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array, *NDT E Int.* 64 (2014) 65–71. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2014.03.001>.
- [153] I.L. Al-Qadi, S. Lahouar, A. Loulizi, Ground-Penetrating Radar Calibration at the Virginia Smart Road and Signal Analysis to Improve Prediction of Flexible Pavement Layer Thicknesses, Blacksburg, 2005.
- [154] L. Wang, X. Gu, Z. Liu, W. Wu, D. Wang, Automatic detection of asphalt pavement thickness: A method combining GPR images and improved Canny algorithm, *Measurement* 196 (2022) 111248. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111248>.
- [155] S. Lahouar, I.L. Al-Qadi, Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data, *NDT E Int.* 41 (2008) 69–81. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2007.09.001>.
- [156] M. Graczyk, L. Krysiński, Ł. Topczewski, J. Sudyka, The Use of Three-dimensional Analysis of GPR Data in Evaluation of Operational Safety of Airfield Pavements, *Transp. Res. Procedia* 14 (2016) 3704–3712. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.490>.
- [157] I.L. Al-Qadi, S. Lahouar, K. Jiang, K.K. McGhee, D. Mokarem, Accuracy of Ground-Penetrating Radar for Estimating Rigid and Flexible Pavement Layer Thicknesses, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1940 (2005) 69–78. <https://doi.org/10.1177/0361198105194000109>.
- [158] K. Maser, Pavement Characterization Using Ground Penetrating Radar: State of the Art and Current Practice, in: S.D. Tayabji, E.O. Lukanen (Eds.), *Nondestruct. Test. Pavements Backcalc. Modul. Third Vol.*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000: pp. 313–326. <https://doi.org/10.1520/STP14775S>.
- [159] J. Sudyka, L. Krysiński, Evaluation of Homogeneity of Thickness of New Asphalt Layers Using GPR, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 356 (2018) 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012025>.
-

-
- [160] Š. Bezina, I. Stančerić, T. Rukavina, J. Domitrović, Influence of data acquisition speed on pavement layer thickness determined by GPR, in: S. Lakušić (Ed.), 7th Int. Conf. Road Rail Infrastruct., Pula, 2022: pp. 457–463. <https://doi.org/10.5592/CO/CETRA.2022.1423>.
- [161] I.L. Al-Qadi, S. Lahouar, A. Loulizi, Ground Penetrating Radar Evaluation for Flexible Pavement Thickness Estimation, in: Proc. Pavement Eval. Conf., Roanoke, 2002.
- [162] M. Ožbolt, T. Rukavina, J. Domitrović, Comparison of the Pavement Layers Thickness Measured by Georadar and Conventional Methods – Examples From Croatia, Balt. J. Road Bridg. Eng. 7 (2012) 30–35. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2012.04>.
- [163] C. Grégoire, C. Van Geem, Use of radar in road investigation BRRC experience, IWAGPR 2013 - Proc. 2013 7th Int. Work. Adv. Gr. Penetrating Radar (2013). <https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2013.6601515>.
- [164] C. Holzschuher, H.S. Lee, J. Greene, Accuracy and Repeatability of Ground Penetrating Radar for Surface Layer Thickness Estimation of Florida Roadways, Gainesville, 2007.
- [165] R.A. Tarefder, M.U. Ahmed, Ground Penetrating Radar for Measuring Thickness of an Unbound Layer of a Pavement, in: T. Ahram, W. Karwowski (Eds.), Adv. Hum. Factors, Software, Syst. Eng. AHFE 2017, Springer, Cham, Los Angeles, 2018: pp. 160–167. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6_16.
- [166] J. Domitrović, Š. Bezina, I. Stančerić, T. Rukavina, 3D modelling of asphalt concrete overlay based on GPR data, Int. J. Pavement Eng. 0 (2021) 1–10. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2004413>.
- [167] C. Le Bastard, V. Baltazart, Y. Wang, J. Saillard, Thin-pavement thickness estimation using GPR with high-resolution and superresolution methods, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 45 (2007) 2511–2519. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900982>.
- [168] A. Loizos, C. Plati, Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches, NDT E Int. 40 (2007) 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.09.001>.
- [169] A. Loulizi, I.L. Al-Qadi, S. Lahouar, Optimization of ground-penetrating radar data to predict layer thicknesses in flexible pavements, J. Transp. Eng. 129 (2003) 93–99. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:1\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:1(93)).
- [170] K.R. Maser, T. Scullion, Automated detection of pavement layer thickness and subsurface moisture using ground penetrating radar, Transp. Res. Rec. (1991) 22–30.
- [171] W.R. Borges, L.A. Da Silva, L.S. Da Cunha, R.M.G.C. Branco, M.M. de Farias, Gpr Applied To Rigid Pavement From Santos Dumont Airport, RJ, Rev. Bras. Geofísica 32
-

- (2014) 225–234. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v32i2.454>.
- [172] Š. Bezina, I. Stančerić, J. Domitrović, T. Rukavina, Spatial representation of GPR data—accuracy of asphalt layers thickness mapping, *Remote Sens.* 13 (2021) 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs13050864>.
- [173] G.W. Flintsch, I.L. Al-Qadi, A. Loulizi, S. Lahouar, K. McGhee, T. Clark, *Field Investigation of High Performance Pavements in Virginia*, Blacksburg, 2005.
- [174] L.B. Conyers, *Ground-Penetrating Radar for Geoarchaeology*, 1st ed., Wiley-Blackwell, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781118949993>.
- [175] X. Liu, J. Chen, X. Cui, Q. Liu, X. Cao, X. Chen, Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: a review of current methods, *Int. J. Digit. Earth* 12 (2019) 95–118. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1412520>.
- [176] A. Walia, R. Rastogi, P. Kumar, S.S. Jain, Reviewing methods for determination of Dielectric Constant required to Calibrate GPR Study for Asphalt Layers, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1075 (2021) 1–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1075/1/012026>.
- [177] D. Picchi, S. Brell-Çokcan, A modified common midpoint approach for GPR radars, *Constr. Robot.* 6 (2022) 319–328. <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00086-z>.
- [178] A. De Coster, A. Van der Wielen, C. Grégoire, S. Lambot, Evaluation of pavement layer thicknesses using GPR: A comparison between full-wave inversion and the straight-ray method, *Constr. Build. Mater.* 168 (2018) 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.100>.
- [179] K. Maser, J. Puccinelli, *Ground Penetrating Radar (GPR) Analysis : Phase I*, Arlington, Massachusetts, 2009.
- [180] S. Lahouar, I.L. Al-Qadi, A. Loulizi, T.M. Clark, D.T. Lee, Approach to Determining In Situ Dielectric Constant of Pavements: Development and Implementation at Interstate 81 in Virginia, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1806 (2002) 81–87. <https://doi.org/10.3141/1806-09>.
- [181] I.L. Al-Qadi, S. Lahouar, A. Loulizi, Successful Application of Ground-Penetrating Radar for Quality Assurance-Quality Control of New Pavements, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1861 (2003) 86–97. <https://doi.org/10.3141/1861-10>.
- [182] N. Diamanti, D. Redman, Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks, *J. Appl. Geophys.* 81 (2012) 106–116. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2011.09.006>.
- [183] L. Krysiński, J. Sudyka, GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks, *J. Appl. Geophys.* 97 (2013) 27–36.
-

- <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2013.03.010>.
- [184] M. Solla, S. Lagüela, H. González-Jorge, P. Arias, Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings, *NDT E Int.* 62 (2014) 55–65. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2013.11.006>.
- [185] F.M. Fernandes, J.C. Pais, Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR, *Constr. Build. Mater.* 154 (2017) 1130–1138. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.08.022>.
- [186] M. Eskandari Torbaghan, W. Li, N. Metje, M. Burrow, D.N. Chapman, C.D.F. Rogers, Automated detection of cracks in roads using ground penetrating radar, *J. Appl. Geophys.* 179 (2020) 104118. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2020.104118>.
- [187] M.A. Rasol, V. Pérez-Gracia, F.M. Fernandes, J.C. Pais, M. Solla, C. Santos, NDT assessment of rigid pavement damages with ground penetrating radar: laboratory and field tests, *Int. J. Pavement Eng.* 23 (2022) 900–915. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778692>.
- [188] C. Plati, A. Loizos, Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies, *J. Appl. Geophys.* 97 (2013) 3–10. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2013.04.007>.
- [189] J. Pedret Rodés, V. Pérez-Gracia, A. Martínez-Reguero, Evaluation of the GPR frequency spectra in asphalt pavement assessment, *Constr. Build. Mater.* 96 (2015) 181–188. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.017>.
- [190] L. Yi, L. Zou, M. Sato, Practical approach for high-resolution airport pavement inspection with the yakumo multistatic array ground-penetrating radar system, *Sensors (Switzerland)* 18 (2018) 1–14. <https://doi.org/10.3390/s18082684>.
- [191] X. Song, R. Wu, J. Liu, Underground diseases identification of airport runway using GPR, *Prog. Electromagn. Res. Symp.* 1 (2010) 82–86.
- [192] D. Doler, B. Kovačič, Improved decision-making geo-information system for continuous monitoring of deformations on airport infrastructure, *ISPRS Int. J. Geo-Information* 8 (2019) 1–16. <https://doi.org/10.3390/ijgi8010001>.
- [193] L. Zou, L. Yi, M. Sato, On the Use of Lateral Wave for the Interlayer Debonding Detecting in an Asphalt Airport Pavement Using a Multistatic GPR System, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 58 (2020) 4215–4224. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2961772>.
- [194] V. Marecos, S. Fontul, M.L. Antunes, M. Solla, Assessment of a concrete pre-stressed runway pavement with ground penetrating radar, in: 2015 8th Int. Work. Adv. Gr.

-
- Penetrating Radar, IEEE, Florence, Italy, 2015: pp. 1–4.
<https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2015.7292635>.
- [195] I.L. Al-Qadi, W. Xie, D.L. Jones, R. Roberts, Development of a time-frequency approach to quantify railroad ballast fouling condition using ultra-wide band ground-penetrating radar data, *Int. J. Pavement Eng.* 11 (2010) 269–279.
<https://doi.org/10.1080/10298431003749766>.
- [196] Z. Khakiev, V. Shapovalov, A. Kruglikov, V. Yavna, GPR determination of physical parameters of railway structural layers, *J. Appl. Geophys.* 106 (2014) 139–145.
<https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2014.04.017>.
- [197] C. Plati, A. Loizos, V. Papavasiliou, Inspection of railroad ballast using geophysical method, *Int. J. Pavement Eng.* 11 (2010) 309–317.
<https://doi.org/10.1080/10298431003749741>.
- [198] S. Fontul, E. Fortunato, F. De Chiara, R. Burrinha, M. Baldeiras, Railways Track Characterization Using Ground Penetrating Radar, *Procedia Eng.* 143 (2016) 1193–1200. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.06.120>.
- [199] T.R. Sussmann, Application of ground penetrating radar to railway track substructure maintenance management, University of Massachusetts Amherst, 1999.
- [200] F. Benedetto, F. Tosti, A.M. Alani, An entropy-based analysis of GPR data for the assessment of railway ballast conditions, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 55 (2017) 3900–3908. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2683507>.
- [201] L.B. Ciampoli, A. Calvi, F. D’Amico, Railway ballast monitoring by GPR: A test-site investigation, *Remote Sens.* 11 (2019) 1–14. <https://doi.org/10.3390/rs11202381>.
- [202] R. De Bold, G. O’Connor, J.P. Morrissey, M.C. Forde, Benchmarking large scale GPR experiments on railway ballast, *Constr. Build. Mater.* 92 (2015) 31–42.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.09.036>.
- [203] E.M. Fernandes, M. Pereira, A.G. Correia, P.B. Lourenço, L. Caldeira, Assessment of layer thickness and uniformity in railway embankments with ground penetrating radar, *Adv. Transp. Geotech. - Proc. 1st Int. Conf. Transp. Geotech.* (2008) 571–575.
<https://doi.org/10.1201/9780203885949.pt8>.
- [204] A. Borkovcová, V. Borecký, S.S. Artagan, F. Ševčík, Quantification of the mechanized ballast cleaning process efficiency using GPR technology, *Remote Sens.* 13 (2021) 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs13081510>.
- [205] G. Liu, Z. Peng, G. Jing, S. Wang, Y. Li, Y. Guo, Railway ballast layer inspection with different GPR antennas and frequencies, *Transp. Geotech.* 36 (2022) 1–10.
-

- <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100823>.
- [206] Y. Guo, S. Wang, G. Jing, F. Yang, G. Liu, W. Qiang, Y. Wang, Assessment of ballast layer under multiple field conditions in China, *Constr. Build. Mater.* 340 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127740>.
- [207] S.S. Artagan, V. Borecky, Advances in the nondestructive condition assessment of railway ballast: A focus on GPR, *NDT E Int.* 115 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102290>.
- [208] P. Boldrin, G. Fornasari, E. Rizzo, Review of Ground Penetrating Radar Applications for Bridge Infrastructures, *NDT 2* (2024) 53–75. <https://doi.org/10.3390/ndt2010004>.
- [209] A. V. Varnavina, A.K. Khamzin, L.H. Sneed, E. V. Torgashov, N.L. Anderson, N.H. Maerz, K.J. Boyko, Concrete bridge deck assessment: Relationship between GPR data and concrete removal depth measurements collected after hydrodemolition, *Constr. Build. Mater.* 99 (2015) 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.008>.
- [210] K. Dinh, N. Gucunski, T. Zayed, Automated visualization of concrete bridge deck condition from GPR data, *NDT E Int.* 102 (2019) 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.11.015>.
- [211] M. Janků, P. Cikrle, J. Grošek, O. Anton, J. Stryk, Comparison of infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges, *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) 1098–1111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.320>.
- [212] H. Rathod, S. Debeck, R. Gupta, B. Chow, Applicability of GPR and a rebar detector to obtain rebar information of existing concrete structures, *Case Stud. Constr. Mater.* 11 (2019) e00240. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00240>.
- [213] P. Asadi, M. Gindy, M. Alvarez, A. Asadi, A computer vision based rebar detection chain for automatic processing of concrete bridge deck GPR data, *Autom. Constr.* 112 (2020) 103106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103106>.
- [214] X. Ma, H. Liu, M.L. Wang, R. Birken, Automatic detection of steel rebar in bridge decks from ground penetrating radar data, *J. Appl. Geophys.* 158 (2018) 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.07.010>.
- [215] M. Abouhamad, T. Dawood, A. Jabri, M. Alsharqawi, T. Zayed, Corrosiveness mapping of bridge decks using image-based analysis of GPR data, *Autom. Constr.* 80 (2017) 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.004>.
- [216] S. Abu Dabous, S. Yaghi, S. Alkass, O. Moselhi, Concrete bridge deck condition assessment using IR Thermography and Ground Penetrating Radar technologies, *Autom.*
-

- Constr. 81 (2017) 340–354. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.04.006>.
- [217] N. Diamanti, A.P. Annan, J.D. Redman, Concrete Bridge Deck Deterioration Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR), *J. Environ. Eng. Geophys.* 22 (2017) 121–132. <https://doi.org/10.2113/JEEG22.2.121>.
- [218] K. Dinh, N. Gucunski, J. Kim, T.H. Duong, Method for attenuation assessment of GPR data from concrete bridge decks, *NDT E Int.* 92 (2017) 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.07.016>.
- [219] F. Ghodoosi, A. Bagchi, T. Zayed, M.R. Hosseini, Method for developing and updating deterioration models for concrete bridge decks using GPR data, *Autom. Constr.* 91 (2018) 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.014>.
- [220] J.Y. Rhee, J.J. Choi, S.H. Kee, Evaluation of the Depth of Deteriorations in Concrete Bridge Decks with Asphalt Overlays Using Air-Coupled GPR: A Case Study from a Pilot Bridge on Korean Expressway, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 13 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0327-7>.
- [221] A.M. Alani, F. Tosti, L.B. Ciampoli, V. Gagliardi, A. Benedetto, An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies, *NDT E Int.* 115 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102288>.
- [222] J. Zhang, C. Zhang, Y. Lu, T. Zheng, Z. Dong, Y. Tian, Y. Jia, In-situ recognition of moisture damage in bridge deck asphalt pavement with time-frequency features of GPR signal, *Constr. Build. Mater.* 244 (2020) 118295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118295>.
- [223] C. Biscarini, I. Catapano, N. Cavalagli, G. Ludeno, F.A. Pepe, F. Ubertini, UAV photogrammetry, infrared thermography and GPR for enhancing structural and material degradation evaluation of the Roman masonry bridge of Ponte Lucano in Italy, *NDT E Int.* 115 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102287>.
- [224] C. Li, M.-J. Li, Y.-G. Zhao, H. Liu, Z. Wan, J.-C. Xu, X.-P. Xu, Y. Chen, B. Wang, Layer recognition and thickness evaluation of tunnel lining based on ground penetrating radar measurements, *J. Appl. Geophys.* 73 (2011) 45–48. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.11.004>.
- [225] F. Zhang, X. Xie, H. Huang, Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 25 (2010) 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.09.006>.
- [226] Xiaozhou Liu, Qiao Sun, Peng Liu, The application of Ground Penetrating Radar in

- detection of the water delivery tunnel lining, in: 2011 Int. Conf. Remote Sensing, Environ. Transp. Eng., IEEE, Nanjing, 2011: pp. 3632–3635. <https://doi.org/10.1109/RSETE.2011.5965114>.
- [227] B. Liu, J. Zhang, M. Lei, S. Yang, Z. Wang, Simultaneous tunnel defects and lining thickness identification based on multi-tasks deep neural network from ground penetrating radar images, *Autom. Constr.* 145 (2023) 104633. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104633>.
- [228] H. Qin, Y. Tang, Z. Wang, X. Xie, D. Zhang, Shield tunnel grouting layer estimation using sliding window probabilistic inversion of GPR data, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 112 (2021) 103913. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103913>.
- [229] Yu Hai-zhong, Ouyang Yu-feng, Chen Hong, Application of ground penetrating radar to inspect the metro tunnel, in: 2012 14th Int. Conf. Gr. Penetrating Radar, IEEE, Shanghai, China, 2012: pp. 759–763. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254963>.
- [230] Xiongyao Xie, Chenchao Zeng, Non-destructive evaluation of shield tunnel condition using GPR and 3D laser scanning, in: 2012 14th Int. Conf. Gr. Penetrating Radar, IEEE, Shanghai, China, 2012: pp. 479–484. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254913>.
- [231] Xiaolei Xiong, Qicai Zhou, Jie Zhou, Yunjie Ma, Kai Wang, Application of GPR technique and research on high-speed railway tunnel, in: 2012 14th Int. Conf. Gr. Penetrating Radar, IEEE, Shanghai, China, 2012: pp. 524–529. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254920>.
- [232] L. Xiang, H. Zhou, Z. Shu, S. Tan, G. Liang, J. Zhu, GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study, *NDT E Int.* 59 (2013) 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.05.004>.
- [233] Q. Yu, H. Zhou, Y. Wang, R. Duan, Quality monitoring of metro grouting behind segment using ground penetrating radar, *Constr. Build. Mater.* 110 (2016) 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.109>.
- [234] Y.W. Zan, G.F. Su, Z.L. Li, X.Y. Zhang, A train-mounted GPR system for fast and efficient monitoring of tunnel health conditions, in: 2016 16th Int. Conf. Gr. Penetrating Radar, IEEE, Hong Kong, China, 2016: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572696>.
- [235] Y. Cao, Q. Liu, L. Tao, Application of Ground Penetrating Radar for Detecting Grouting Quality in Highway Tunnel, in: 2019 IEEE 8th Jt. Int. Inf. Technol. Artif. Intell. Conf., IEEE, Chongqing, China, 2019: pp. 827–832. <https://doi.org/10.1109/ITAIC.2019.8785549>.
-

-
- [236] M.A.N. Ismail, A.A. Abas, M.H. Arifin, M.A.N. Ismail, N.A. Othman, A. Setu, M.R. Ahmad, M.K. Shah, S. Amin, T. Sarah, Integrity inspection of main access tunnel using ground penetrating radar, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 271 (2017) 012088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012088>.
- [237] X. Wu, X. Bao, J. Shen, X. Chen, H. Cui, Evaluation of Void Defects behind Tunnel Lining through GPR forward Simulation, *Sensors* 22 (2022) 9702. <https://doi.org/10.3390/s22249702>.
- [238] S. Tang, X.B. Bai, Study on Application of GPR to Quality Detection of Tunnel Lining, *Appl. Mech. Mater.* 333–335 (2013) 1611–1616. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.333-335.1611>.
- [239] G. Kilic, L. Eren, Neural network based inspection of voids and karst conduits in hydro–electric power station tunnels using GPR, *J. Appl. Geophys.* 151 (2018) 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.02.026>.
- [240] E. Cardarelli, C. Marrone, L. Orlando, Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods, *J. Appl. Geophys.* 52 (2003) 93–102. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00242-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00242-2).
- [241] D. Arosio, S. Munda, L. Zanzi, L. Longoni, M. Papini, GPR Investigations to Assess the State of Damage of a Concrete Water Tunnel, *J. Environ. Eng. Geophys.* 17 (2012) 159–169. <https://doi.org/10.2113/JEEG17.3.159>.
- [242] F.J. Prego, M. Solla, X. Núñez-Nieto, P. Arias, Assessing the Applicability of Ground-Penetrating Radar to Quality Control in Tunneling Construction, *J. Constr. Eng. Manag.* 142 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001095](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001095).
- [243] A.M. Alani, F. Tosti, GPR applications in structural detailing of a major tunnel using different frequency antenna systems, *Constr. Build. Mater.* 158 (2018) 1111–1122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.100>.
- [244] A.M. Alani, K. Banks, Applications of ground penetrating radar in the Medway Tunnel - Inspection of structural joints, in: *Proc. 15th Int. Conf. Gr. Penetrating Radar*, IEEE, Brussels, Belgium, 2014: pp. 461–464. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970466>.
- [245] E.T. Selig, J.M. Waters, *Track geotechnology and substructure management*, 1st ed., Thomas Telford, London, 1994. <https://doi.org/10.1680/tgasm.20139>.
- [246] N.T. Ngo, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, DEM simulation of the behaviour of geogrid stabilised ballast fouled with coal, *Comput. Geotech.* 55 (2014) 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.09.008>.
- [247] Y. Guo, L. Zong, V. Markine, X. Wang, G. Jing, Experimental and numerical study on
-

-
- lateral and longitudinal resistance of ballasted track with nailed sleeper, *Int. J. Rail Transp.* 10 (2022) 114–132. <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.1872424>.
- [248] C. Ngamkhanong, B. Feng, E. Tutumluer, Y. M.A. Hashash, S. Kaewunruen, Evaluation of lateral stability of railway tracks due to ballast degradation, *Constr. Build. Mater.* 278 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122342>.
- [249] J.A. Zakeri, S.A. Mosayebi, Study of ballast layer stiffness in railway tracks, *J. Croat. Assoc. Civ. Eng.* 68 (2016) 311–318. <https://doi.org/10.14256/JCE.1232.2015>.
- [250] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, J.S. Vinod, A review of ballast characteristics , geosynthetics , confining pressures and native vegetation in rail track stabilisation, *Transp. Eng. Aust.* 12 (2009) 25–36.
- [251] T.P.M.o. Railways, *Railway Ballast*, TB/T2140-2008, Beijing, 2008.
- [252] Z. Leng, I.L. Al-Qadi, Dielectric Constant Measurement of Railroad Application of STFT for GPR Data Analysis, in: O. Abraham, X. Derobert (Eds.), *Proc. 7th Int. Non-Destructive Test. Civ. Eng. Symp.*, Nantes, France, 2009: pp. 2–7.
- [253] S.S. Artagan, *Osobna korespodencija*, (n.d.).
- [254] A. Benedetto, F. Tosti, L. Bianchini Ciampoli, A. Calvi, M.G. Brancadoro, A.M. Alani, Railway ballast condition assessment using ground-penetrating radar – An experimental, numerical simulation and modelling development, *Constr. Build. Mater.* 140 (2017) 508–520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.110>.
- [255] F. Tosti, *Experimental and theoretical investigation on road pavements and materials through ground-penetrating radar*, Università degli Studi Roma Tre, 2014.
- [256] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Roadside Design Guid*, 4th ed., Washington, 2011.
- [257] W.B. Muller, H. Bhuyan, A. Scheuermann, A comparison of modified free-space (MFS), GPR, and TDR techniques for permittivity characterisation of unbound granular pavement materials, *Near Surf. Geophys.* 14 (2016) 537–550. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016032>.
- [258] The State of Queensland (Department of Transport and Main Roads), *Technical Specification MRTS05 Unbound Pavements*, 2022.
- [259] W. Spencer Guthrie, P.M. Ellis, T. Scullion, Repeatability and Reliability of the Tube Suction Test, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1772 (2001) 151–157. <https://doi.org/10.3141/1772-18>.
- [260] Y.S. Yeo, H. Nikraz, P. Jitsangiam, Tube suction test to measure moisture susceptibility of Australian pavements, *Eng. J.* 16 (2012) 159–168.
-

- <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.4.159>.
- [261] C. Berthelot, D. Podborochynski, T. Saarenketo, B. Marjerison, C. Prang, Ground-Penetrating Radar Evaluation of Moisture and Frost across Typical Saskatchewan Road Soils, *Adv. Civ. Eng.* (2010) 1–9. <https://doi.org/10.1155/2010/416190>.
- [262] Adek Percometers, (n.d.). <https://www.roadscanners.com/products/percometer/>.
- [263] T. Saarenketo, T. Scullion, Road evaluation with ground penetrating radar, *J. Appl. Geophys.* 43 (2000) 119–138. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X).
- [264] T. Saarenketo, T. Scullion, Using electrical properties to classify the strength properties of base course aggregates, College Station, Texas, 1995. <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/1341-2.pdf>.
- [265] W. Skierucha, A. Wilczek, A. Szyplowska, C. Sławiński, K. Lamorski, A TDR-Based Soil Moisture Monitoring System with Simultaneous Measurement of Soil Temperature and Electrical Conductivity, *Sensors* 12 (2012) 13545–13566. <https://doi.org/10.3390/s121013545>.
- [266] H.M. Lee, G.S. Lee, G.Y. Kwon, S.S. Bang, Y.J. Shin, Industrial Applications of Cable Diagnostics and Monitoring Cables via Time-Frequency Domain Reflectometry, *IEEE Sens. J.* 21 (2021) 1082–1091. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2997696>.
- [267] J.A. Huisman, A.H. Weerts, T.J. Heimovaara, W. Bouten, Comparison of travel time analysis and inverse modeling for soil water content determination with time domain reflectometry, *Water Resour. Res.* 38 (2002) 13-1-13–8. <https://doi.org/10.1029/2001wr000259>.
- [268] Hore-Lacy Will, Didier Bodin, Alexander Scheuermann, Time domain reflectometry (TDR) based moisture monitoring system for unbound granular pavements, in: 26th ARRB Conf. – Res. Driv. Effic., Sydney, 2014: pp. 1–13.
- [269] J.L. Davis, W.J. Chudobiak, In Situ Meter for Measuring Relative Permittivity of Soils, *Environ. Sci. Eng. Geol.* (1975). <https://doi.org/10.4095/104349>.
- [270] K. Noborio, Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, 2001. www.elsevier.com/locate/compag.
- [271] G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.* 16 (1980) 574–582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>.
- [272] H.R. Bogaena, J.A. Huisman, B. Schilling, A. Weuthen, H. Vereecken, Effective calibration of low-cost soil water content sensors, *Sensors (Switzerland)* 17 (2017). <https://doi.org/10.3390/s17010208>.
-

-
- [273] T. Gnatowski, J. Szatyłowicz, B. Pawluśkiewicz, R. Oleszczuk, M. Janicka, E. Papierowska, D. Szejba, Field calibration of TDR to assess the soil moisture of drained peatland surface layers, *Water* (Switzerland) 10 (2018). <https://doi.org/10.3390/w10121842>.
- [274] N. Wagner, A. Scheuermann, On the relationship between matric potential and dielectric properties of organic free soils: a sensitivity study, *Can. Geotech. J.* 46 (2009) 1202–1215. <https://doi.org/10.1139/T09-055>.
- [275] H. He, W. Zou, S.B. Jones, D.A. Robinson, R. Horton, M. Dyck, V. Filipović, K. Noborio, K. Bristow, Y. Gong, W. Sheng, Q. Wu, H. Feng, Y. Liu, Critical review of the models used to determine soil water content using TDR-measured apparent permittivity, in: *Adv. Agron., Academic Press Inc.*, 2023: pp. 169–219. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.06.004>.
- [276] H. He, K. Aogu, M. Li, J. Xu, W. Sheng, S.B. Jones, J.D. González-Teruel, D.A. Robinson, R. Horton, K. Bristow, M. Dyck, V. Filipović, K. Noborio, Q. Wu, H. Jin, H. Feng, B. Si, J. Lv, A review of time domain reflectometry (TDR) applications in porous media, in: *Adv. Agron., Academic Press Inc.*, 2021: pp. 83–155. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.02.003>.
- [277] M.I. Abdulraheem, H. Chen, L. Li, A.Y. Moshood, W. Zhang, Y. Xiong, Y. Zhang, L.B. Taiwo, A.A. Farooque, J. Hu, Recent Advances in Dielectric Properties-Based Soil Water Content Measurements, *Remote Sens.* 16 (2024). <https://doi.org/10.3390/rs16081328>.
- [278] W. Skierucha, Accuracy of soil moisture measurement by TDR technique, *Int. Agrophysics* 14 (2000) 417–426. <http://www.international-agrophysics.org/Accuracy-of-soil-moisture-measurement-by-tdr-technique,106919,0,2.html> (accessed June 1, 2024).
- [279] E. Fatás, J. Vicente, B. Latorre, F. Lera, V. Viñals, M.V. López, N. Blanco, C. Peña, C. González-Cebollada, D. Moret-Fernández, TDR-LAB 2.0 Improved TDR Software for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurements, *Procedia Environ. Sci.* 19 (2013) 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.054>.
- [280] S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or, Time domain reflectometry measurement principles and applications, *Hydrol. Process.* 16 (2002) 141–153. <https://doi.org/10.1002/hyp.513>.
- [281] M. Amato, J.T. Ritchie, Small Spatial Scale Soil Water Content Measurement with Time-Domain Reflectometry, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59 (1995) 325–329. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020008x>.
-

-
- [282] D.B. Hudson, P.J. Wierenga, R.G. Hills, Unsaturated Hydraulic Properties from Upward Flow into Soil Cores, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 (1996) 388–396. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000020009x>.
- [283] W.R. Whalley, Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content, *J. Soil Sci.* 44 (1993) 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00429.x>.
- [284] H. He, M. Dyck, J. Wang, J. Lv, Evaluation of TDR for Quantifying Heat-Pulse-Method-Induced Ice Melting in Frozen Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79 (2015) 1275–1288. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.12.0499>.
- [285] H. He, M.F. Dyck, R. Horton, T. Ren, K.L. Bristow, J. Lv, B. Si, Development and Application of the Heat Pulse Method for Soil Physical Measurements, *Rev. Geophys.* 56 (2018) 567–620. <https://doi.org/10.1029/2017RG000584>.
- [286] A.P. Annan, Time-domain reflectometry - air-gap problem for parallel wire transmission lines, *Geol. Surv. Canada* (1977) 59-62. Project 750037. <https://doi.org/10.4095/102753>.
- [287] G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan, Electromagnetic Determination of Soil Water Content Using TDR: I. Applications to Wetting Fronts and Steep Gradients, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46 (1982) 672–678. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600040002x>.
- [288] A. Rothe, W. Weis, K. Kreutzer, D. Matthies, U. Hess, B. Ansorge, Changes in soil structure caused by the installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture, *Water Resour. Res.* 33 (1997) 1585–1593. <https://doi.org/10.1029/97WR00677>.
- [289] S.L. Hokett, J.B. Chapman, S.D. Cloud, Notes Time Domain Reflectometry Response to Lateral Soil Water Content Heterogeneities, n.d.
- [290] J.H. Knight, P.A. Ferré, D.L. Rudolph, R.G. Kachanoski, A numerical analysis of the effects of coatings and gaps upon relative dielectric permittivity measurement with time domain reflectometry, *Water Resour. Res.* 33 (1997) 1455–1460. <https://doi.org/10.1029/97WR00435>.
- [291] J. Stein, G. Laberge, D. Levesque, Monitoring the dry density and the liquid water content of snow ž / using time domain reflectometry TDR, 1997.
- [292] L. Fiala, M. Pavlíková, Z. Pavlík, Application of TDR method for moisture profiles measurement in cellular concrete, in: *Adv. Mater. Res.*, Trans Tech Publications Ltd, 2014: pp. 11–15. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.982.11>.
- [293] Z. Pavlík, L. Fiala, R. Černý, Determination of moisture content of hygroscopic building
-

- materials using time domain reflectometry, *J. Appl. Sci.* 8 (2008) 1732–1737. <https://doi.org/10.3923/jas.2008.1732.1737>.
- [294] A. Cataldo, E. De Benedetto, G. Cannazza, E. Piuze, E. Pittella, TDR-based measurements of water content in construction materials for in-the-field use and calibration, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 67 (2018) 1230–1237. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2770778>.
- [295] U.C. Malavasi, A.S. Davis, M. de M. Malavasi, Estimating Water in Living Woody Stems - a Review, *CERNE* 22 (2016) 415–422. <https://doi.org/10.1590/01047760201622032169>.
- [296] E. Baran, Use of time domain reflectometry for monitoring moisture changes in crushed rock pavements, in: *Symp. Work. Time Domain Reflectometry Environ. Infrastructure, Min. Appl., Illinois, USA, 1994*.
- [297] Y.J. Jiang, S.D. Tayabji, Analysis of time domain reflectometry data from LTPP seasonal monitoring program test sections, 1999.
- [298] J. Ekblad, Influence of Water on Coarse Granular Road Material Properties, Royal Institute of Technology, 2007.
- [299] P. Pooh, Moisture Content Determination Of Unbound And Subgrade Materials In A Pavement Structure, in: *4th Int. Conf. Bear. Capacit. Roads Airfields FHWA, 1994*: pp. 807–825.
- [300] M.H. Bhuyan, T. Bore, A. Scheuermann, Z. Chen, J. Nguyen, D. Bodin, R. Becker, Introduction of flat ribbon cable (FRC) sensor for density measurement of road materials using time domain reflectometry (TDR), in: *ICSMGE 2017 - 19th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng., 2017*: pp. 1341–1344.
- [301] Unbound pavements, Technical Specification, Brisbane, Australia., Australia, 2015.
- [302] M.H. Bhuyan, A. Scheuermann, P.N. Mishra, D. Bodin, R. Becker, Flat ribbon cable sensors for measurement of soil electrical conductivity using time domain reflectometry, *Int. J. Geotech. Eng.* 15 (2021) 608–616. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1429703>.
- [303] M.H. Bhuyan, S. Islam, J. Grobler, J. Lee, A. Scheuermann, Application of Time Domain Reflectometry Method in Monitoring State Parameters of Subgrade Soil in Pavement, *J. Transp. Eng. Part B Pavements* 146 (2020) 04020021. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000172>.
- [304] H. Bhuyan, A. Scheuermann, D. Bodin, R. Becker, Use of time domain reflectometry to estimate moisture and density of unbound road materials: Laboratory calibration and

- field investigation, Transp. Res. Rec. 2655 (2017) 71–81. <https://doi.org/10.3141/2655-10>.
- [305] J. Ekblad, U. Isacsson, Time-domain reflectometry measurements and soil-water characteristic curves of coarse granular materials used in road pavements, Can. Geotech. J. 44 (2007) 858–872. <https://doi.org/10.1139/t07-024>.
- [306] J. Tišlja, Sedimentologija karbonata i evaporita, Institut za geološka istraživanja u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [307] HRN EN 932-1, Ispitivanje općih svojstava agregata -- 1.dio: Metode uzorkovanja, 2003.
- [308] HRN EN 932-2, Ispitivanje općih svojstava agregata -- 2.dio: Metode smanjivanja laboratorijskih uzoraka, (2003).
- [309] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Granulometrijski sastav, Mrežno Izd. Hrvat. Encikl. (2021). <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=68008> (accessed November 10, 2023).
- [310] HRN EN ISO 17892-4, Geotehničko istraživanje i ispitivanje -- Laboratorijsko ispitivanje tla -- 4. dio: Određivanje granulometrijskog sastava, 2016.
- [311] HRN EN ISO 17892-3, Geotehničko istraživanje i ispitivanje -- Laboratorijsko ispitivanje tla -- 3. dio: Određivanje gustoće čvrstih čestica, 2016.
- [312] C. Afonso, E. Neves, A. Teixeira, M.M. Carvalho, Soil Particle Density Determination According to EN ISO 17892-3: 2015: Some Difficulties in Laboratory Practices, 1st ed., Springer International Publishing, Porto, 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25986-9>.
- [313] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Knjiga III – Kolnička konstrukcija, 2001.
- [314] N. Thom, Principles of Pavement Engineering, 2nd ed., Thomas Telford Ltd, 2008. <https://doi.org/10.1680/pope.34808>.
- [315] HRN EN 933-4, Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata -- 4. dio: Određivanje oblika zrna -- Indeks oblika, 2004.
- [316] M. Türköz, H. Tosun, The use of methylene blue test for predicting swell parameters of natural clay soils, Sci. Res. Essays 6 (2011) 1780–1792. <https://doi.org/10.5897/SRE10.629>.
- [317] E. Manthos, Sand equivalent and methylene blue value of aggregates for highway engineering, Found. Civ. Environ. Eng. (2007) 111–121.
- [318] HRN EN 933-9, Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata -- 9. dio: Procjena sitnih čestica -- Ispitivanje metilenskim modrilom, 2022.
- [319] L. Hołysz, P. Rek, M. Huber, K. Terpiłowski, Evaluation and comparison of various

-
- methods used for aggregates investigations, Adsorption 30 (2024) 265–277. <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00393-z>.
- [320] M. Nikolić Ivanović, O. Đokić, S. Stefanović, B. Milić, Fines quality for base and subbase layers in pavement, in: Third Serbian Road Congr., 2018: pp. 1–9.
- [321] HRN EN 933-8, Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata -- 8. dio: Procjena sitnih čestica -- Određivanje ekvivalenta pijeska, 2015.
- [322] K. Liu, F. Wang, W.H. Zhang, Y.R. Wang, Research on Material Selection Standard of Graded Crushed Stone Base Course for Municipal Road, Appl. Mech. Mater. 164 (2012) 81–84. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.164.81>.
- [323] HRN EN 1744-1, Ispitivanja kemijskih svojstava agregata -- 1. dio: Kemijska analiza, (2102).
- [324] HRN EN 1097-6, Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata -- 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode, 2022.
- [325] HRN B.B8.002, Prirodni i drobljeni agregati - Ispitivanje postojanosti prema mrazu natrijevim sulfatom, 1982.
- [326] S. Kahraman, M. Fener, O. Gunaydin, Estimating the Abrasion Resistance of Rock Aggregates from the P-wave Velocity, Int. Appl. Geol. Congr. Dep. Geol. (2010) 500–505.
- [327] Y. Wu, F. Park, Aggregate Toughness / Abrasion Resistance and Durability / Soundness Tests Related to, Transp. Res. Rec. 1638 (1998) 85–93.
- [328] Y. Wu, F. Parker, P.S. Kandhal, Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements, 1998.
- [329] HRN EN 1097-2, Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata -- 2. dio: Metode za određivanje otpornosti na drobljenje, 2020.
- [330] HRN EN 13286-2:2010/Ispr.1, Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine -- 2. dio: Metode ispitivanja za određivanje laboratorijske referentne gustoće i udjela vode -- Zbijanje prema Proctoru, 2013.
- [331] HRN EN 13286-47, Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine -- 47. dio: Metoda ispitivanja za određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti, neposrednog indeksa nosivosti i linearnog bubrenja, 2021.
- [332] HRN U.B1.042, Određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti, 1969.
- [333] V.N. Kaliakin, Example Problems Related to Soil Identification and Classification, in: Soil Mech. Calc. Princ. Methods, 1st ed., Butterworth-Heinemann, 2017: pp. 51–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804491-9.00002-1>.
-

-
- [334] HRN U.B1.020., Određivanje granica konzistencije tla- Atterbergove granice, 1980.
- [335] T. Roje-Bonacci, Mehanika tla, 3., Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, 2007.
- [336] A. Thomas, Osobna korespodencija, (n.d.).
- [337] L. Verdonck, High-Resolution Ground-Penetrating Radar Prospection with a Modular Configuration Potential for the Detailed Imaging of Buried Archaeological Remains, Universitiet Gent, 2012.
- [338] M. Solla, C.S. Blázquez, I.M. Nieto, J.L. Rodríguez, M.Á. Maté-González, GPR Application on Geothermal Studies: The Case Study of the Thermal Baths of San Xusto (Pontevedra, Spain), Remote Sens. 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/rs14112667>.
- [339] D. Zhou, H. Zhu, Application of Ground Penetrating Radar in Detecting Deeply Embedded Reinforcing Bars in Pile Foundation, Adv. Civ. Eng. 2021 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/4813415>.
- [340] H.B. Bakir, Assessment of Vertical and Horizontal Ground Penetrating Radar Resolution for Typical Models of Different Targets, University of Baghdad, 2017. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18658.73927>.
- [341] A. Neal, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress, Earth-Science Rev. 66 (2004) 261–330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>.
- [342] X. Lucas Travassos, M.F. Pantoja, C.M. Rappaport, X. Lucas Travassos, M.F. Pantoja, Ground Penetrating Radar, in: N. Ida, N. Meyendorf (Eds.), Handb. Adv. Nondestruct. Eval., Springer International Publishing, Cham, 2019: pp. 987–1023. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26553-7_9.
- [343] C.Ç. Yalçiner, M. Bano, M. Kadioglu, V. Karabacak, M. Meghraoui, E. Altunel, New temple discovery at the archaeological site of Nysa (western Turkey) using GPR method, J. Archaeol. Sci. 36 (2009) 1680–1689. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.12.016>.
- [344] A.P. Annan, S.W. Cosway, Ground Penetrating Radar Survey Design, in: Symp. Appl. Geophys. to Eng. Environ. Probl. 1992, Environment and Engineering Geophysical Society, Chicago, 1992: pp. 329–351. <https://doi.org/10.4133/1.2921946>.
- [345] M. Frid, V. Frid, G. Scholar, Advancements in Drone-based (UAV) Ground Penetrating Radar for Accurate Boundary Mapping between Disturbed Clayey Soil and Natural Rock, Preprints (2024) 1–12. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.1034.v1>.
- [346] D. Anderson, Osobna korespodencija, (n.d.).
- [347] Acclima Digital True TDR-315Hitle, (2022). <https://acclima.com/tdr-315h-sdi-12-soil->
-

- moisture-sensor-data-sheet/ (accessed July 4, 2024).
- [348] M.W. Rasheed, J. Tang, A. Sarwar, S. Shah, N. Saddique, M.U. Khan, M. Imran Khan, S. Nawaz, R.R. Shamshiri, M. Aziz, M. Sultan, Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review, *Sustainability* 14 (2022) 11538. <https://doi.org/10.3390/su141811538>.
- [349] E. Martinez-López, D. Cárdenas-García, D. Cywiak-Córdova, Measuring Model for the Gravimetric Method by Drying in N-Stages Applied to Materials with High Moisture Content, *MAPAN* 39 (2024) 439–443. <https://doi.org/10.1007/s12647-023-00709-y>.
- [350] HRN EN 1097-5, Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata -- 5. dio: Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilirajućem sušioniku, 2008.
- [351] Z. Liu, J. Li, Y. Liu, C. Liu, C. Li, D. Zhou, Analyzing the behavior of GPR wave propagation in zinc contaminated soil combining the dielectric properties—experimental study, *Acta Geophys.* 69 (2021) 483–495. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00552-2>.
- [352] Geophysical Survey Systems Inc., SIR 20 Manual, Nashua, New Hampshire, 2017.
- [353] Geophysical Survey Systems Inc., RADAN 6.6 Manual, Nashua, New Hampshire, 2017.
- [354] F. Tosti, L. Bianchini Ciampoli, A. Calvi, A.M. Alani, A. Benedetto, An investigation into the railway ballast dielectric properties using different GPR antennas and frequency systems, *NDT E Int.* 93 (2018) 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.10.003>.
- [355] F. Tosti, A. Benedetto, A. Calvi, L.B. Ciampoli, Laboratory investigations for the electromagnetic characterization of railway ballast through GPR, in: 2016 16th Int. Conf. Gr. Penetrating Radar, IEEE, Hong Kong, China, 2016: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572605>.
- [356] Geophysical Survey Systems Inc., Antenas Manual, Nashua, New Hampshire, 2017.
- [357] Tsc 06.720- Meritve in preiskave – Deformacijski moduli vgrajenih materialov, 2003.
- [358] H. Brandl, Zbijanje tla i drugih zrnatih materijala za gradevine, *Gradevinar* 54 (2002) 513–527.
- [359] DIN 18125-2, Soil, investigation and testing – Determination of density of soil – Part 2: Field tests, 2011.
- [360] Q. Wang, Y. Chen, Y. Shen, M. Li, Construction Environment Noise Suppression of Ground-Penetrating Radar Signals Based on an RG-DMSA Neural Network, *Electronics* 13 (2024) 2843. <https://doi.org/10.3390/electronics13142843>.
- [361] V. Iyer, F. Hermans, T. Voigt, Detecting and Avoiding Multiple Sources of Interference in the 2.4 GHz Spectrum, in: *Lect. Notes Comput. Sci. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, 2015: pp. 35–51. <https://doi.org/10.1007/978->
-

3-319-15582-1_3.

- [362] M. Šopić, D. Car-Pušić, Statistička obrada podataka o vremenskim neprilikama u svrhu određivanja mjesečnog intervala s matematički očekivanim danima zastoja pri radu gradilišta na području grada Rijeke, Zb. Rad. 21 (2019) 67–85. <https://doi.org/10.32762/zr.21.1.4>.
- [363] V. Halttu, Osobna korespodencija, (n.d.).
- [364] P. Kolisoja, T. Saarenketo, H. Peltoniemi, N. Vuorimies, Laboratory testing of suction and deformation properties of base course aggregates, Transp. Res. Rec. (2002) 83–89. <https://doi.org/10.3141/1787-09>.

Prilozi

Prilog 1: Analiza granulometrijskog sastava uzoraka (prethodna laboratorijska ispitivanja)

Prilog 1.1 Rezultati prosijavanja

-mješavina M₁

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito %												
8,2	10,0	11,9	13,0	18,9	25,3	37,8	56,9	82,7	92,3	99,0	100,0	100,0

-mješavina M₂

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito %												
11,9	13,7	15,5	17,4	21,97	28,4	40,3	58,7	83,5	92,7	99,1	100,0	100,0

-mješavina M₃

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito %												
15,3	17,1	18,9	20,6	25,0	31,2	42,7	60,3	84,1	92,9	99,1	100,0	100,0

-mješavina M₄

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito %												
18,5	20,2	21,9	23,6	27,9	33,8	44,8	61,8	84,7	93,2	99,2	100,0	100,0

-mješavina M₅

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito %												
21,4	23,2	24,8	26,4	30,5	36,2	46,9	63,2	85,3	93,5	99,2	100,0	100,0

Prilog 1.2 Rezultati areometriranja

-mješavina M₁

Promjer zrna (mm)							
0,0494	0,0354	0,0228	0,0134	0,0079	0,0050	0,0032	0,0015
Udio zrna %							
7,0	6,1	5,1	3,9	2,8	2,2	2,0	1,3

-mješavina M₂

Promjer zrna (mm)							
0,0489	0,0347	0,0228	0,0134	0,0080	0,0049	0,0031	0,0015
Udio zrna %							
10,5	9,2	7,8	6,1	4,6	3,8	3,4	2,4

-mješavina M₃

Promjer zrna (mm)							
0,0484	0,0354	0,0230	0,0137	0,0081	0,0050	0,0032	0,0015
Udio zrna %							
13,6	12,1	10,3	8,2	6,3	5,3	4,7	3,5

-mješavina M₄

Promjer zrna (mm)							
0,0465	0,0347	0,0196	0,0137	0,0083	0,0050	0,0031	0,0014
Udio zrna %							
16,5	14,8	11,8	10,1	7,8	6,6	5,9	4,5

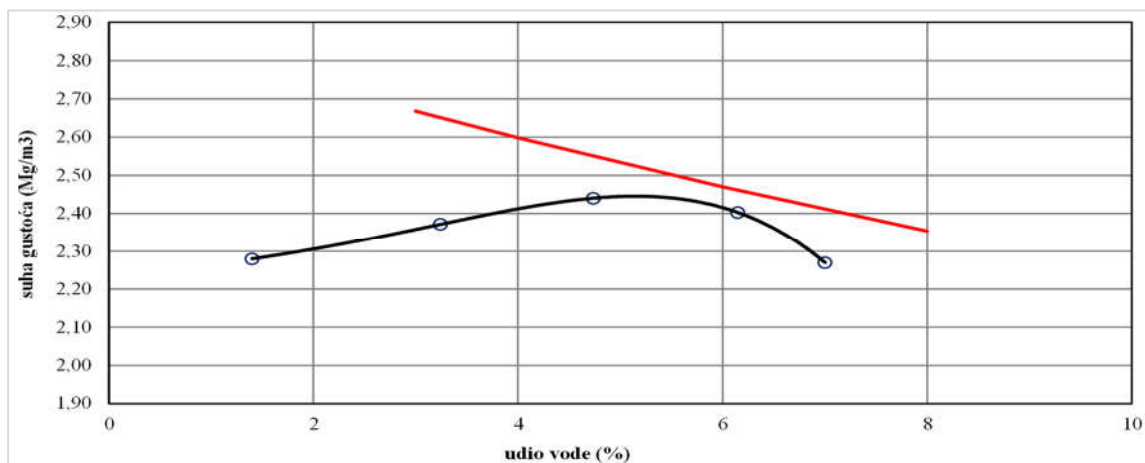
-mješavine M₅

Promjer zrna (mm)							
0,0484	0,0354	0,0230	0,0137	0,0081	0,0050	0,0032	0,0015
Udio zrna %							
19,2	17,3	14,8	11,9	9,2	7,9	7,0	5,4

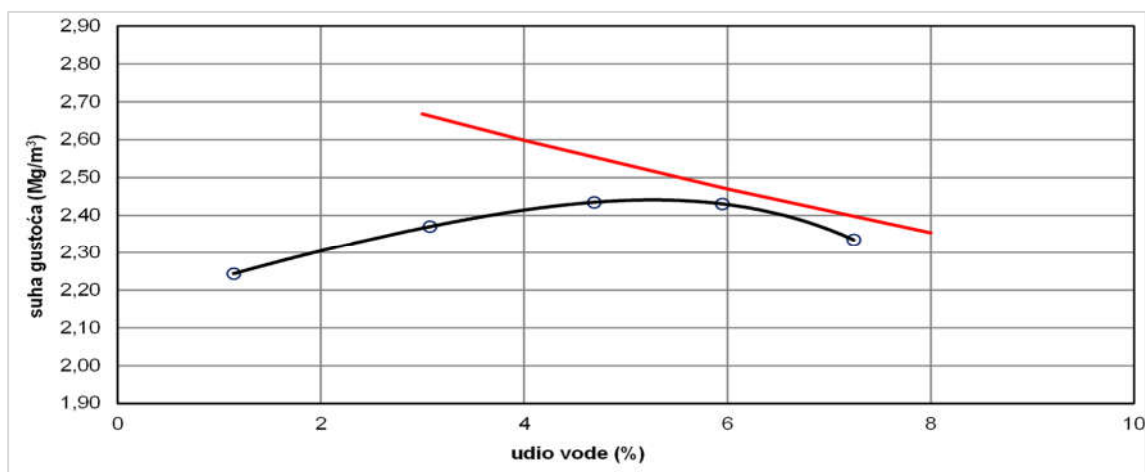
Prilog 2: Rezultati Proctorovog pokusa i CBR (prethodna laboratorijska ispitivanja)

Prilog 2.1 Određivanje optimalne vlažnosti i najveće suhe gustoće

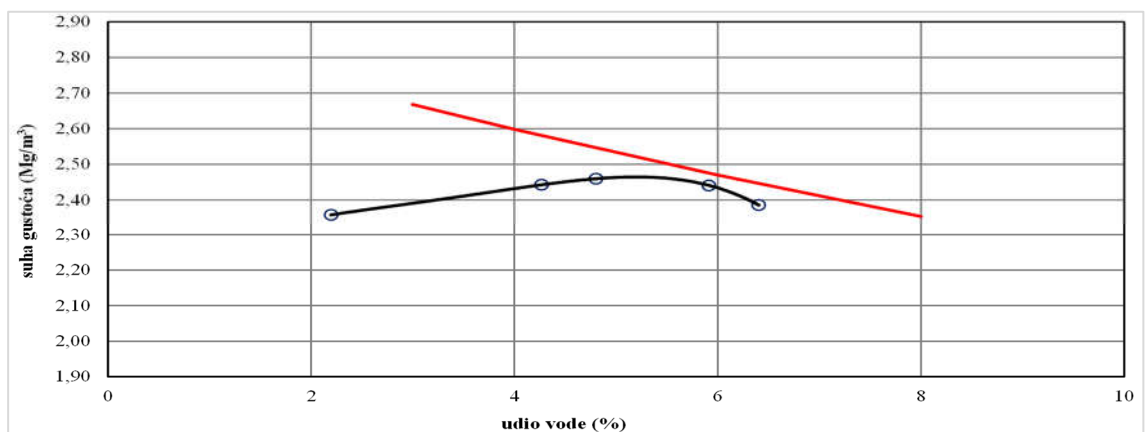
-mješavina M₁



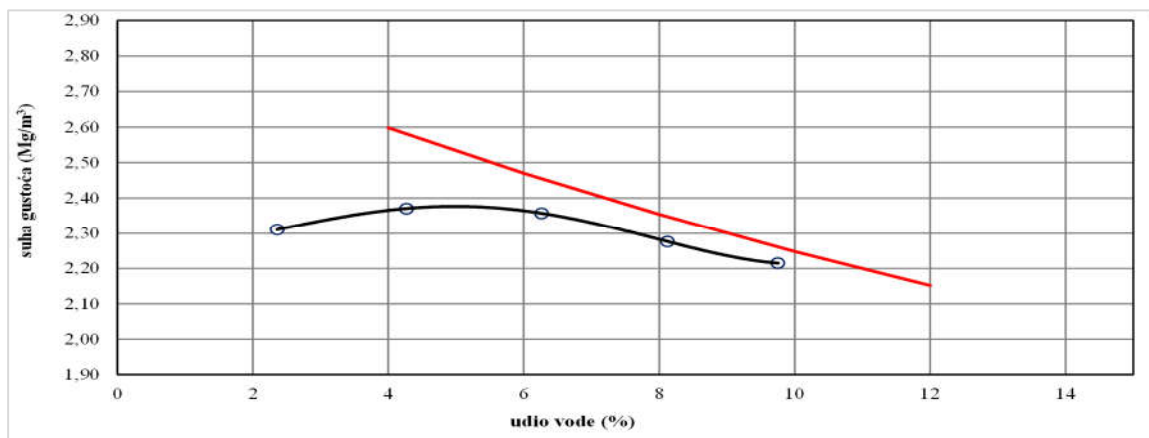
-mješavina M₂



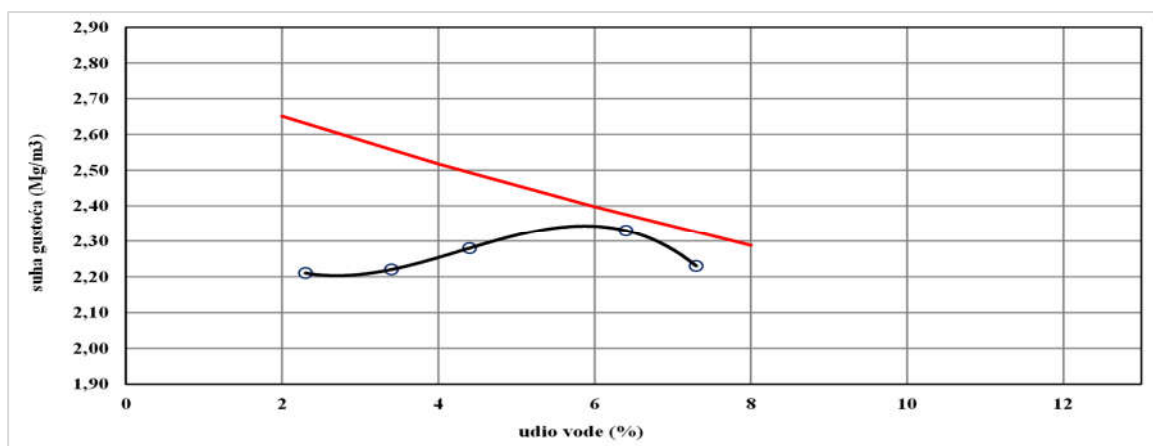
-mješavina M₃



-mješavina M₄

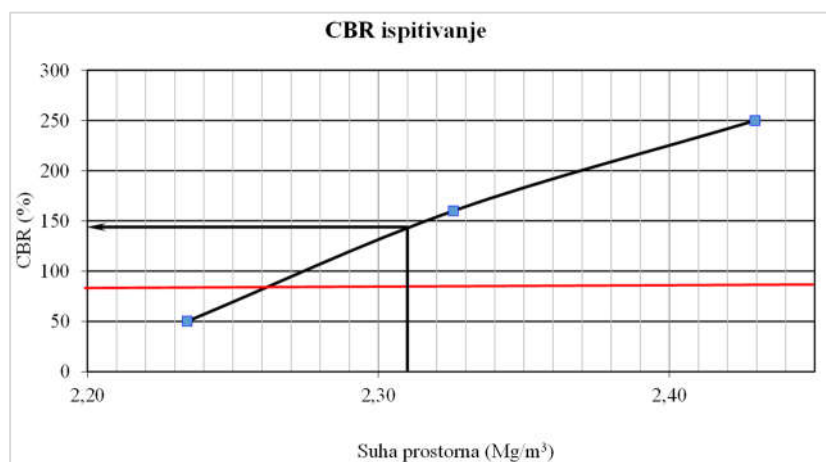


- mješavinu M₅

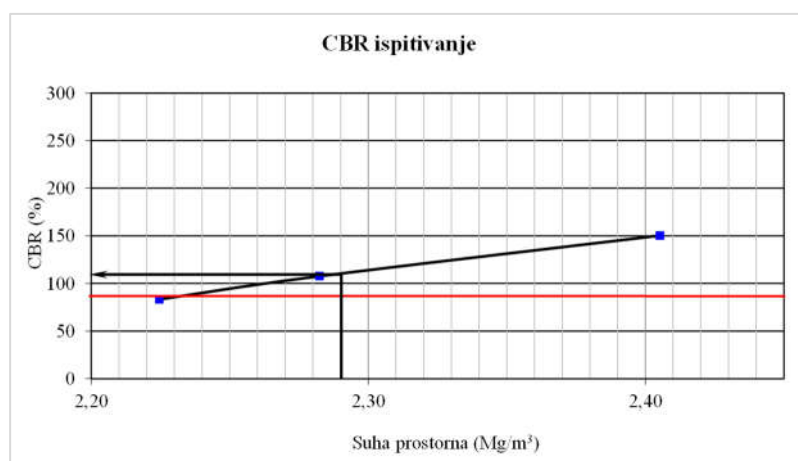


Prilog 2.2 Vrijednosti CBR-a

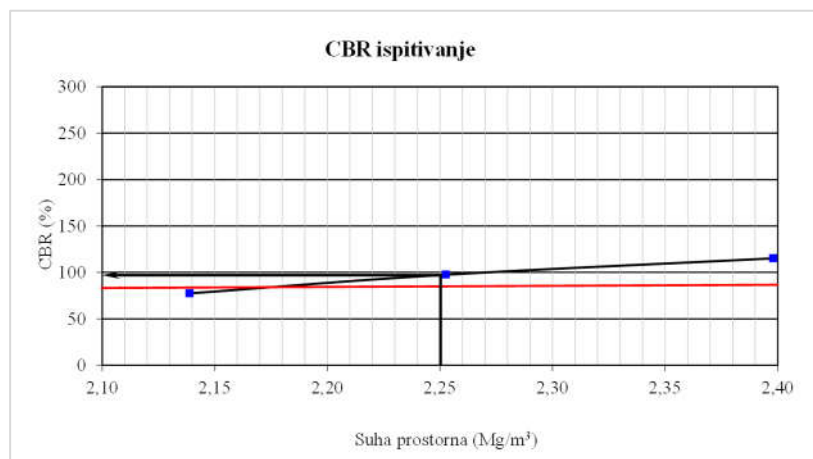
-mješavina M₁



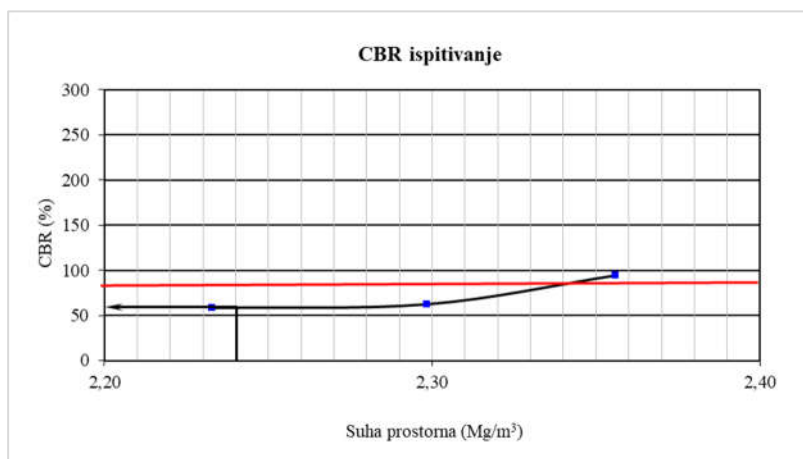
-mješavina M₂



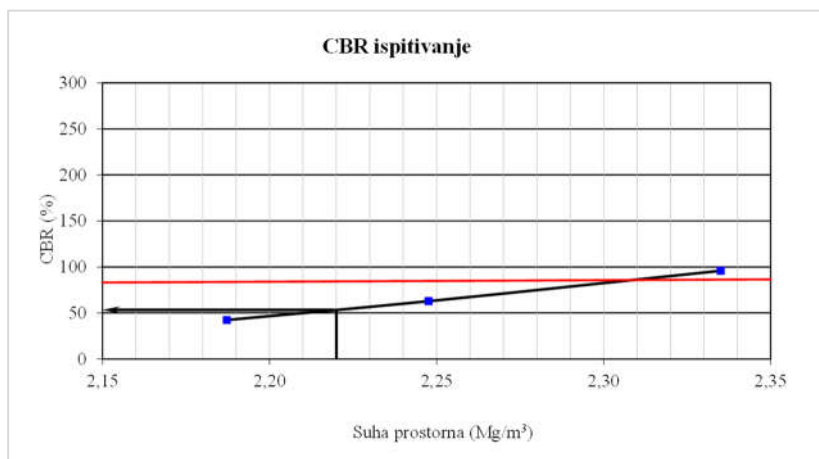
mješavina M₃



-mješavina M₄



-mješavina M₅



Prilog 3: Analiza granulometrijskog sastava uzoraka (glavna laboratorijska ispitivanja)

Prilog 3.1 Uzorci izrađeni od mješavine M₀

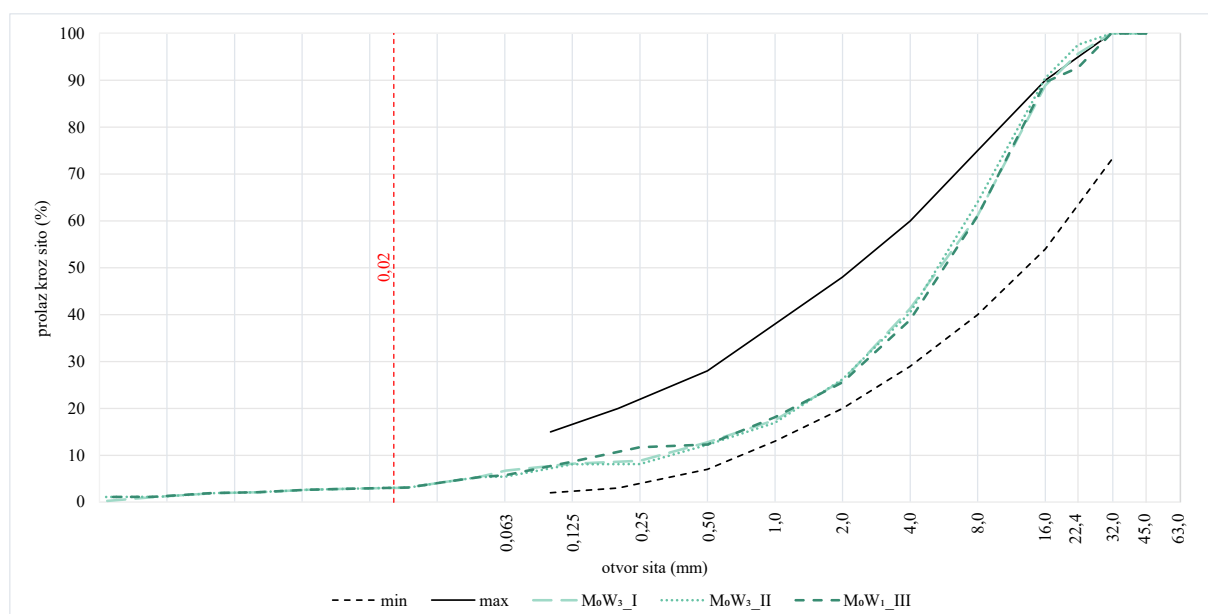
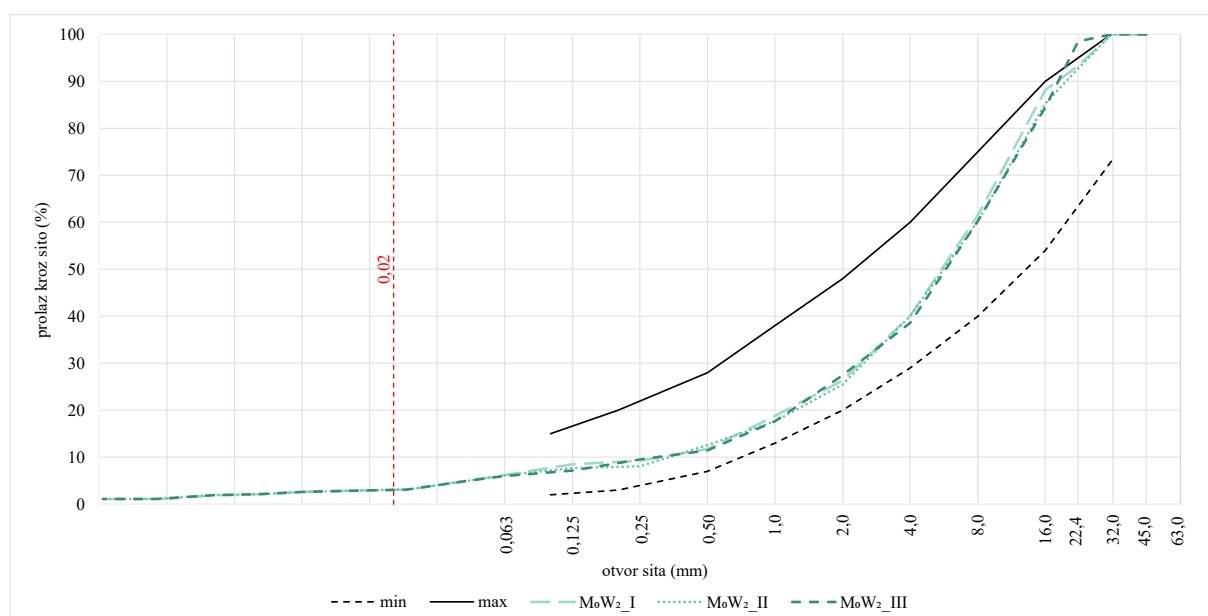
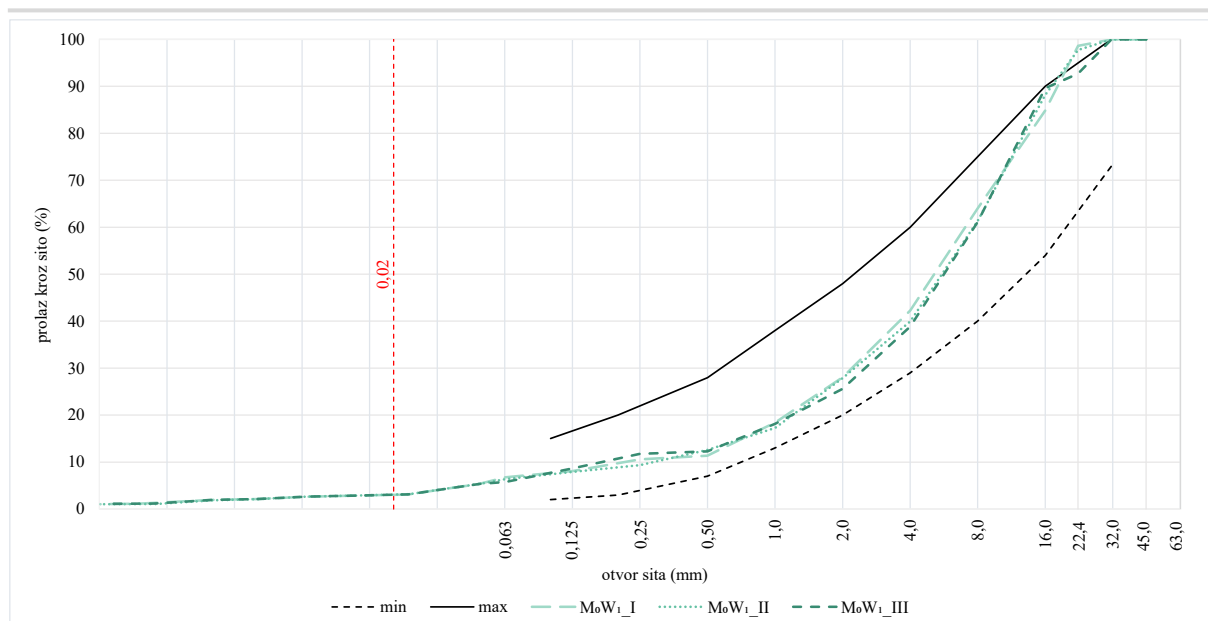
-rezultati areometriranja

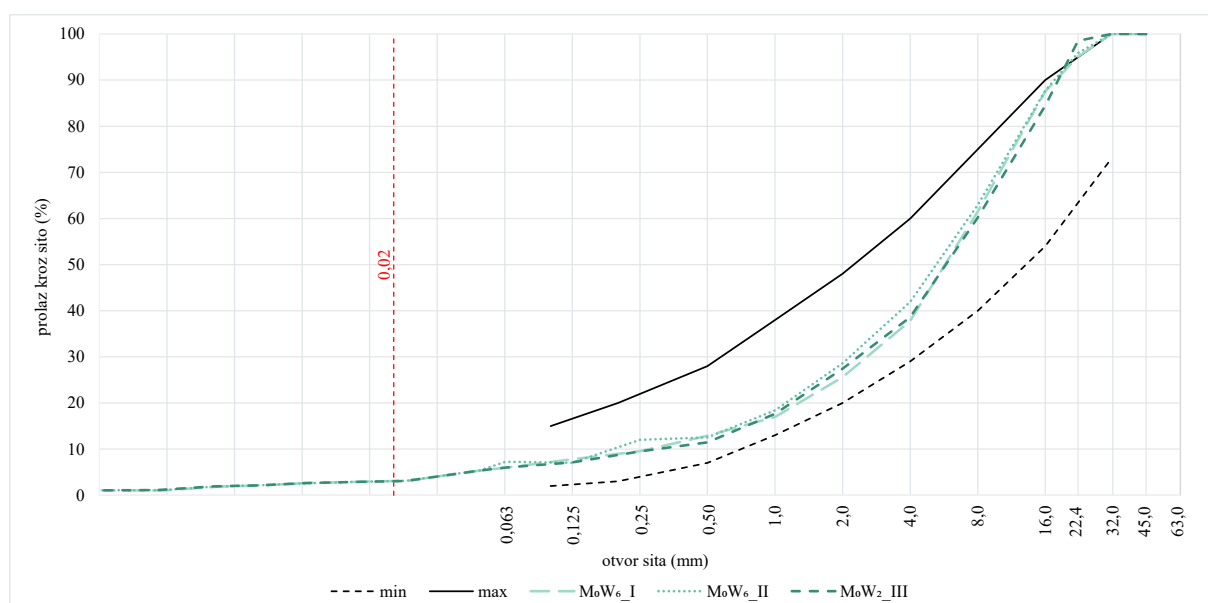
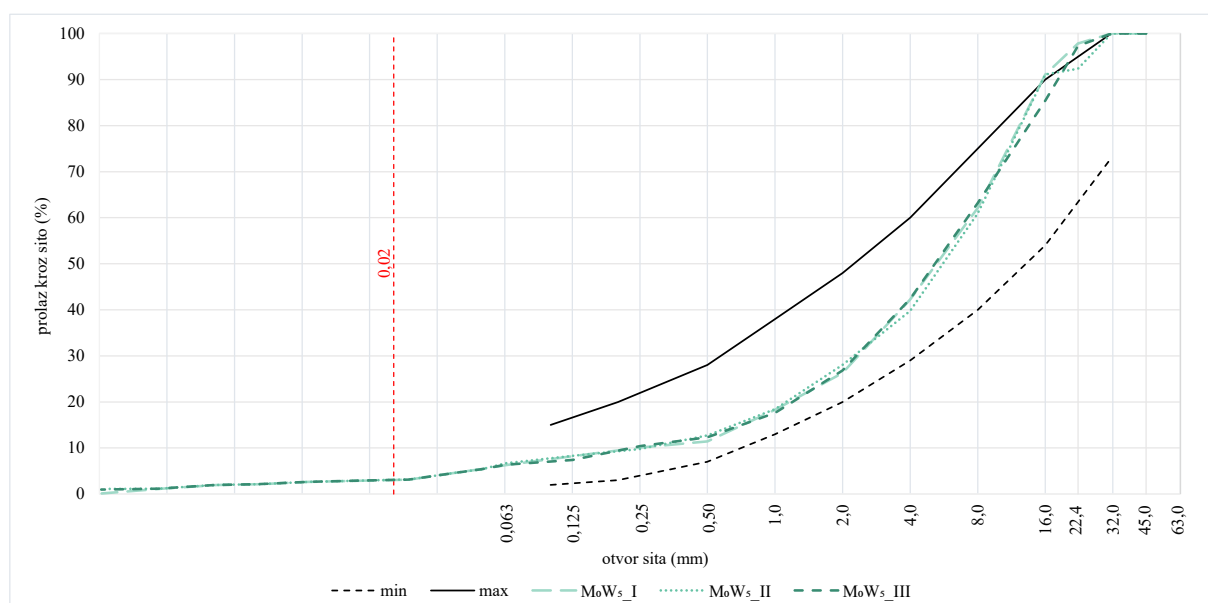
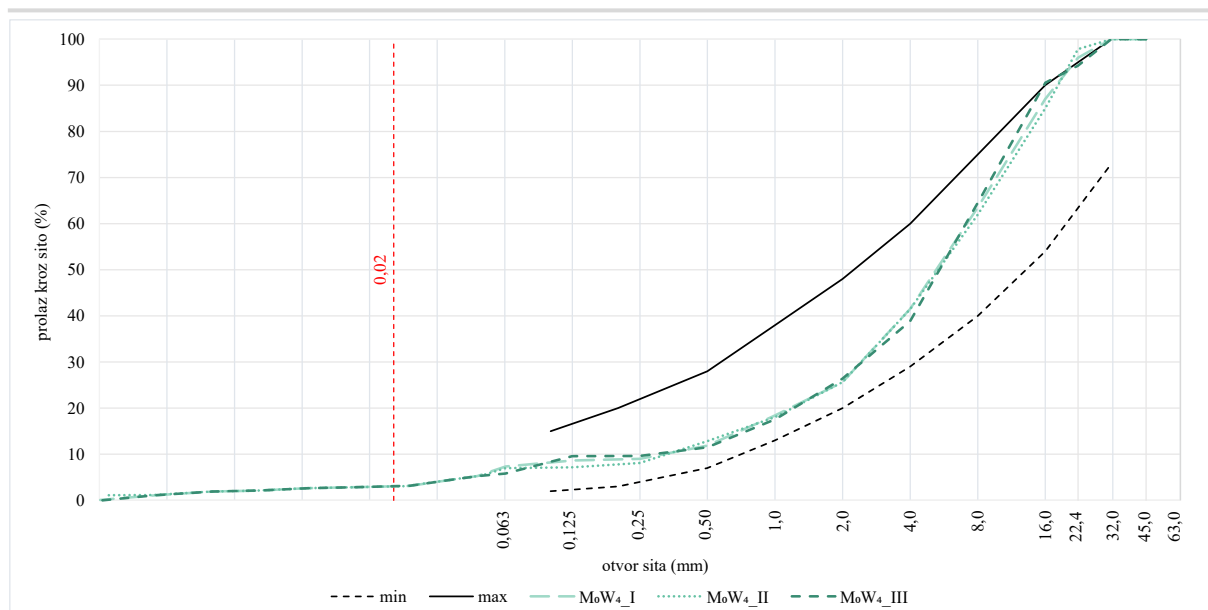
Uzorak	Veličina zrna (mm)								
	Udio zrna (%)								
MoW ₁ _I	0,0474	0,0356	0,0231	0,0135	0,0080	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	5,280	4,446	3,108	2,877	2,610	2,119	1,943	1,143	1,026
MoW ₁ _II	0,0491	0,0350	0,0236	0,0135	0,0082	0,0050	0,0031	0,0017	0,0010
	5,395	4,388	3,157	2,875	2,635	2,126	1,871	1,071	1,046
MoW ₁ _III	0,0485	0,0358	0,0232	0,0139	0,0082	0,0049	0,0031	0,0017	0,0010
	5,354	4,463	3,122	2,889	2,635	2,116	1,957	1,157	1,126
MoW ₂ _I	0,0479	0,0348	0,0232	0,0138	0,0080	0,0051	0,0032	0,0018	0,0010
	5,314	4,365	3,122	2,886	2,610	2,133	1,887	1,087	1,099
MoW ₂ _II	0,0495	0,0362	0,0235	0,0137	0,0082	0,0050	0,0031	0,0017	0,0010
	5,420	4,493	3,147	2,886	2,635	2,121	1,934	1,134	1,068
MoW ₂ _III	0,0486	0,0361	0,0225	0,0141	0,0080	0,0051	0,0032	0,0018	0,0010
	5,360	4,483	3,087	2,893	2,618	2,148	1,910	1,110	1,086
MoW ₃ _I	0,0471	0,0353	0,0228	0,0138	0,0082	0,0051	0,0032	0,0018	0,0010
	5,256	4,422	3,094	2,886	2,633	2,133	1,960	1,160	0,123
MoW ₃ _II	0,0484	0,0354	0,0237	0,0140	0,0083	0,0049	0,0032	0,0018	0,0010
	5,344	4,433	3,169	2,891	2,637	2,119	1,955	1,155	1,111
MoW ₃ _III	0,0472	0,0358	0,0231	0,0135	0,0081	0,0049	0,0032	0,0018	0,0010
	5,263	4,458	3,108	2,876	2,629	2,116	1,957	1,157	1,079
MoW ₄ _I	0,0473	0,0356	0,0235	0,0136	0,0082	0,0049	0,0031	0,0017	0,0010
	5,273	4,448	3,155	2,880	2,632	2,113	1,927	1,127	0,088
MoW ₄ _II	0,0491	0,0360	0,0227	0,0137	0,0081	0,0049	0,0031	0,0017	0,0010
	5,395	4,476	3,090	2,885	2,629	2,112	1,943	1,143	1,132
MoW ₄ _III	0,0477	0,0357	0,0237	0,0138	0,0083	0,0051	0,0031	0,0017	0,0010
	5,300	4,453	3,169	2,886	2,640	2,144	1,930	1,130	0,001
MoW ₅ _I	0,0493	0,0353	0,0234	0,0134	0,0083	0,0051	0,0033	0,0019	0,0010
	5,408	4,426	3,142	2,872	2,637	2,147	1,956	1,156	0,122
MoW ₅ _II	0,0491	0,0364	0,0235	0,0140	0,0083	0,0050	0,0032	0,0018	0,0010
	5,392	4,506	3,155	2,891	2,640	2,132	1,940	1,140	1,126
MoW ₅ _III	0,0497	0,0356	0,0233	0,0137	0,0082	0,0050	0,0032	0,0018	0,0010
	5,430	4,446	3,127	2,886	2,632	2,122	1,960	1,160	0,989
MoW ₆ _I	0,0482	0,0353	0,0233	0,0139	0,0083	0,0052	0,0033	0,0019	0,0010
	5,334	4,426	3,125	2,889	2,636	2,149	1,848	1,048	1,059
MoW ₆ _II	0,0483	0,0352	0,0227	0,0139	0,0080	0,0050	0,0033	0,0019	0,0010
	5,341	4,414	3,090	2,889	2,615	2,128	1,957	1,157	1,075
MoW ₆ _III	0,0488	0,0354	0,0234	0,0138	0,0079	0,0051	0,0032	0,0018	0,0010
	5,376	4,433	3,145	2,887	2,598	2,146	1,924	1,124	1,062

Uzorak	Izračunati udio zrna R≤0,02 mm (%)
MoW ₁ I	3,033
MoW ₁ II	3,057
MoW ₁ III	3,042
MoW ₂ I	3,042
MoW ₂ II	3,054
MoW ₂ III	3,029
MoW ₃ I	3,029
MoW ₃ II	3,064
MoW ₃ III	3,033
MoW ₄ I	3,057
MoW ₄ II	3,029
MoW ₄ III	3,065
MoW ₅ I	3,050
MoW ₅ II	3,057
MoW ₅ III	3,044
MoW ₆ I	3,043
MoW ₆ II	3,029
MoW ₆ III	3,053

-rezultati prosijavanja

Uzorak	Prolazak kroz sito (%)											
	45 mm	31,5 mm	22,4 mm	16 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
MoW ₁ I	100,0	100,0	98,6	84,8	64,0	42,3	28,1	18,4	11,4	10,6	8,1	6,8
MoW ₁ II	100,0	100,0	97,8	88,2	61,4	40,0	27,9	17,3	12,6	9,4	7,9	6,4
MoW ₁ III	100,0	100,0	92,7	89,6	61,1	38,9	25,6	18,1	12,3	11,7	8,7	5,8
MoW ₂ I	100,0	100,0	93,3	88,2	61,4	40,1	26,4	18,8	11,7	9,2	8,5	6,2
MoW ₂ II	100,0	100,0	92,7	85,3	60,2	40,0	25,5	17,7	12,6	8,1	7,7	6,2
MoW ₂ III	100,0	100,0	98,5	84,5	60,2	38,6	27,4	17,6	11,5	9,5	7,1	6,0
MoW ₃ I	100,0	100,0	95,7	88,9	61,2	41,3	26,0	17,5	12,8	8,8	8,2	6,7
MoW ₃ II	100,0	100,0	97,6	90,5	64,0	40,4	26,2	16,9	12,2	8,1	8,1	5,4
MoW ₃ III	100,0	100,0	95,3	86,3	60,9	38,7	27,1	18,8	12,8	9,3	8,7	7,8
MoW ₄ I	100,0	100,0	96,0	87,0	63,5	41,5	25,7	18,4	11,9	9,0	8,6	7,3
MoW ₄ II	100,0	100,0	97,9	85,0	61,9	41,4	25,6	18,1	12,9	8,1	7,2	7,0
MoW ₄ III	100,0	100,0	94,2	90,6	64,5	38,8	26,4	17,6	11,5	9,6	9,6	5,8
MoW ₅ I	100,0	100,0	97,9	91,1	62,1	42,2	26,3	18,3	11,4	10,1	8,2	6,3
MoW ₅ II	100,0	100,0	92,3	91,1	60,9	39,8	28,0	18,5	12,7	9,8	8,3	6,7
MoW ₅ III	100,0	100,0	97,3	85,4	63,2	42,4	26,8	17,6	12,3	10,4	7,4	6,4
MoW ₆ I	100,0	100,0	95,1	87,6	61,5	37,8	25,6	17,0	12,9	9,6	7,8	6,0
MoW ₆ II	100,0	100,0	93,4	90,2	62,9	38,5	26,6	17,9	12,5	10,4	8,8	6,6
MoW ₆ III	100,0	100,0	95,9	87,7	62,9	41,9	28,6	18,4	12,5	12,0	7,1	7,3





Prilog 3.2 Uzorci izrađeni od mješavine M₁

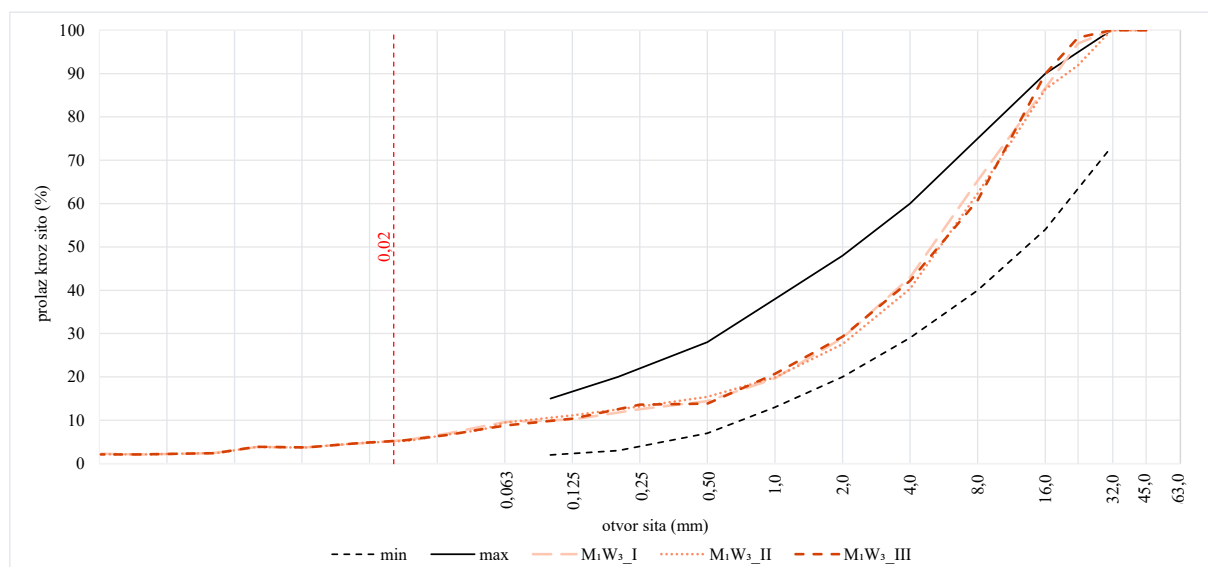
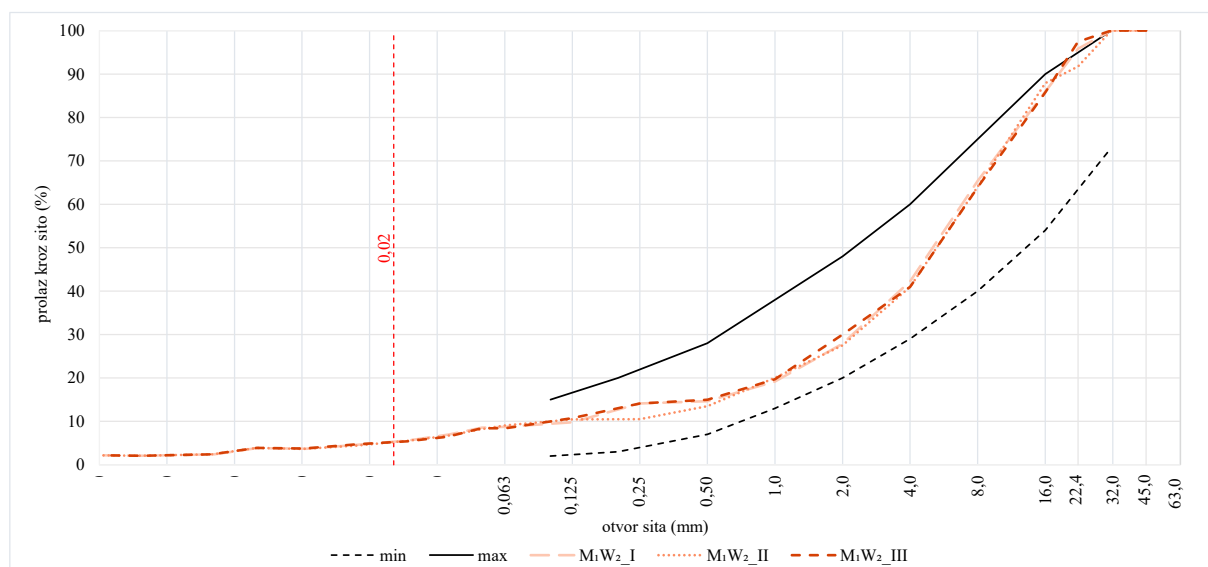
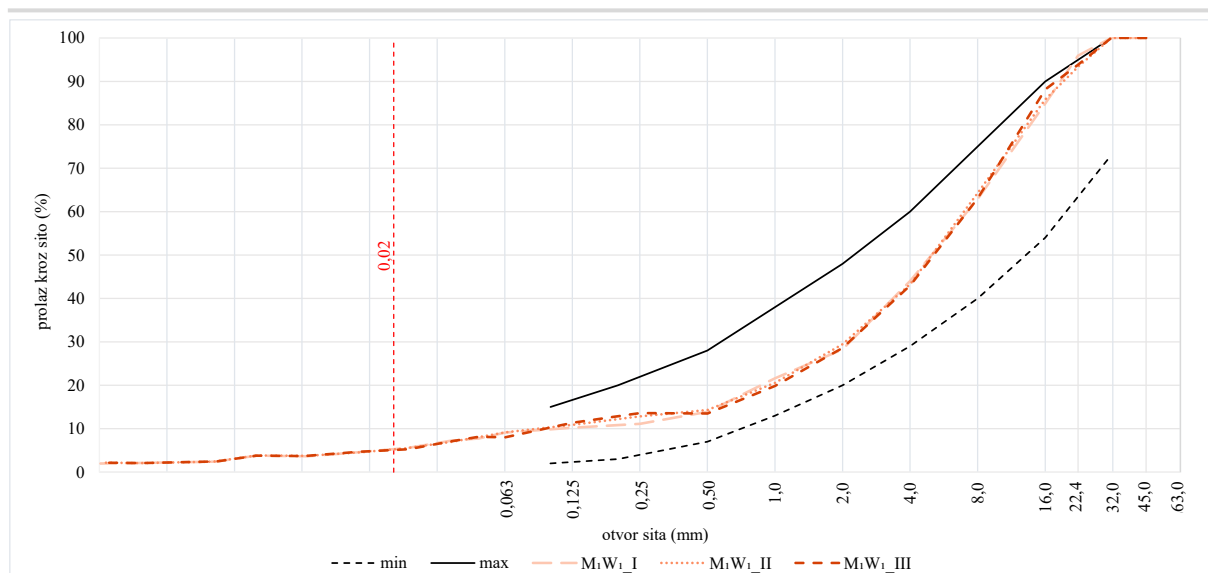
-rezultati areometriranja

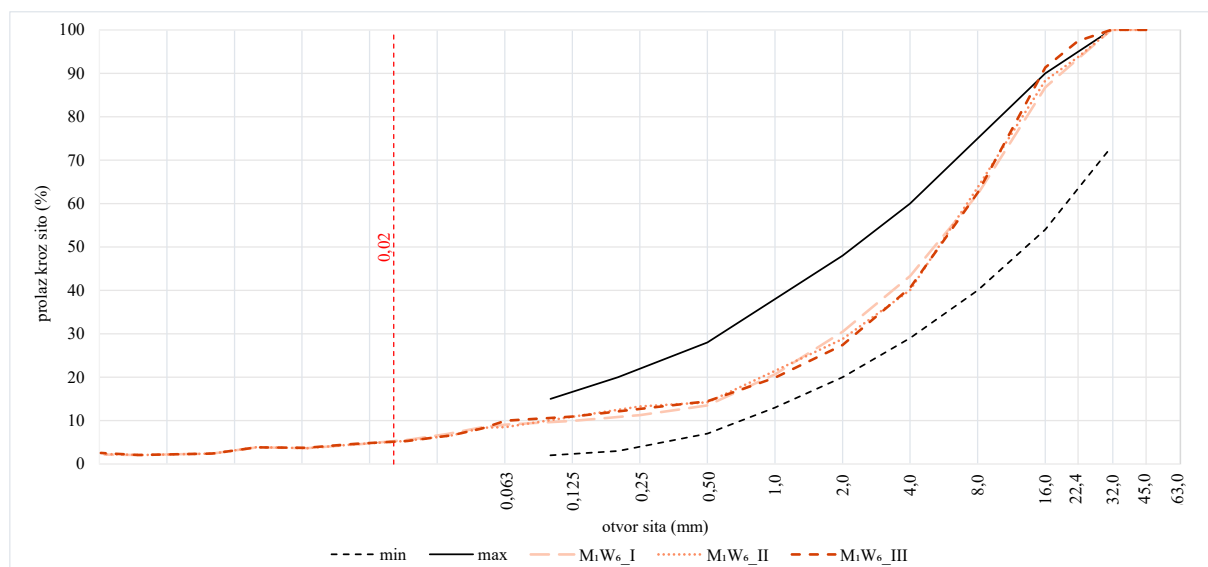
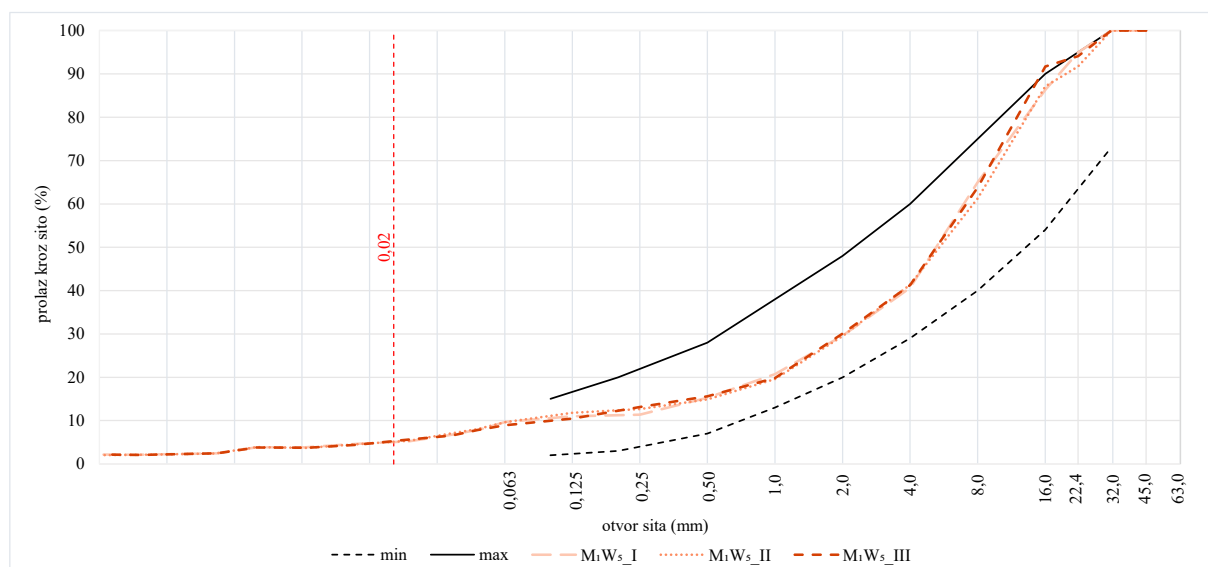
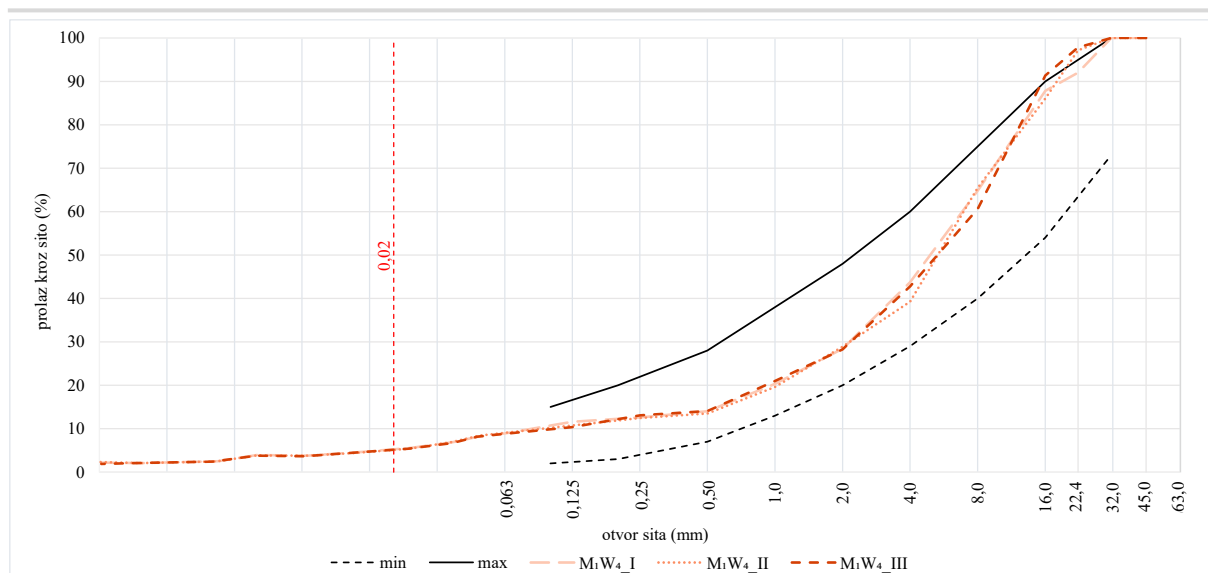
Uzorak	Veličina zrna (mm)								
	Udio zrna (%)								
M ₁ W ₁ _I	0,0478	0,0362	0,0234	0,0137	0,0083	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	7,728	7,279	5,625	4,578	3,671	3,787	2,419	2,107	1,989
M ₁ W ₁ _II	0,0475	0,0362	0,0224	0,0141	0,0083	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	8,046	6,999	5,460	4,560	3,739	3,836	2,405	2,100	2,162
M ₁ W ₁ _III	0,0477	0,0351	0,0232	0,0141	0,0080	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	8,137	7,000	5,266	4,688	3,706	3,782	2,455	2,098	2,162
M ₁ W ₂ _I	0,0494	0,0353	0,0233	0,0134	0,0082	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	8,555	6,975	5,583	4,553	3,720	3,860	2,410	2,101	2,163
M ₁ W ₂ _II	0,0476	0,0354	0,0229	0,0136	0,0079	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	8,097	6,744	5,531	4,420	3,647	3,870	2,399	2,104	2,165
M ₁ W ₂ _III	0,0492	0,0348	0,0230	0,0139	0,0079	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	8,393	6,476	5,393	4,725	3,746	3,868	2,394	2,099	2,162
M ₁ W ₃ _I	0,0489	0,0351	0,0230	0,0138	0,0081	0,0049	0,0031	0,0016	0,0010
	8,487	6,956	5,467	4,661	3,748	3,838	2,400	2,108	2,236
M ₁ W ₃ _II	0,0498	0,0358	0,0237	0,0137	0,0080	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	7,847	6,783	5,322	4,706	3,696	3,832	2,462	2,102	2,162
M ₁ W ₃ _III	0,0482	0,0363	0,0223	0,0141	0,0082	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	7,860	6,746	5,372	4,758	3,757	3,870	2,426	2,104	2,123
M ₁ W ₄ _I	0,0472	0,0362	0,0236	0,0140	0,0083	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	8,125	6,865	5,575	4,613	3,808	3,930	2,493	2,099	2,165
M ₁ W ₄ _II	0,0483	0,0364	0,0237	0,0135	0,0083	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	8,400	6,948	5,402	4,407	3,785	3,830	2,445	2,100	2,308
M ₁ W ₄ _III	0,0473	0,0365	0,0234	0,0135	0,0080	0,0049	0,0031	0,0016	0,0010
	8,181	6,705	5,423	4,508	3,676	3,806	2,398	2,108	1,888
M ₁ W ₅ _I	0,0496	0,0355	0,0233	0,0139	0,0081	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	8,076	6,666	5,235	4,638	3,836	3,840	2,467	2,105	2,163
M ₁ W ₅ _II	0,0471	0,0347	0,0236	0,0133	0,0082	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	8,034	6,881	5,385	4,505	3,693	3,900	2,413	2,105	2,006
M ₁ W ₅ _III	0,0470	0,0364	0,0235	0,0137	0,0083	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	7,789	6,534	5,638	4,434	3,751	3,782	2,464	2,099	2,164
M ₁ W ₆ _I	0,0499	0,0348	0,0234	0,0136	0,0082	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	8,500	6,936	5,603	4,528	3,655	3,857	2,399	2,101	2,162
M ₁ W ₆ _II	0,0498	0,0364	0,0226	0,0135	0,0082	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	8,387	6,594	5,306	4,572	3,675	3,900	2,401	2,098	2,307
M ₁ W ₆ _III	0,0493	0,0361	0,0230	0,0134	0,0081	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	8,159	6,617	5,341	4,669	3,733	3,850	2,395	2,103	2,549

Uzorak	Izračunati udio zrna $R \leq 0,02$ mm (%)
M ₁ W ₁ I	5,255
M ₁ W ₁ II	5,197
M ₁ W ₁ III	5,062
M ₁ W ₂ I	5,239
M ₁ W ₂ II	5,185
M ₁ W ₂ III	5,171
M ₁ W ₃ I	5,207
M ₁ W ₃ II	5,095
M ₁ W ₃ III	5,198
M ₁ W ₄ I	5,213
M ₁ W ₄ II	5,045
M ₁ W ₄ III	5,108
M ₁ W ₅ I	5,026
M ₁ W ₅ II	5,077
M ₁ W ₅ III	5,205
M ₁ W ₆ I	5,231
M ₁ W ₆ II	5,095
M ₁ W ₆ III	5,131

-rezultati prosijavanja

Uzorak	Prolazak kroz sito (%)											
	45 mm	31,5 mm	22,4 mm	16 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
M ₁ W ₁ I	100,0	100,0	95,9	84,9	62,9	44,0	28,3	21,6	13,9	11,1	10,2	9,1
M ₁ W ₁ II	100,0	100,0	93,3	85,9	64,3	43,3	29,5	20,5	14,3	12,8	10,9	9,2
M ₁ W ₁ III	100,0	100,0	93,8	88,2	63,0	43,0	28,6	19,9	13,5	13,6	11,4	8,0
M ₁ W ₂ I	100,0	100,0	95,8	86,0	65,4	42,2	27,9	19,2	14,7	14,1	9,8	8,7
M ₁ W ₂ II	100,0	100,0	91,7	87,9	64,1	41,0	27,5	20,0	13,5	10,5	10,5	9,1
M ₁ W ₂ III	100,0	100,0	97,4	85,8	63,9	41,0	30,0	19,7	15,0	14,1	10,8	8,4
M ₁ W ₃ I	100,0	100,0	97,0	86,7	65,3	43,0	29,0	19,7	14,4	12,6	10,2	9,6
M ₁ W ₃ II	100,0	100,0	91,9	86,4	62,3	40,3	27,6	19,9	15,4	13,2	11,1	9,5
M ₁ W ₃ III	100,0	100,0	98,3	89,9	60,8	42,2	29,3	20,7	13,8	13,6	10,4	8,8
M ₁ W ₄ I	100,0	100,0	92,0	87,8	64,8	43,8	28,4	20,3	14,0	12,6	11,6	9,0
M ₁ W ₄ II	100,0	100,0	97,1	86,1	65,5	39,3	28,9	19,6	13,5	12,5	10,7	9,1
M ₁ W ₄ III	100,0	100,0	97,8	91,4	60,6	42,8	28,3	21,0	14,1	13,1	10,4	8,8
M ₁ W ₅ I	100,0	100,0	95,0	86,3	65,0	40,7	29,6	20,7	15,3	11,4	11,0	9,7
M ₁ W ₅ II	100,0	100,0	91,7	87,1	61,3	41,4	29,5	19,6	14,9	12,6	11,8	9,6
M ₁ W ₅ III	100,0	100,0	94,1	91,7	63,8	41,2	30,1	19,8	15,6	13,1	10,5	8,9
M ₁ W ₆ I	100,0	100,0	93,3	86,8	62,2	43,3	30,4	20,6	13,5	11,3	9,9	9,1
M ₁ W ₆ II	100,0	100,0	93,7	88,3	63,7	40,1	28,8	21,5	14,2	13,3	10,9	8,5
M ₁ W ₆ III	100,0	100,0	97,4	91,4	62,5	40,6	27,4	19,9	14,5	12,7	10,9	10,0





Prilog 3.3 Uzorci izrađeni od mješavine M₂

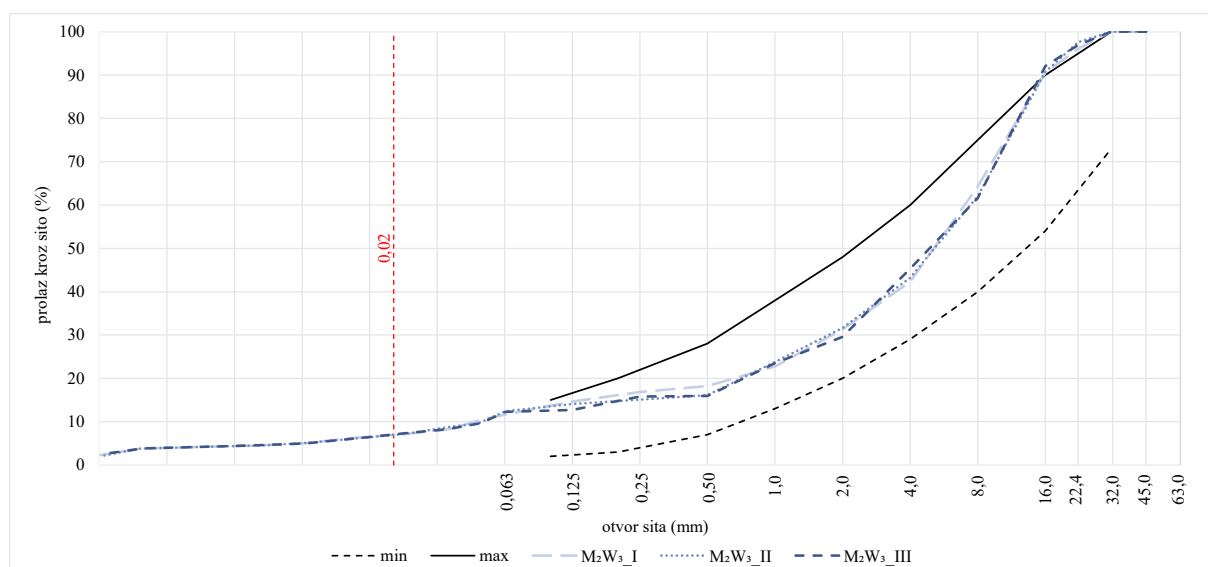
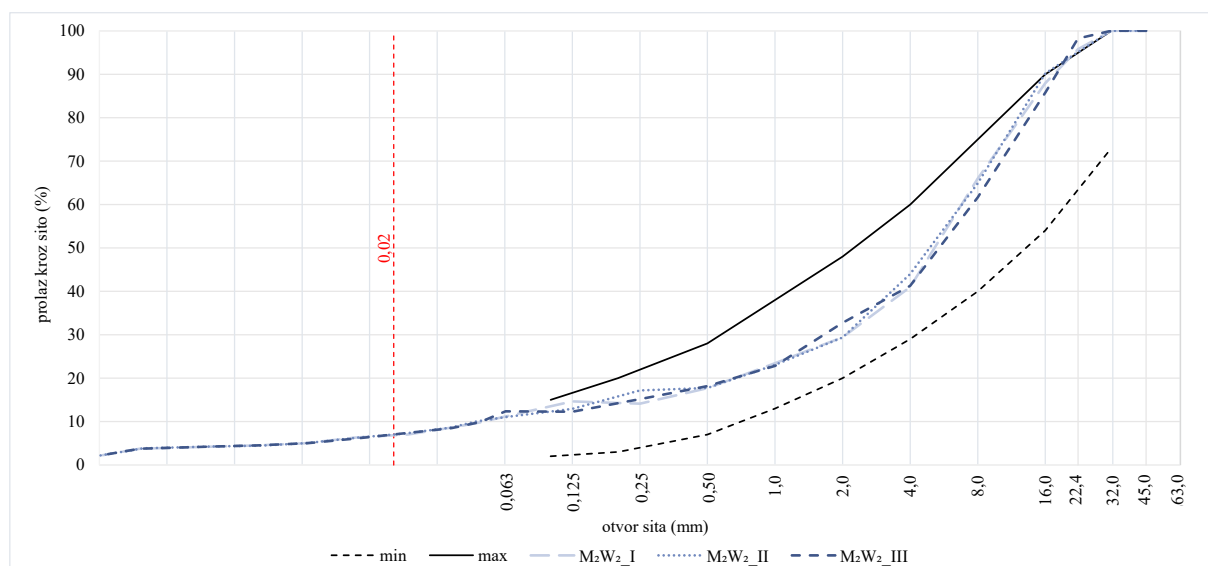
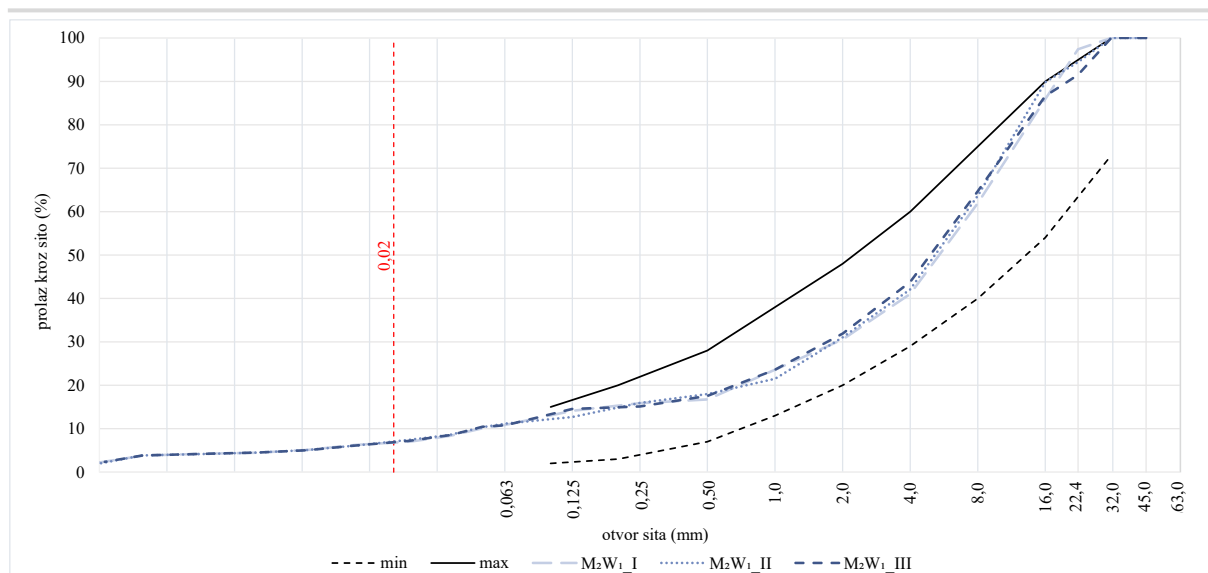
-rezultati areometriranja

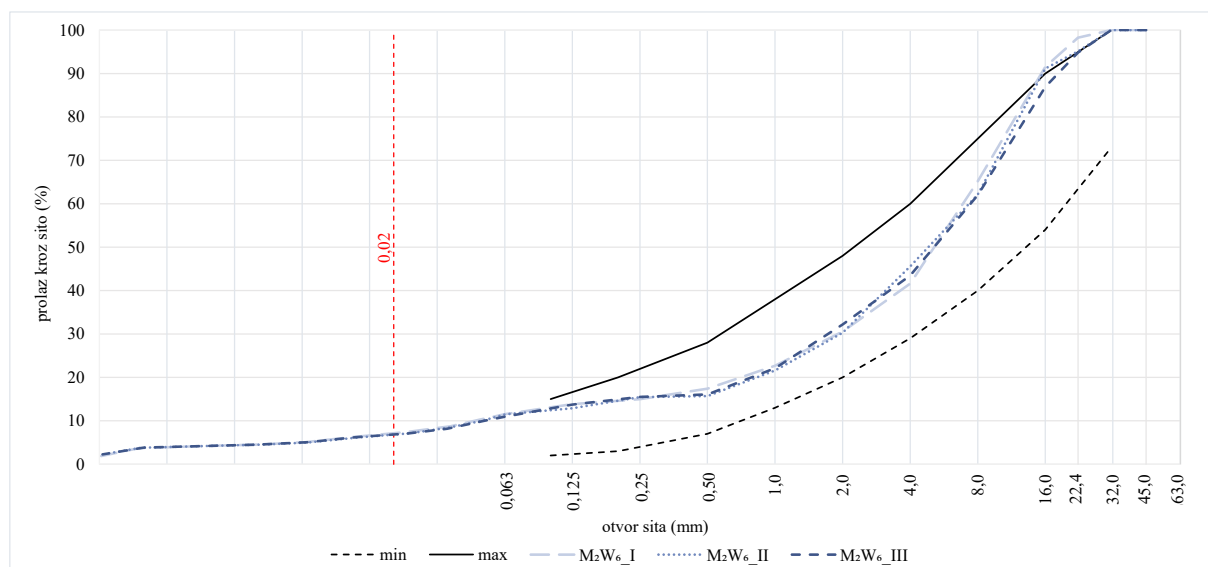
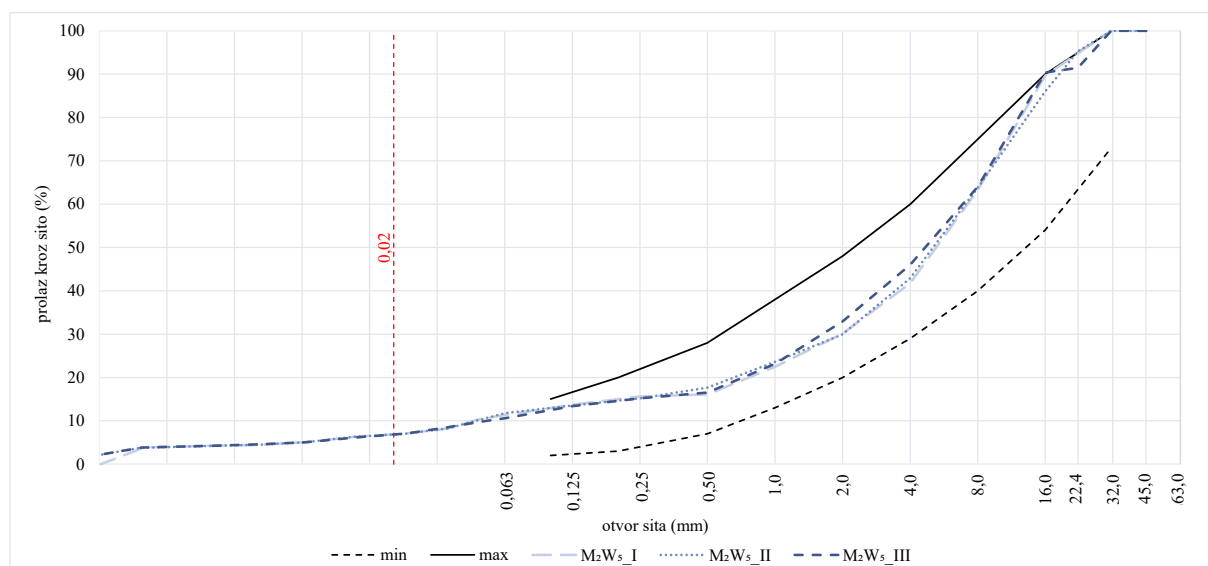
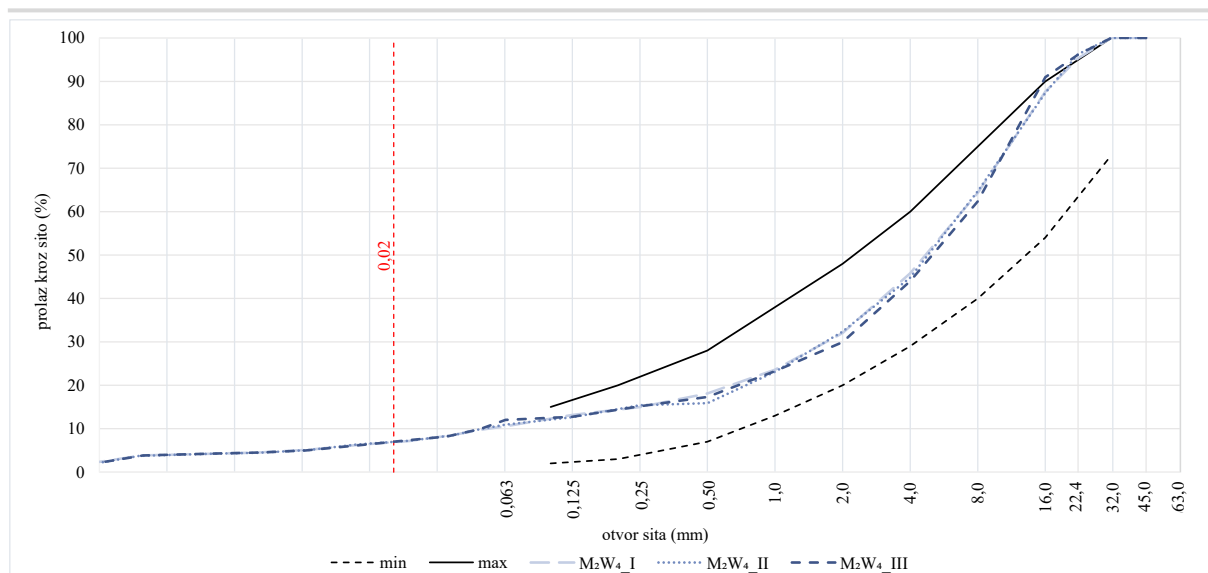
Uzorak	Veličina zrna (mm)								
	Udio zrna (%)								
M ₂ W ₁ _I	0,0499	0,0358	0,0237	0,0135	0,0083	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	10,109	8,390	7,040	6,266	5,116	4,445	4,252	3,830	2,222
M ₂ W ₁ _II	0,0497	0,0353	0,0231	0,0139	0,0082	0,0050	0,0031	0,0015	0,0010
	10,364	8,541	7,391	6,156	5,096	4,518	4,244	3,823	2,007
M ₂ W ₁ _III	0,0498	0,0364	0,0232	0,0135	0,0082	0,0050	0,0031	0,0015	0,0010
	10,469	8,627	7,188	6,139	5,020	4,508	4,258	3,825	2,355
M ₂ W ₂ _I	0,0478	0,0360	0,0232	0,0135	0,0079	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	9,761	8,594	7,026	6,329	4,989	4,525	4,248	3,753	2,286
M ₂ W ₂ _II	0,0471	0,0362	0,0226	0,0139	0,0081	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	10,093	8,659	7,291	6,309	5,027	4,486	4,261	3,827	2,156
M ₂ W ₂ _III	0,0485	0,0364	0,0234	0,0134	0,0083	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	9,908	8,519	7,437	6,061	5,052	4,504	4,268	3,744	2,314
M ₂ W ₃ _I	0,0487	0,0356	0,0231	0,0133	0,0079	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	10,388	8,323	7,201	6,271	4,957	4,478	4,273	3,777	2,306
M ₂ W ₃ _II	0,0469	0,0358	0,0230	0,0136	0,0083	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	9,501	8,840	7,214	6,114	5,121	4,501	4,277	3,772	1,999
M ₂ W ₃ _III	0,0491	0,0349	0,0232	0,0140	0,0081	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	9,674	8,248	7,418	6,194	4,972	4,552	4,261	3,827	2,455
M ₂ W ₄ _I	0,0493	0,0364	0,0235	0,0139	0,0083	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	9,779	8,513	7,197	6,276	5,135	4,526	4,287	3,822	2,370
M ₂ W ₄ _II	0,0494	0,0364	0,0234	0,0137	0,0083	0,0050	0,0033	0,0015	0,0010
	9,999	8,443	7,240	6,389	5,068	4,464	4,285	3,725	2,270
M ₂ W ₄ _III	0,0483	0,0346	0,0234	0,0136	0,0081	0,0050	0,0031	0,0015	0,0010
	9,897	8,215	7,382	6,130	5,010	4,498	4,258	3,826	2,261
M ₂ W ₅ _I	0,0473	0,0349	0,0224	0,0133	0,0083	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	10,275	8,244	7,042	6,314	5,122	4,477	4,273	3,831	0,001
M ₂ W ₅ _II	0,0479	0,0351	0,0224	0,0134	0,0081	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	10,187	8,286	7,004	6,326	5,101	4,474	4,284	3,725	2,136
M ₂ W ₅ _III	0,0495	0,0343	0,0229	0,0133	0,0081	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	9,844	8,469	7,097	6,114	5,050	4,544	4,283	3,821	2,264
M ₂ W ₆ _I	0,0484	0,0358	0,0228	0,0135	0,0081	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	10,293	8,738	7,412	6,320	5,076	4,496	4,259	3,697	1,899
M ₂ W ₆ _II	0,0498	0,0350	0,0236	0,0140	0,0082	0,0050	0,0033	0,0015	0,0010
	10,024	8,408	7,141	6,166	4,969	4,502	4,284	3,814	2,349
M ₂ W ₆ _III	0,0499	0,0347	0,0231	0,0135	0,0083	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	9,919	8,192	7,099	6,209	5,065	4,493	4,280	3,831	2,277

Uzorak	Izračunati udio zrna $R \leq 0,02$ mm (%)
M ₂ W ₁ I	6,760
M ₂ W ₁ II	6,975
M ₂ W ₁ III	6,843
M ₂ W ₂ I	6,797
M ₂ W ₂ II	6,995
M ₂ W ₂ III	6,970
M ₂ W ₃ I	6,906
M ₂ W ₃ II	6,867
M ₂ W ₃ III	6,992
M ₂ W ₄ I	6,865
M ₂ W ₄ II	6,943
M ₂ W ₄ III	6,946
M ₂ W ₅ I	6,847
M ₂ W ₅ II	6,825
M ₂ W ₅ III	6,801
M ₂ W ₆ I	7,081
M ₂ W ₆ II	6,777
M ₂ W ₆ III	6,811

-rezultati prosijavanja

Uzorak	Prolazak kroz sito (%)											
	45 mm	31,5 mm	22,4 mm	16 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
M ₂ W ₁ I	100,0	100,0	97,4	85,9	61,9	41,0	30,6	23,6	16,8	15,9	14,1	10,9
M ₂ W ₁ II	100,0	100,0	94,4	89,8	63,6	42,1	31,0	21,5	18,0	16,0	12,7	11,2
M ₂ W ₁ III	100,0	100,0	91,5	86,6	64,7	43,8	31,9	23,6	17,6	15,1	14,5	10,8
M ₂ W ₂ I	100,0	100,0	95,8	88,0	65,9	41,0	29,4	23,5	17,7	14,1	14,6	11,2
M ₂ W ₂ II	100,0	100,0	95,1	90,2	64,9	44,0	29,4	23,1	17,8	17,2	12,9	11,1
M ₂ W ₂ III	100,0	100,0	98,2	85,8	61,6	41,3	32,8	22,8	18,2	15,2	12,3	12,4
M ₂ W ₃ I	100,0	100,0	96,0	90,5	64,3	42,3	31,3	22,8	18,2	16,8	14,7	11,6
M ₂ W ₃ II	100,0	100,0	97,6	90,7	62,0	43,2	31,6	23,8	16,1	15,1	14,1	12,4
M ₂ W ₃ III	100,0	100,0	96,9	92,0	61,6	45,3	29,6	23,5	16,0	15,8	12,7	12,3
M ₂ W ₄ I	100,0	100,0	95,3	87,6	64,3	45,8	32,0	23,6	18,1	15,0	13,2	10,6
M ₂ W ₄ II	100,0	100,0	96,2	87,3	64,7	44,8	32,4	23,1	15,9	15,4	12,7	10,9
M ₂ W ₄ III	100,0	100,0	96,1	91,0	62,4	44,0	29,9	23,3	17,3	15,2	12,8	12,0
M ₂ W ₅ I	100,0	100,0	94,8	89,7	63,3	41,7	30,1	22,5	16,1	15,6	13,7	11,4
M ₂ W ₅ II	100,0	100,0	95,3	86,0	63,8	42,9	30,0	23,6	17,6	15,2	13,5	11,8
M ₂ W ₅ III	100,0	100,0	91,5	90,4	64,0	46,0	32,9	23,2	16,5	15,2	13,4	10,6
M ₂ W ₆ I	100,0	100,0	98,2	91,5	65,2	41,6	30,5	22,7	17,4	15,0	13,8	11,6
M ₂ W ₆ II	100,0	100,0	95,1	91,2	62,1	45,5	30,3	21,6	15,7	15,5	12,9	11,5
M ₂ W ₆ III	100,0	100,0	94,8	86,9	62,0	43,4	32,2	22,1	16,1	15,5	13,7	11,0





Prilog 3.4 Uzorci izrađeni od mješavine M₃

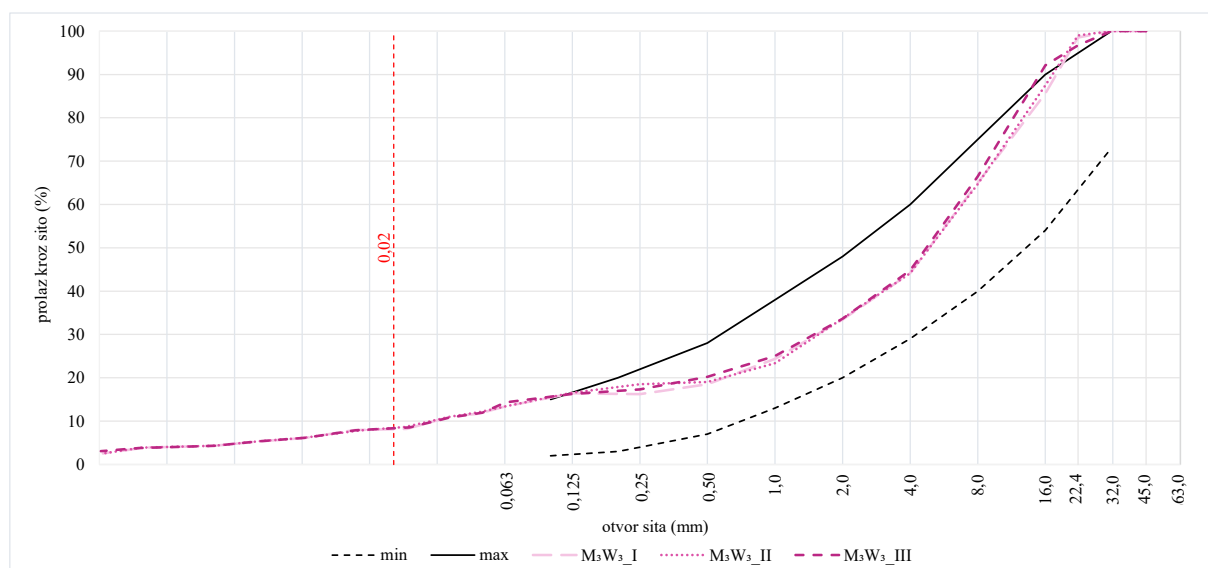
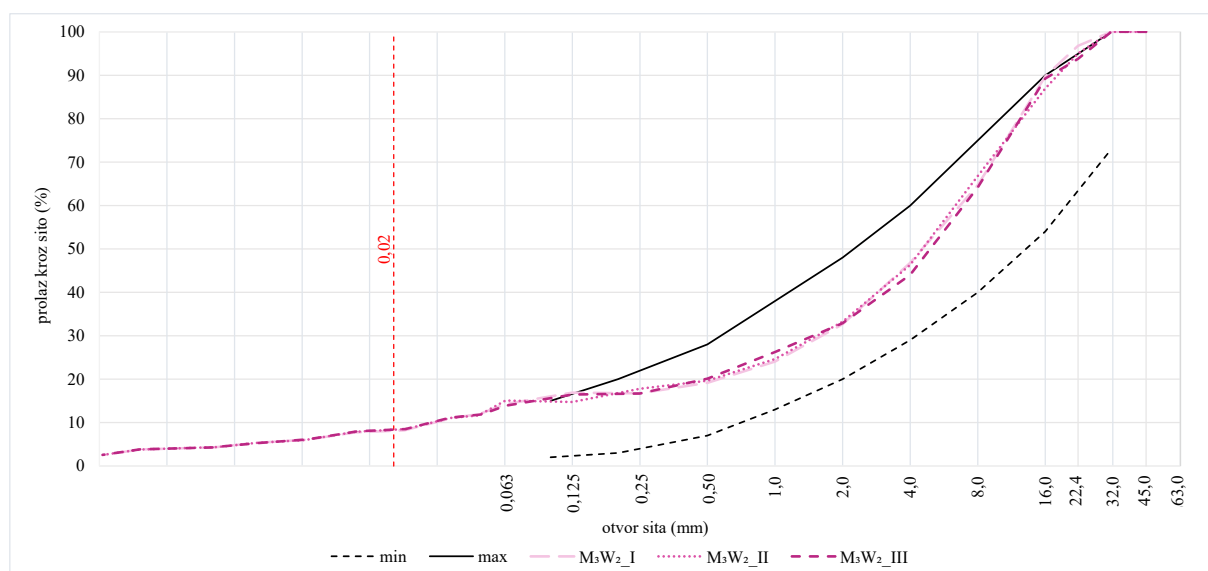
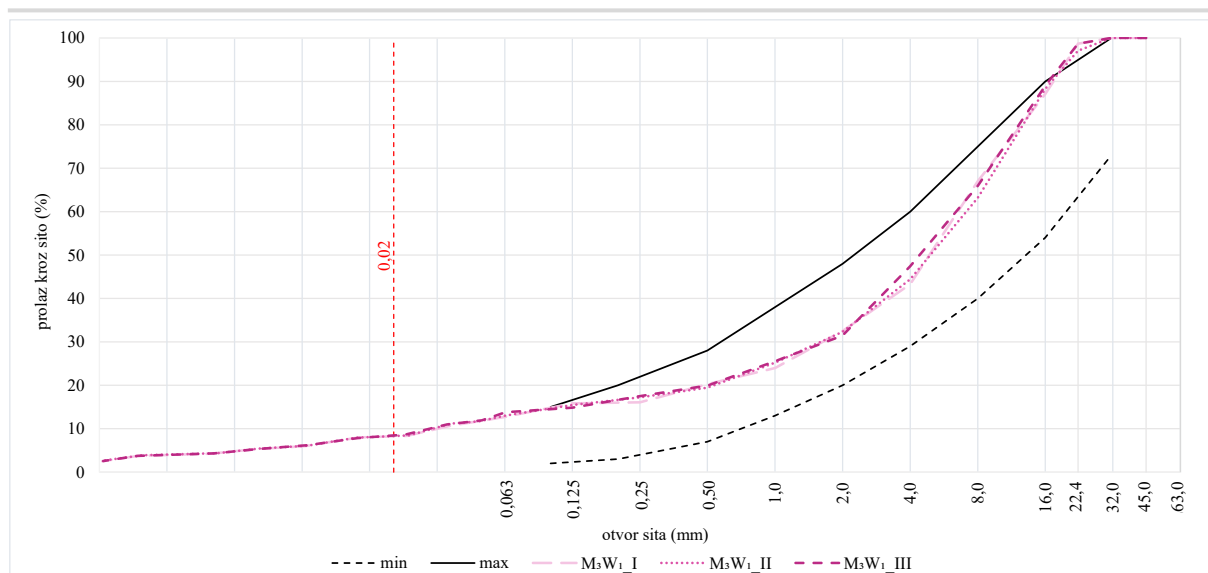
-rezultati areometriranja

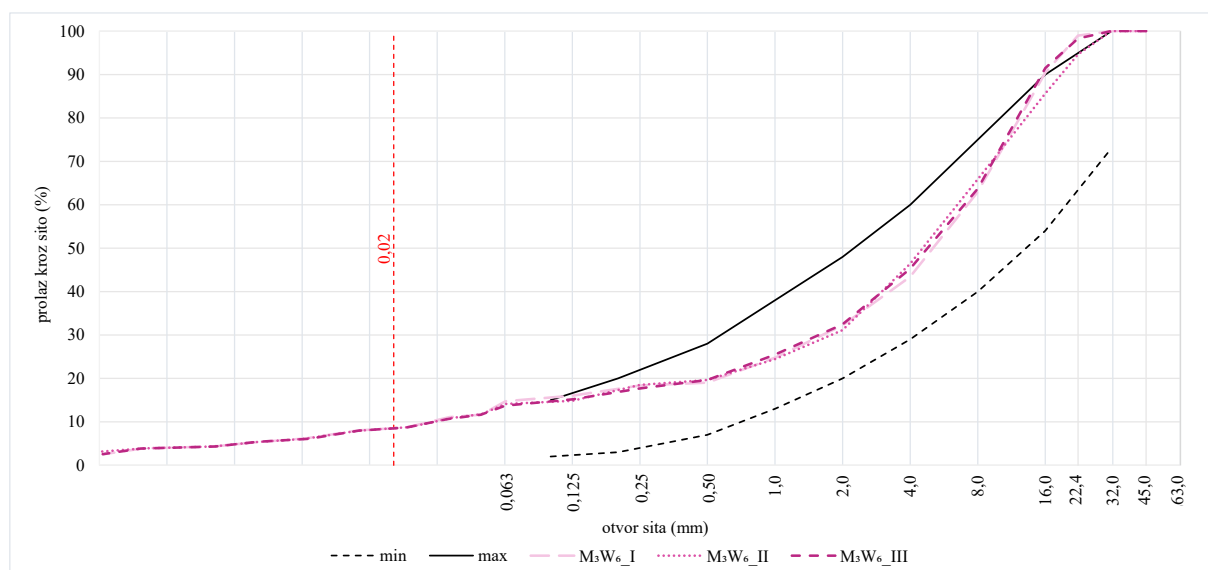
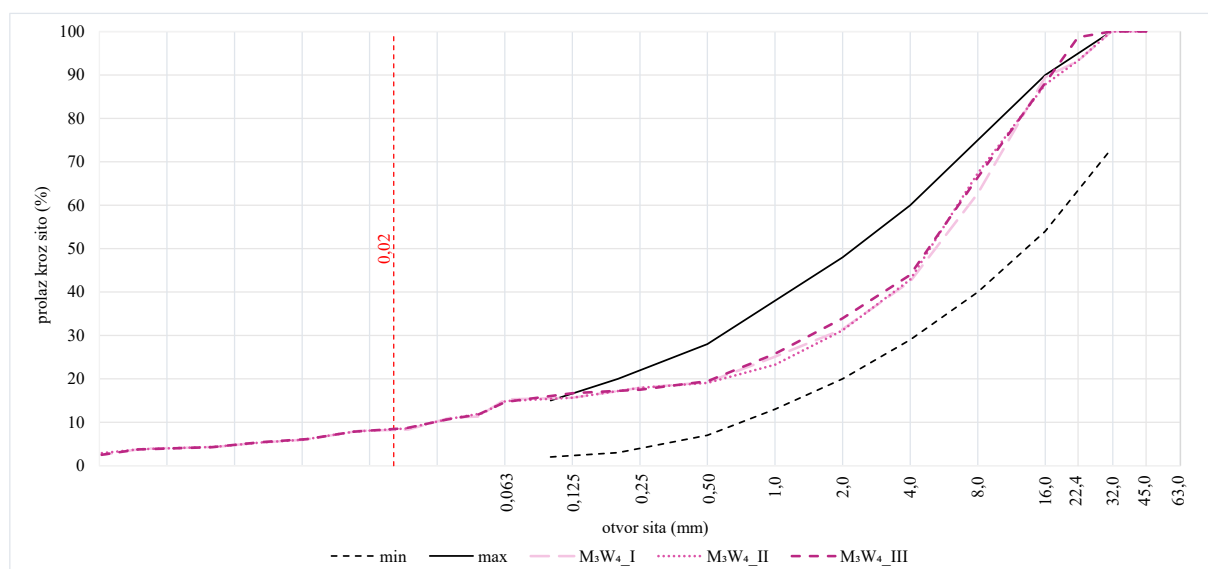
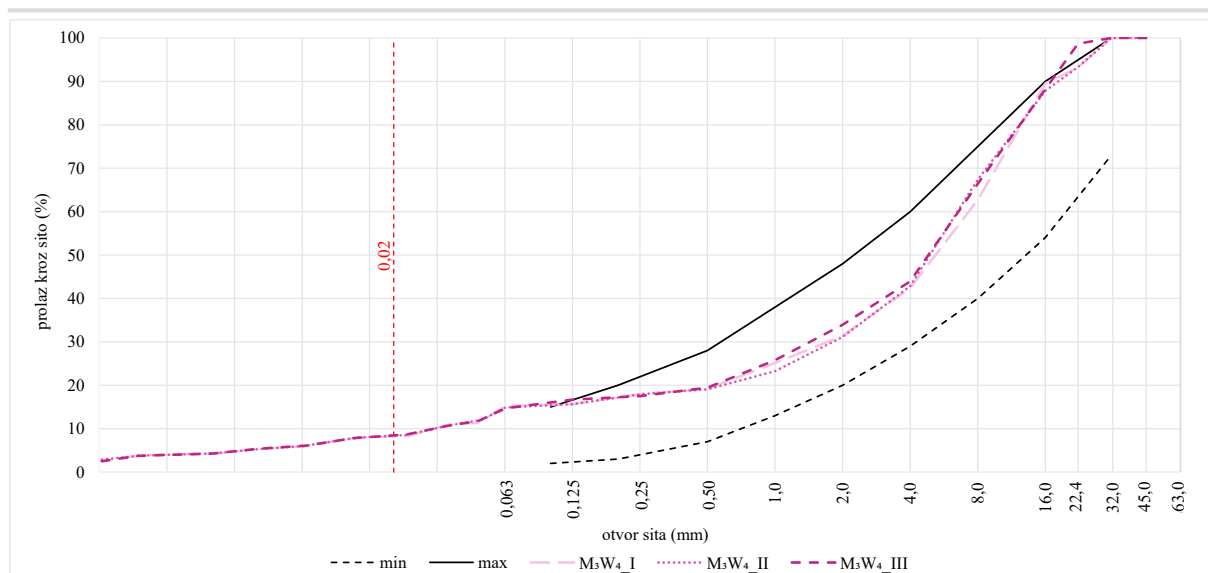
Uzorak	Veličina zrna (mm)								
	Udio zrna (%)								
M ₃ W ₁ _I	0,0489	0,0362	0,0230	0,0140	0,0080	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	11,780	10,732	8,382	7,994	5,980	5,342	4,293	3,767	2,529
M ₃ W ₁ _II	0,0480	0,0360	0,0234	0,0136	0,0082	0,0050	0,0033	0,0015	0,0010
	11,683	11,159	8,447	7,922	6,074	5,410	4,375	3,890	2,569
M ₃ W ₁ _III	0,0495	0,0345	0,0226	0,0138	0,0083	0,0051	0,0032	0,0014	0,0010
	11,918	10,986	8,669	7,866	6,208	5,359	4,314	3,742	2,551
M ₃ W ₂ _I	0,0483	0,0362	0,0223	0,0135	0,0082	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	12,004	11,020	8,204	7,758	6,086	5,321	4,325	3,804	2,573
M ₃ W ₂ _II	0,0477	0,0359	0,0226	0,0136	0,0080	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	11,664	11,084	8,502	7,883	6,006	5,316	4,362	3,812	2,549
M ₃ W ₂ _III	0,0495	0,0356	0,0225	0,0138	0,0083	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	11,908	11,142	8,508	7,983	6,112	5,272	4,293	3,849	2,535
M ₃ W ₃ _I	0,0476	0,0364	0,0229	0,0134	0,0081	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	11,691	11,121	8,240	7,916	6,108	5,249	4,316	3,898	2,546
M ₃ W ₃ _II	0,0482	0,0357	0,0225	0,0140	0,0079	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	12,075	11,031	8,623	7,829	6,114	5,393	4,310	3,887	2,565
M ₃ W ₃ _III	0,0497	0,0356	0,0236	0,0135	0,0081	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	11,937	10,852	8,563	7,878	6,144	5,289	4,318	3,792	3,070
M ₃ W ₄ _I	0,0474	0,0362	0,0232	0,0140	0,0080	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	11,316	11,120	8,301	8,026	5,984	5,326	4,340	3,888	2,606
M ₃ W ₄ _II	0,0497	0,0363	0,0225	0,0135	0,0079	0,0051	0,0031	0,0015	0,0010
	12,097	10,867	8,538	7,892	5,971	5,342	4,308	3,816	2,892
M ₃ W ₄ _III	0,0477	0,0346	0,0227	0,0133	0,0082	0,0051	0,0031	0,0015	0,0010
	11,774	10,650	8,650	7,856	6,126	5,430	4,295	3,759	2,513
M ₃ W ₅ _I	0,0471	0,0355	0,0224	0,0139	0,0079	0,0051	0,0033	0,0015	0,0010
	12,010	10,955	8,277	7,960	6,110	5,436	4,353	3,891	2,562
M ₃ W ₅ _II	0,0481	0,0353	0,0235	0,0139	0,0079	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	12,012	10,876	8,410	8,001	6,046	5,355	4,336	3,898	2,554
M ₃ W ₅ _III	0,0499	0,0354	0,0228	0,0140	0,0083	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	11,786	10,903	8,204	7,839	6,158	5,385	4,347	3,804	2,582
M ₃ W ₆ _I	0,0491	0,0353	0,0227	0,0139	0,0081	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	11,658	11,066	8,689	8,020	6,199	5,296	4,310	3,893	2,560
M ₃ W ₆ _II	0,0493	0,0363	0,0235	0,0138	0,0080	0,0050	0,0031	0,0015	0,0010
	11,787	10,877	8,809	7,935	6,074	5,360	4,300	3,898	3,123
M ₃ W ₆ _III	0,0489	0,0348	0,0228	0,0140	0,0083	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	11,660	10,649	8,703	7,989	6,100	5,391	4,320	3,849	2,540

Uzorak	Izračunati udio zrna R≤0,02 mm (%)
M ₃ W ₁ I	8,255
M ₃ W ₁ II	8,264
M ₃ W ₁ III	8,434
M ₃ W ₂ I	8,087
M ₃ W ₂ II	8,323
M ₃ W ₂ III	8,356
M ₃ W ₃ I	8,140
M ₃ W ₃ II	8,391
M ₃ W ₃ III	8,319
M ₃ W ₄ I	8,206
M ₃ W ₄ II	8,356
M ₃ W ₄ III	8,419
M ₃ W ₅ I	8,189
M ₃ W ₅ II	8,261
M ₃ W ₅ III	8,087
M ₃ W ₆ I	8,482
M ₃ W ₆ II	8,492
M ₃ W ₆ III	8,475

-rezultati prosijavanja

Uzorak	Prolazak kroz sito (%)											
	45 mm	31,5 mm	22,4 mm	16 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
M ₃ W ₁ I	100,0	100,0	98,7	87,1	67,0	43,2	32,5	24,0	20,2	16,1	15,8	12,7
M ₃ W ₁ II	100,0	100,0	97,0	88,3	63,2	44,4	32,3	25,2	19,5	17,2	15,5	13,0
M ₃ W ₁ III	100,0	100,0	98,7	89,0	65,9	47,4	31,5	25,6	19,9	17,5	14,9	13,8
M ₃ W ₂ I	100,0	100,0	96,7	89,8	64,7	46,8	32,6	24,1	19,2	16,7	16,9	14,3
M ₃ W ₂ II	100,0	100,0	95,0	86,9	66,8	46,3	33,2	24,6	19,7	17,8	14,8	15,1
M ₃ W ₂ III	100,0	100,0	93,8	89,3	64,2	44,0	32,9	26,3	20,1	16,7	16,5	13,9
M ₃ W ₃ I	100,0	100,0	98,6	85,6	65,0	44,1	33,4	24,4	18,5	16,2	16,4	13,4
M ₃ W ₃ II	100,0	100,0	99,0	87,5	64,7	44,1	33,7	23,4	19,1	18,5	16,6	13,4
M ₃ W ₃ III	100,0	100,0	96,7	92,1	66,4	44,8	33,6	25,0	20,2	17,3	16,3	14,3
M ₃ W ₄ I	100,0	100,0	93,2	89,5	62,7	42,4	31,4	25,1	19,2	17,9	15,6	15,2
M ₃ W ₄ II	100,0	100,0	93,3	87,8	67,4	42,8	31,1	23,3	19,1	18,0	15,6	14,9
M ₃ W ₄ III	100,0	100,0	98,7	88,2	66,4	43,9	33,9	25,8	19,5	17,5	16,7	14,7
M ₃ W ₅ I	100,0	100,0	95,6	91,3	66,3	43,6	34,1	25,1	18,1	16,9	15,2	14,8
M ₃ W ₅ II	100,0	100,0	92,2	88,0	66,1	43,3	33,2	23,7	18,6	15,3	15,1	13,5
M ₃ W ₅ III	100,0	100,0	94,3	85,9	62,7	42,7	34,4	24,9	18,6	16,6	14,8	13,6
M ₃ W ₆ I	100,0	100,0	98,9	90,4	63,0	43,4	32,2	24,8	19,0	18,4	16,0	14,7
M ₃ W ₆ II	100,0	100,0	94,6	85,6	65,9	46,4	31,1	24,5	19,7	18,5	14,9	14,1
M ₃ W ₆ III	100,0	100,0	98,3	91,5	63,7	45,3	32,5	25,5	19,7	17,7	15,2	13,7





Prilog 3.5 Uzorci izrađeni od mješavine M₄

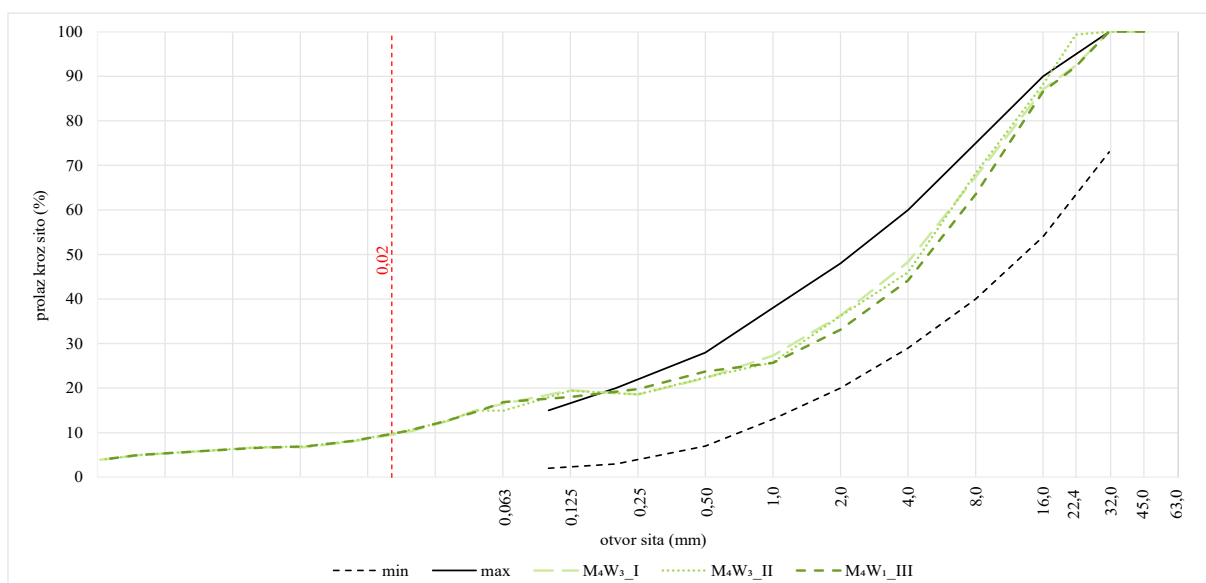
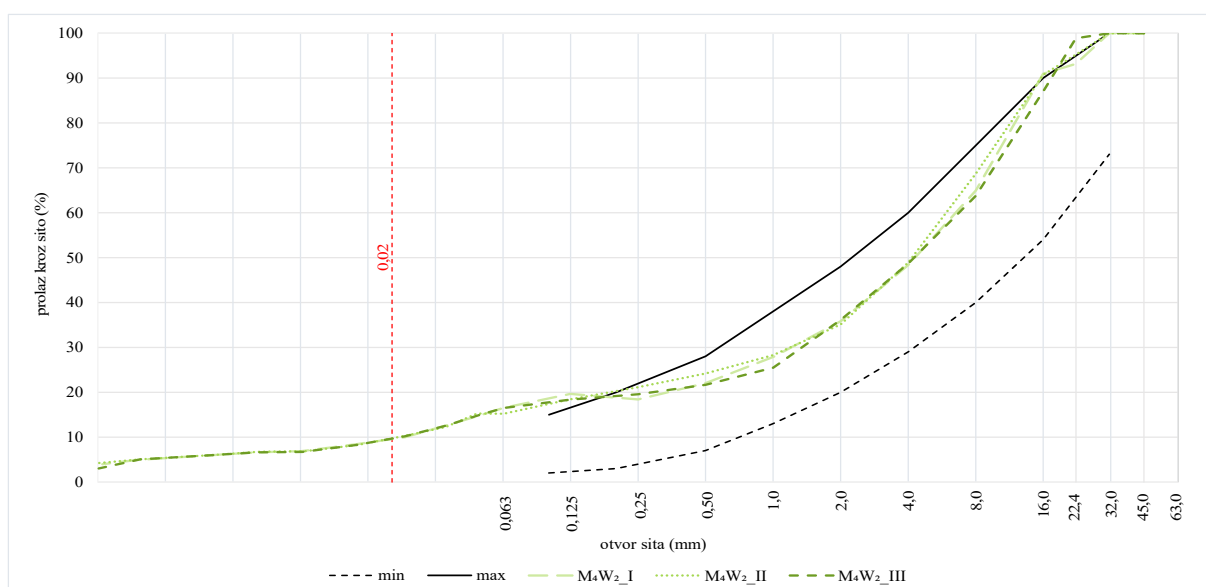
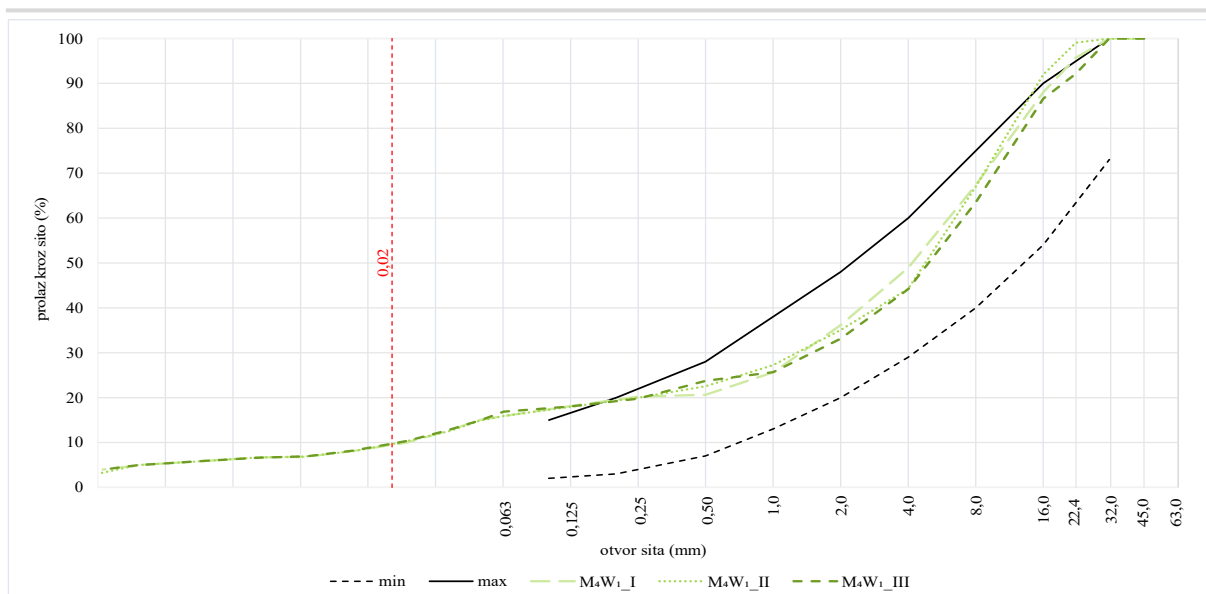
-rezultati areometriranja

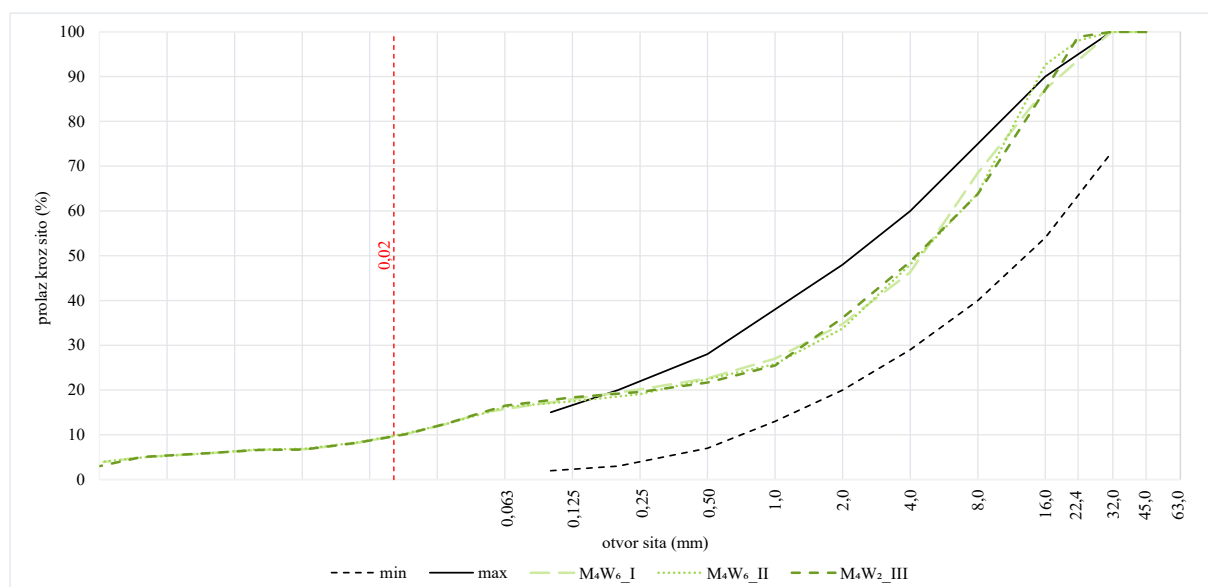
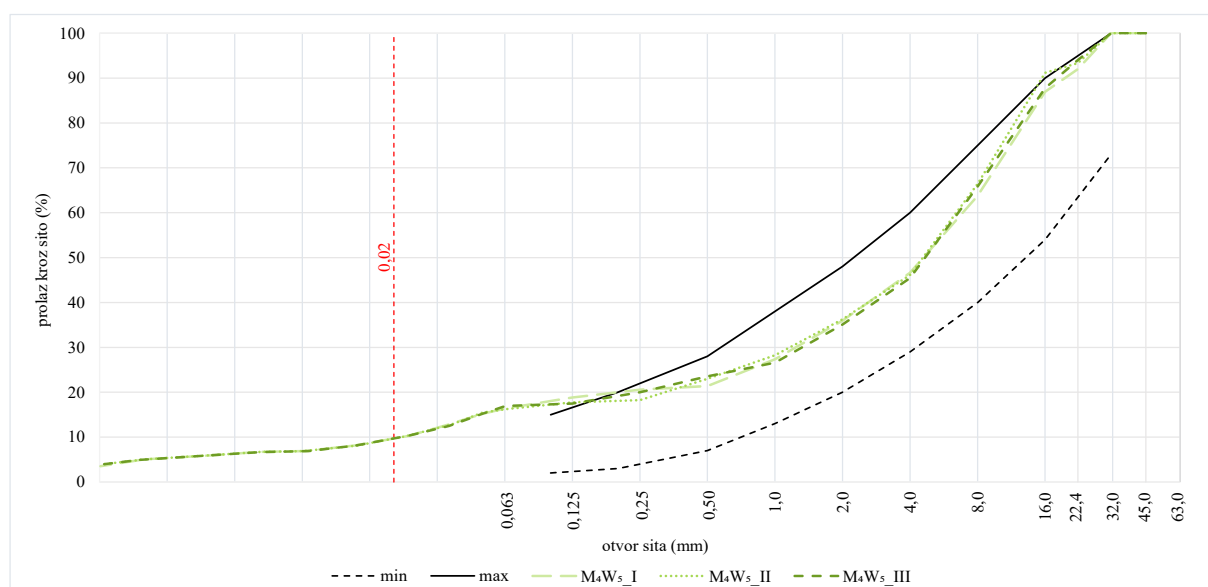
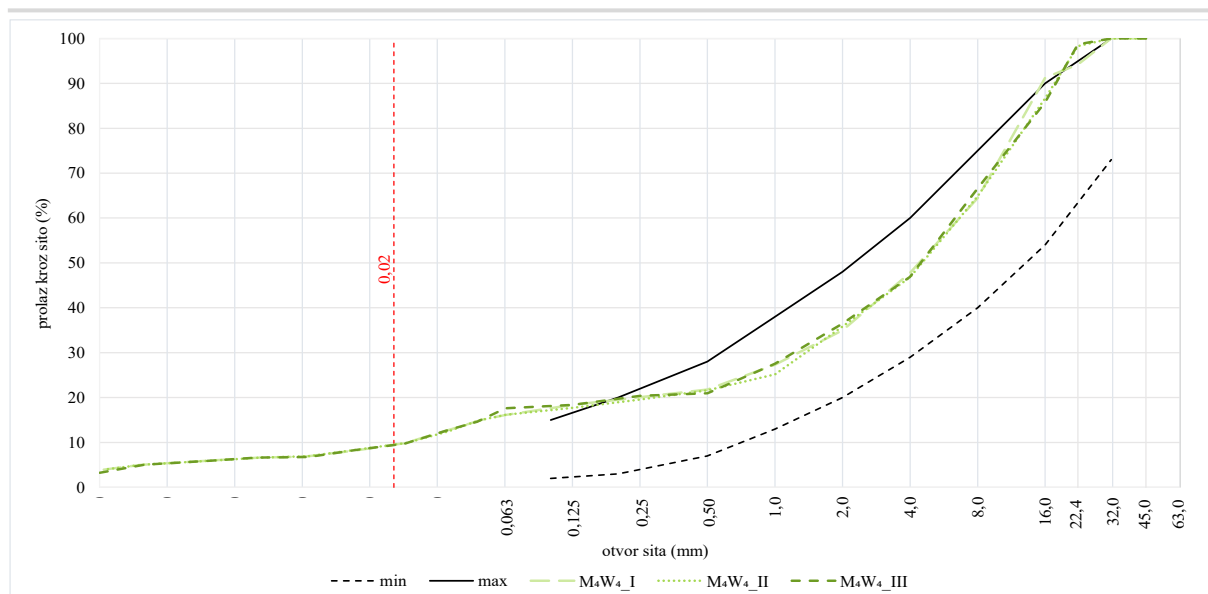
Uzorak	Veličina zrna (mm)								
	Udio zrna (%)								
M ₄ W ₁ _I	0,0490	0,0364	0,0234	0,0140	0,0082	0,0050	0,0032	0,0016	0,0010
	15,010	12,770	10,007	8,237	6,782	6,674	6,007	5,058	3,966
M ₄ W ₁ _II	0,0489	0,0358	0,0227	0,0136	0,0082	0,0050	0,0031	0,0015	0,0010
	14,792	12,480	10,195	8,102	6,864	6,668	5,978	4,967	3,111
M ₄ W ₁ _III	0,0496	0,0355	0,0233	0,0134	0,0083	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	14,985	12,734	10,348	8,172	6,911	6,634	5,993	4,987	3,984
M ₄ W ₂ _I	0,0489	0,0360	0,0229	0,0139	0,0079	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	14,788	12,817	10,030	8,423	6,858	6,618	6,007	4,943	3,959
M ₄ W ₂ _II	0,0479	0,0347	0,0224	0,0139	0,0082	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	15,251	12,259	10,224	8,253	6,886	6,731	6,037	5,031	4,233
M ₄ W ₂ _III	0,0489	0,0354	0,0227	0,0138	0,0080	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	14,912	12,671	10,159	8,228	6,692	6,638	6,003	5,032	3,030
M ₄ W ₃ _I	0,0479	0,0357	0,0237	0,0133	0,0082	0,0050	0,0033	0,0015	0,0010
	15,120	12,667	10,137	8,040	6,740	6,690	6,050	5,050	3,921
M ₄ W ₃ _II	0,0478	0,0344	0,0227	0,0134	0,0081	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	14,982	12,520	10,299	8,169	6,905	6,691	6,025	5,046	3,930
M ₄ W ₃ _III	0,0496	0,0363	0,0231	0,0134	0,0081	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	15,315	12,503	10,112	8,118	6,706	6,669	6,018	5,027	2,003
M ₄ W ₄ _I	0,0495	0,0359	0,0223	0,0137	0,0080	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	15,088	12,900	9,845	8,249	6,824	6,639	5,995	4,990	3,951
M ₄ W ₄ _II	0,0478	0,0348	0,0229	0,0139	0,0083	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	14,872	12,440	9,930	8,412	6,931	6,642	6,031	5,037	3,946
M ₄ W ₄ _III	0,0470	0,0343	0,0224	0,0134	0,0083	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	14,617	12,656	9,749	8,302	6,775	6,614	5,978	5,056	3,256
M ₄ W ₅ _I	0,0492	0,0344	0,0232	0,0135	0,0081	0,0050	0,0031	0,0015	0,0010
	15,155	12,660	10,236	8,133	6,865	6,725	5,962	5,053	3,524
M ₄ W ₅ _II	0,0496	0,0361	0,0224	0,0136	0,0079	0,0051	0,0031	0,0015	0,0010
	15,455	12,817	10,153	8,092	6,867	6,701	5,967	5,054	3,908
M ₄ W ₅ _III	0,0487	0,0353	0,0234	0,0136	0,0083	0,0051	0,0031	0,0015	0,0010
	15,047	12,479	10,357	8,128	6,891	6,652	5,978	4,933	3,917
M ₄ W ₆ _I	0,0487	0,0348	0,0230	0,0138	0,0081	0,0049	0,0031	0,0015	0,0010
	14,857	12,478	10,239	8,203	6,813	6,601	5,967	5,048	3,946
M ₄ W ₆ _II	0,0496	0,0351	0,0227	0,0135	0,0080	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	15,155	12,601	10,169	8,108	6,873	6,641	6,023	5,010	2,989
M ₅ W ₆ _III	0,0488	0,0354	0,0235	0,0133	0,0083	0,0051	0,0031	0,0015	0,0010
	14,664	12,594	10,330	8,294	6,877	6,712	5,973	4,933	3,908

Uzorak	Izračunati udio zrna $R \leq 0,02$ mm (%)
M ₄ W ₁ I	9,365
M ₄ W ₁ II	9,581
M ₄ W ₁ III	9,619
M ₄ W ₂ I	9,507
M ₄ W ₂ II	9,665
M ₄ W ₂ III	9,572
M ₄ W ₃ I	9,396
M ₄ W ₃ II	9,676
M ₄ W ₃ III	9,472
M ₄ W ₄ I	9,417
M ₄ W ₄ II	9,439
M ₄ W ₄ III	9,359
M ₄ W ₅ I	9,551
M ₄ W ₅ II	9,580
M ₄ W ₅ III	9,590
M ₄ W ₆ I	9,580
M ₄ W ₆ II	9,557
M ₅ W ₆ III	9,634

-rezultati prosijavanja

Uzorak	Prolazak kroz sito (%)											
	45 mm	31,5 mm	22,4 mm	16 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
M ₄ W ₁ I	100,0	100,0	95,7	88,0	67,3	48,9	36,1	25,6	20,6	20,2	18,1	15,9
M ₄ W ₁ II	100,0	100,0	99,1	92,0	67,0	44,2	35,1	27,2	22,5	20,0	18,0	15,9
M ₄ W ₁ III	100,0	100,0	92,2	86,6	63,5	44,2	33,1	25,7	23,7	19,8	18,0	16,9
M ₄ W ₂ I	100,0	100,0	93,1	91,0	64,9	48,3	35,8	27,9	22,1	18,4	19,6	16,5
M ₄ W ₂ II	100,0	100,0	95,2	90,7	68,6	48,8	35,1	28,3	24,2	21,1	18,4	15,2
M ₄ W ₂ III	100,0	100,0	98,9	87,1	63,8	48,7	36,1	25,5	21,7	19,6	18,4	16,5
M ₄ W ₃ I	100,0	100,0	92,4	87,1	67,4	48,3	36,3	27,3	22,2	18,6	19,5	16,5
M ₄ W ₃ II	100,0	100,0	99,4	88,2	68,2	46,0	36,2	25,8	22,4	18,6	19,4	14,9
M ₄ W ₃ III	100,0	100,0	99,4	89,3	67,1	45,2	36,4	26,1	20,7	19,0	18,6	16,9
M ₄ W ₄ I	100,0	100,0	94,2	91,3	64,4	47,8	35,0	27,3	21,8	20,1	18,4	16,1
M ₄ W ₄ II	100,0	100,0	98,3	86,7	64,8	46,8	35,8	25,2	21,6	19,6	17,7	16,1
M ₄ W ₄ III	100,0	100,0	98,7	85,8	66,6	46,9	36,5	27,5	21,0	20,4	18,4	17,6
M ₄ W ₅ I	100,0	100,0	92,0	87,0	63,8	46,6	35,9	27,3	21,4	20,6	18,8	16,4
M ₄ W ₅ II	100,0	100,0	93,3	91,2	66,4	46,1	36,2	28,2	23,0	18,2	17,7	16,2
M ₄ W ₅ III	100,0	100,0	94,0	87,8	65,8	45,5	35,1	26,6	23,6	20,0	17,5	17,0
M ₄ W ₆ I	100,0	100,0	93,6	87,1	68,5	46,3	34,8	27,0	22,6	20,2	18,0	15,8
M ₄ W ₆ II	100,0	100,0	93,9	89,6	64,2	44,9	35,7	28,3	20,9	18,8	18,1	16,4
M ₅ W ₆ III	100,0	100,0	98,0	92,7	63,9	48,1	33,7	25,8	22,5	19,1	17,4	16,3





Prilog 3.6 Uzorci izrađeni od mješavine M₅

-rezultati areomeriranja

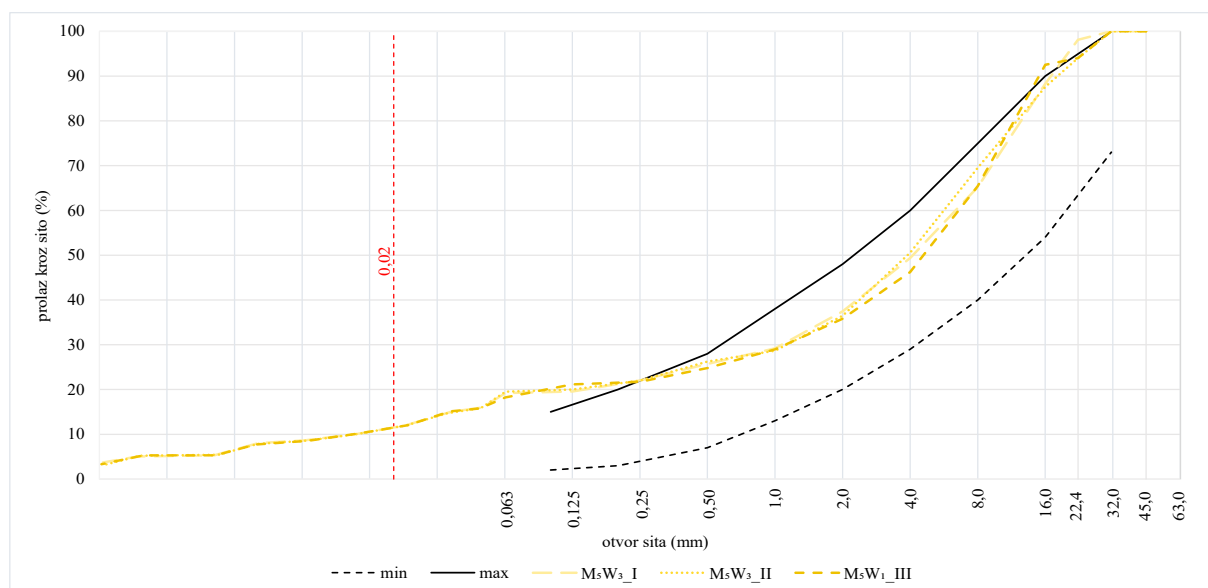
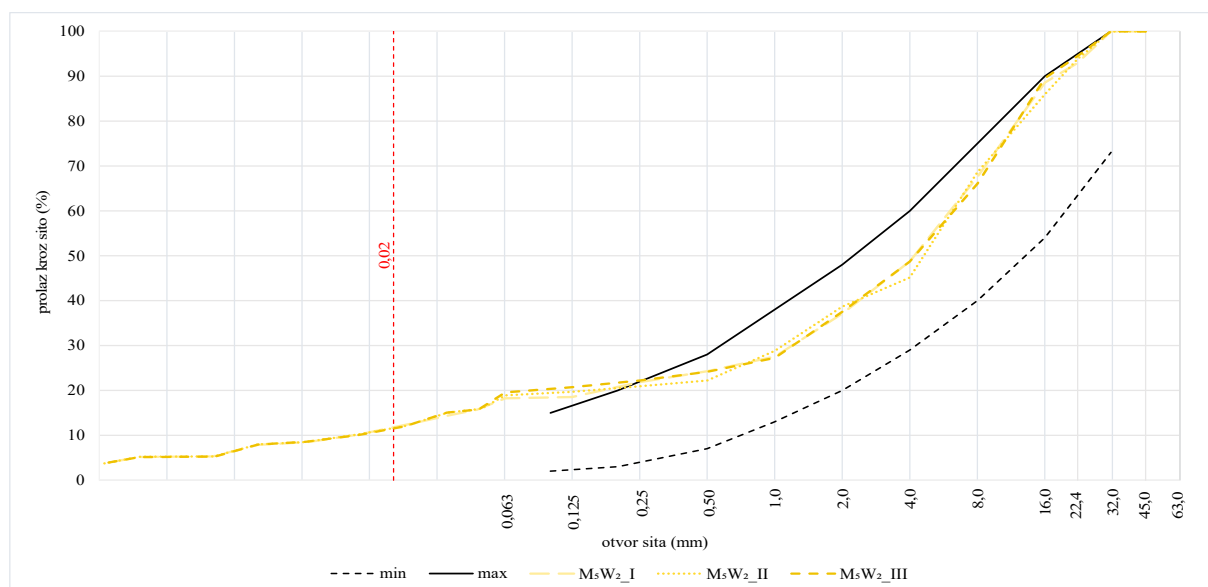
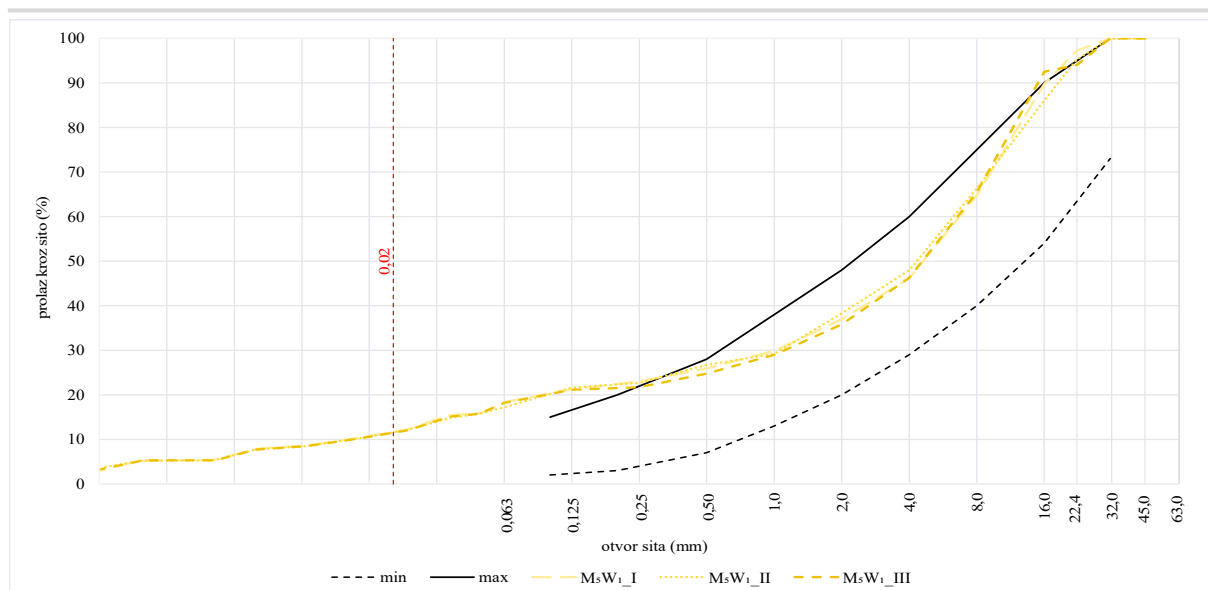
Uzorak	Veličina zrna (mm)								
	Udio zrna (%)								
M ₅ W ₁ _I	0,0495	0,0353	0,0230	0,0136	0,0082	0,0051	0,0031	0,0015	0,0010
	15,966	15,364	12,164	10,234	8,625	7,996	5,332	5,209	3,001
M ₅ W ₁ _II	0,0484	0,0358	0,0236	0,0140	0,0080	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	15,773	14,813	12,235	10,219	8,437	7,756	5,293	5,185	3,805
M ₅ W ₁ _III	0,0484	0,0357	0,0232	0,0140	0,0082	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	15,773	15,107	12,047	10,191	8,503	7,699	5,299	5,282	3,301
M ₅ W ₂ _I	0,0472	0,0360	0,0237	0,0138	0,0083	0,0050	0,0031	0,0015	0,0010
	15,697	14,497	12,522	10,134	8,472	7,864	5,318	5,161	3,688
M ₅ W ₂ _II	0,0493	0,0349	0,0227	0,0138	0,0080	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	15,933	15,041	12,104	10,164	8,499	7,969	5,299	5,225	3,661
M ₅ W ₂ _III	0,0479	0,0345	0,0224	0,0141	0,0082	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	15,739	15,069	11,979	10,075	8,555	7,949	5,276	5,153	3,682
M ₅ W ₃ _I	0,0497	0,0360	0,0225	0,0138	0,0080	0,0050	0,0032	0,0014	0,0010
	15,992	15,039	11,978	10,113	8,638	8,029	5,295	5,025	3,704
M ₅ W ₃ _II	0,0489	0,0345	0,0228	0,0136	0,0083	0,0050	0,0033	0,0015	0,0010
	15,865	14,671	12,003	9,985	8,620	7,842	5,442	5,217	2,999
M ₅ W ₃ _III	0,0492	0,0352	0,0226	0,0138	0,0081	0,0049	0,0032	0,0015	0,0010
	15,908	15,339	12,052	10,284	8,515	7,773	5,279	5,041	3,757
M ₅ W ₄ _I	0,0484	0,0360	0,0224	0,0139	0,0080	0,0050	0,0032	0,0015	0,0010
	15,781	14,549	12,366	10,177	8,627	7,867	5,309	4,257	3,456
M ₅ W ₄ _II	0,0482	0,0362	0,0227	0,0138	0,0081	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	15,761	14,800	11,859	10,068	8,488	7,910	5,328	5,257	3,757
M ₅ W ₄ _III	0,0481	0,0360	0,0223	0,0141	0,0082	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	15,752	15,024	11,427	10,418	8,535	7,776	5,366	5,089	3,645
M ₅ W ₅ _I	0,0476	0,0362	0,0232	0,0140	0,0082	0,0052	0,0032	0,0015	0,0010
	15,724	14,622	12,752	10,358	8,377	7,887	5,333	5,081	3,011
M ₅ W ₅ _II	0,0473	0,0364	0,0225	0,0138	0,0081	0,0050	0,0033	0,0015	0,0010
	15,706	14,989	11,903	10,144	8,528	7,952	5,428	5,129	3,336
M ₅ W ₅ _III	0,0494	0,0347	0,0230	0,0139	0,0079	0,0051	0,0032	0,0015	0,0010
	15,950	14,631	12,649	10,219	8,507	8,000	5,291	4,901	3,698
M ₅ W ₆ _I	0,0489	0,0353	0,0229	0,0134	0,0080	0,0050	0,0031	0,0015	0,0010
	15,857	14,825	12,425	10,237	8,495	8,026	5,308	5,075	3,640
M ₅ W ₆ _II	0,0477	0,0345	0,0234	0,0134	0,0079	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	15,730	14,359	11,877	10,248	8,572	7,823	5,394	4,999	3,256
M ₅ W ₆ _III	0,0485	0,0361	0,0225	0,0137	0,0082	0,0049	0,0033	0,0015	0,0010
	15,790	15,263	11,934	10,235	8,390	7,753	5,418	5,049	3,656

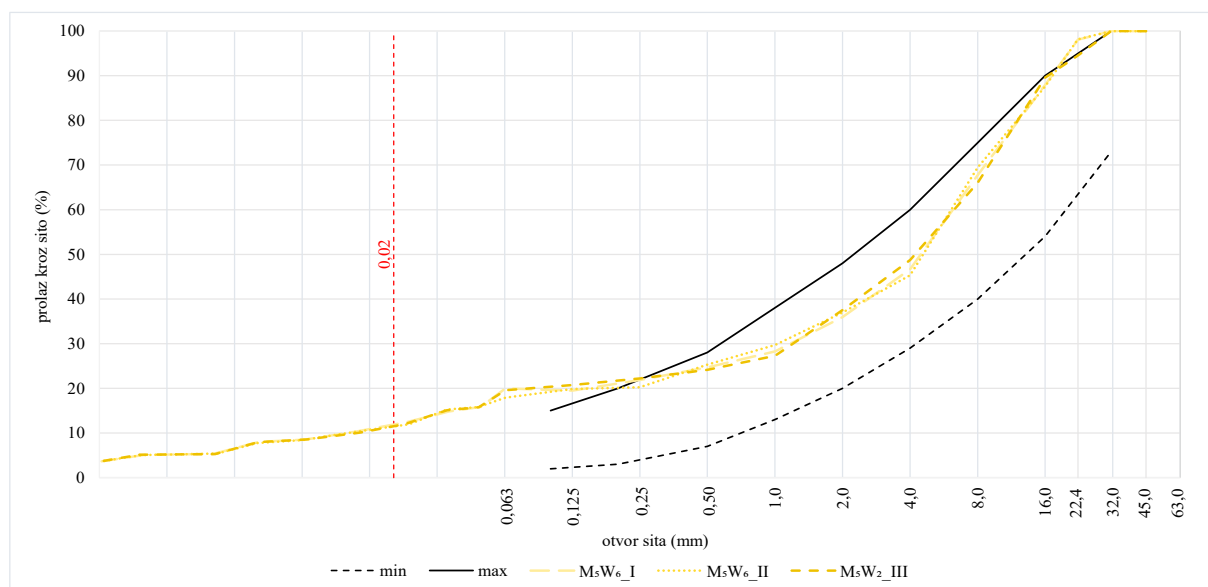
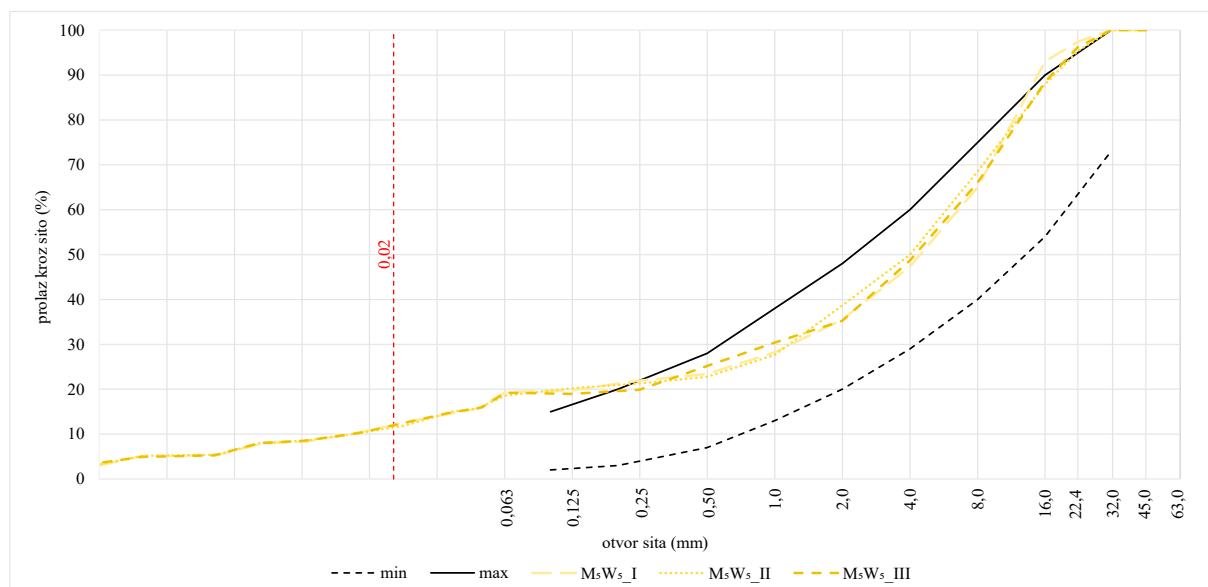
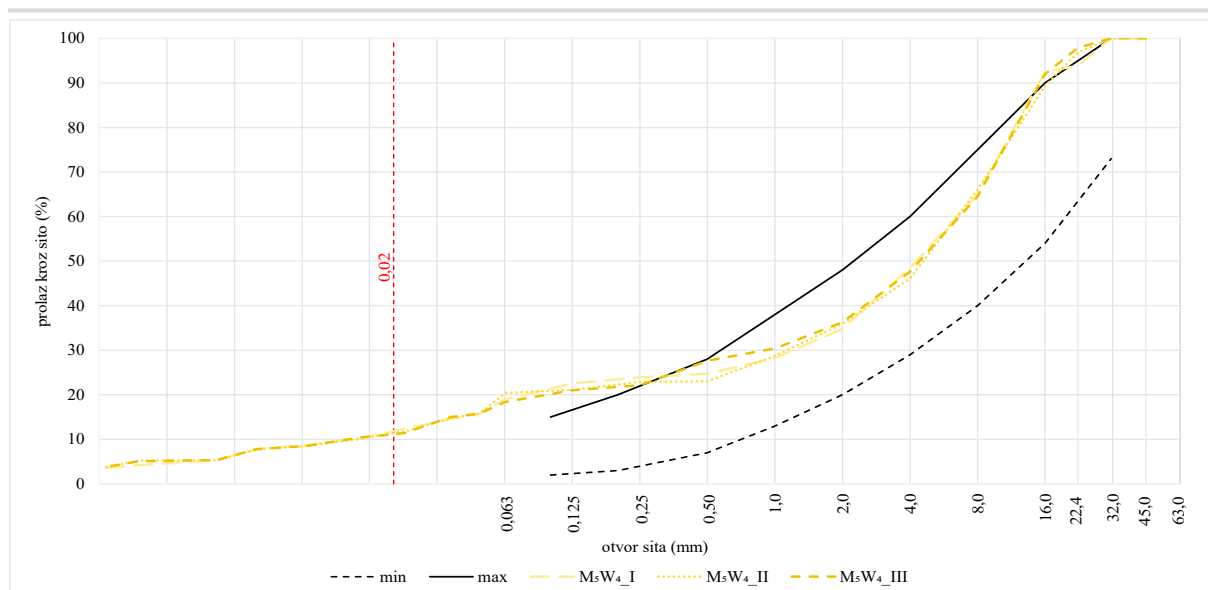
Uzorak	Izračunati udio zrna R≤0,02 mm (%)
M ₅ W ₁ I	11,552
M ₅ W ₁ II	11,481
M ₅ W ₁ III	11,408
M ₅ W ₂ I	11,628
M ₅ W ₂ II	11,509
M ₅ W ₂ III	11,421
M ₅ W ₃ I	11,437
M ₅ W ₃ II	11,396
M ₅ W ₃ III	11,533
M ₅ W ₄ I	11,751
M ₅ W ₄ II	11,308
M ₅ W ₄ III	11,140
M ₅ W ₅ I	11,926
M ₅ W ₅ II	11,393
M ₅ W ₅ III	11,851
M ₅ W ₆ I	11,754
M ₅ W ₆ II	11,319
M ₅ W ₆ III	11,453

-rezultati prosijavanja

Uzorak	Prolazak kroz sito (%)											
	45 mm	31,5 mm	22,4 mm	16 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
M ₅ W ₁ I	100,0	100,0	97,3	89,7	64,7	46,2	37,0	29,9	25,9	23,0	21,2	18,4
M ₅ W ₁ II	100,0	100,0	95,3	86,1	66,3	48,0	38,3	29,2	26,8	22,7	21,6	17,2
M ₅ W ₁ III	100,0	100,0	94,0	92,5	65,4	46,2	35,8	29,0	24,8	21,7	21,1	18,3
M ₅ W ₂ I	100,0	100,0	93,0	88,6	67,6	48,7	37,1	27,5	24,3	21,8	18,5	18,2
M ₅ W ₂ II	100,0	100,0	93,8	86,0	68,6	45,1	38,6	28,8	22,2	20,9	19,7	18,9
M ₅ W ₂ III	100,0	100,0	94,5	89,6	66,0	48,7	37,5	27,3	24,1	22,2	20,7	19,6
M ₅ W ₃ I	100,0	100,0	98,1	88,3	65,2	49,4	37,4	29,2	25,7	22,0	19,5	19,2
M ₅ W ₃ II	100,0	100,0	94,0	87,6	69,5	50,6	36,4	28,7	26,3	22,0	20,0	19,5
M ₅ W ₃ III	100,0	100,0	93,8	86,5	64,5	45,2	37,5	28,5	24,5	22,3	19,6	17,6
M ₅ W ₄ I	100,0	100,0	93,8	92,5	64,9	48,5	34,8	28,3	24,7	23,9	22,5	19,0
M ₅ W ₄ II	100,0	100,0	96,8	89,4	66,0	46,1	35,9	28,7	23,0	22,9	21,1	20,4
M ₅ W ₄ III	100,0	100,0	97,9	92,0	64,5	47,6	36,3	30,4	27,7	22,2	21,0	18,4
M ₅ W ₅ I	100,0	100,0	97,4	93,1	64,9	47,3	35,5	28,3	23,4	21,9	19,8	19,4
M ₅ W ₅ II	100,0	100,0	95,4	88,0	68,5	50,0	38,7	27,7	22,8	21,3	20,2	18,6
M ₅ W ₅ III	100,0	100,0	96,2	88,5	66,0	48,7	35,2	30,4	25,2	19,9	18,9	19,2
M ₅ W ₆ I	100,0	100,0	98,0	88,0	67,7	46,6	35,9	28,3	24,7	21,8	19,5	20,0
M ₅ W ₆ II	100,0	100,0	98,6	88,4	65,8	48,8	35,5	29,3	26,5	21,6	19,1	19,4
M ₅ W ₆ III	100,0	100,0	98,1	87,6	69,4	45,3	37,0	29,7	25,3	20,3	19,9	17,9

Error! Use the Home tab to apply Naslov 1;Š_Heading 1 to the text that you want to appear here.





Prilog 4: Udio vlage, stupanj zbijenosti i dinamički modul deformacije

Prilog 4.1 Uzorci izrađeni od mješavine M₀

Uzorak	Udio vlage (%)	Sz (%)	Evd (MN/m ²)
M ₀ W ₁ I	0,04	99,5	38,9
M ₀ W ₁ II	0,04	99,6	35,3
M ₀ W ₁ III	0,03	99,4	37,1
M ₀ W ₂ I	1,23	100,0	41,4
M ₀ W ₂ II	1,12	100,3	43,0
M ₀ W ₂ III	1,35	100,2	44,2
M ₀ W ₃ I	3,02	100,1	46,0
M ₀ W ₃ II	3,25	100,0	45,4
M ₀ W ₃ III	3,13	100,0	47,7
M ₀ W ₄ I	3,41	100,0	41,1
M ₀ W ₄ II	3,55	100,1	38,6
M ₀ W ₄ III	3,64	100,3	37,4
M ₀ W ₅ I	4,12	100,2	53,3
M ₀ W ₅ II	4,44	100,0	52,1
M ₀ W ₅ III	4,31	100,0	50,7
M ₀ W ₆ I	4,91	99,8	33,5
M ₀ W ₆ II	4,81	99,9	35,5
M ₀ W ₆ III	5,22	100,0	37,0

Prilog 4.2 Uzorci izrađeni od mješavine M₁

Uzorak	Udio vlage (%)	Sz (%)	Evd (MN/m ²)
M ₁ W ₁ I	0,09	99,5	42,2
M ₁ W ₁ II	0,01	99,8	43,9
M ₁ W ₁ III	0,16	99,9	45,1
M ₁ W ₂ I	1,60	100,0	42,6
M ₁ W ₂ II	1,80	100,0	40,3
M ₁ W ₂ III	1,84	100,0	39,1
M ₁ W ₃ I	3,70	100,1	31,1
M ₁ W ₃ II	3,96	100,3	33,0
M ₁ W ₃ III	3,79	100,2	33,5
M ₁ W ₄ I	4,65	100,0	40,1
M ₁ W ₄ II	4,77	100,0	38,0
M ₁ W ₄ III	4,53	100,3	38,6
M ₁ W ₅ I	5,03	100,2	42,9
M ₁ W ₅ II	5,22	100,0	41,1
M ₁ W ₅ III	5,34	100,0	39,1
M ₁ W ₆ I	5,78	99,8	36,4
M ₁ W ₆ II	5,91	99,9	37,0
M ₁ W ₆ III	5,63	100,0	34,6

Prilog 4.3 Uzorci izrađeni od mješavine M₂

Uzorak	Udio vlage (%)	Sz (%)	Evd (MN/m ²)
M ₂ W ₁ I	0,06	99,9	30,4
M ₂ W ₁ II	0,02	99,7	32,2
M ₂ W ₁ III	0,10	99,9	33,8
M ₂ W ₂ I	1,38	100,0	40,3
M ₂ W ₂ II	1,46	100,0	44,5
M ₂ W ₂ III	1,52	100,3	43,1
M ₂ W ₃ I	3,04	100,2	56,1
M ₂ W ₃ II	3,25	100,0	60,3
M ₂ W ₃ III	2,93	100,0	54,0
M ₂ W ₄ I	4,00	100,0	46,5
M ₂ W ₄ II	4,11	100,0	45,2
M ₂ W ₄ III	4,40	100,3	44,8
M ₂ W ₅ I	5,64	100,2	43,2
M ₂ W ₅ II	5,77	100,0	44,6
M ₂ W ₅ III	5,41	100,0	45,6
M ₂ W ₆ I	6,88	100,4	48,9
M ₂ W ₆ II	6,99	100,1	51,1
M ₂ W ₆ III	7,07	100,0	50,5

Prilog 4.4 Uzorci izrađeni od mješavine M₃

Uzorak	Udio vlage (%)	Sz (%)	Evd (MN/m ²)
M ₃ W ₁ I	0,01	99,5	29,7
M ₃ W ₁ II	0,06	99,7	31,5
M ₃ W ₁ III	0,01	99,5	30,6
M ₃ W ₂ I	1,38	100,1	33,6
M ₃ W ₂ II	1,50	100,3	39,8
M ₃ W ₂ III	1,26	100,2	40,2
M ₃ W ₃ I	2,72	100,1	45,1
M ₃ W ₃ II	2,85	100,3	44,3
M ₃ W ₃ III	2,90	100,4	42,1
M ₃ W ₄ I	3,68	100,1	46,2
M ₃ W ₄ II	3,45	100,3	44,8
M ₃ W ₄ III	3,81	100,0	45,9
M ₃ W ₅ I	5,82	99,9	24,4
M ₃ W ₅ II	6,01	99,7	21,2
M ₃ W ₅ III	5,69	99,6	19,3
M ₃ W ₆ I	6,02	96,3	12,8
M ₃ W ₆ II	6,25	97,6	14,6
M ₃ W ₆ III	6,36	95,5	13,2

Prilog 4.5 Uzorci izrađeni od mješavine M₄

Uzorak	Udio vlage (%)	Sz (%)	Evd (MN/m ²)
M ₄ W ₁ I	1,26	99,5	36,8
M ₄ W ₁ II	1,12	99,7	37,7
M ₄ W ₁ III	1,04	99,5	38,1
M ₄ W ₂ I	2,21	100,1	35,2
M ₄ W ₂ II	2,45	100,3	33,7
M ₄ W ₂ III	2,33	100,2	36,2
M ₄ W ₃ I	2,91	100,1	54,0
M ₄ W ₃ II	3,17	100,3	54,4
M ₄ W ₃ III	3,05	100,4	53,0
M ₄ W ₄ I	5,29	100,1	45,1
M ₄ W ₄ II	5,42	100,3	47,6
M ₄ W ₄ III	5,07	100,0	43,6
M ₄ W ₅ I	6,17	99,9	24,9
M ₄ W ₅ II	6,39	99,7	26,9
M ₄ W ₅ III	6,62	99,6	25,4
M ₄ W ₆ I	7,27	90,3	12,1
M ₄ W ₆ II	7,05	93,6	11,3
M ₅ W ₆ III	7,51	93,5	10,2

Prilog 4.6 Uzorci izrađeni od mješavine M₅

Uzorak	Udio vlage (%)	Sz (%)	Evd (MN/m ²)
M ₅ W ₁ I	0,43	99,6	37,1
M ₅ W ₁ II	0,42	99,7	39,1
M ₅ W ₁ III	0,28	99,5	39,7
M ₅ W ₂ I	2,83	100,1	31,5
M ₅ W ₂ II	2,94	100,3	35,6
M ₅ W ₂ III	2,72	100,2	32,8
M ₅ W ₃ I	4,69	100,1	30,6
M ₅ W ₃ II	4,53	100,3	35,4
M ₅ W ₃ III	4,44	100,4	37,0
M ₅ W ₄ I	5,58	100,1	11,7
M ₅ W ₄ II	5,93	100,3	15,0
M ₅ W ₄ III	5,80	100,0	17,3
M ₅ W ₅ I	6,71	99,9	10,0
M ₅ W ₅ II	7,03	99,7	13,1
M ₅ W ₅ III	6,88	99,6	12,0
M ₅ W ₆ I	7,95	92,6	7,1
M ₅ W ₆ II	8,19	91,7	6,0
M ₅ W ₆ III	8,36	90,5	9,0

Prilog 5: Brzina EM vala u sloju

Prilog 5.1 Brzina EM vala u uzorcima izrađenim od mješavine M₀

Oznaka uzorka	V _{1GHz,u} (m/ns)	V _{1GHz,p} (m/ns)	V _{2GHz,u} (m/ns)	V _{2GHz,p} (m/ns)
M ₀ W ₁ _I	0,127	0,127	0,133	0,135
M ₀ W ₁ _II	0,127	0,127	0,133	0,135
M ₀ W ₁ _III	0,129	0,129	0,135	0,137
M ₀ W ₂ _I	0,119	0,118	0,125	0,125
M ₀ W ₂ _II	0,120	0,120	0,126	0,127
M ₀ W ₂ _III	0,118	0,117	0,124	0,124
M ₀ W ₃ _I	0,103	0,102	0,106	0,107
M ₀ W ₃ _II	0,100	0,101	0,103	0,105
M ₀ W ₃ _III	0,102	0,102	0,105	0,106
M ₀ W ₄ _I	0,098	0,098	0,101	0,102
M ₀ W ₄ _II	0,099	0,099	0,102	0,103
M ₀ W ₄ _III	0,099	0,099	0,102	0,103
M ₀ W ₅ _I	0,093	0,094	0,096	0,097
M ₀ W ₅ _II	0,093	0,093	0,096	0,095
M ₀ W ₅ _III	0,095	0,094	0,099	0,097
M ₀ W ₆ _I	0,086	0,086	0,090	0,089
M ₀ W ₆ _II	0,087	0,088	0,090	0,091
M ₀ W ₆ _III	0,087	0,087	0,090	0,090

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₀ W ₁	M ₀ W ₂	M ₀ W ₃	M ₀ W ₄	M ₀ W ₅	M ₀ W ₆
min _v 1GHz (m/ns)	0,127	0,117	0,100	0,098	0,093	0,086
max _v 1GHz (m/ns)	0,129	0,120	0,103	0,099	0,095	0,088
sr _v < 1GHz (m/ns)	0,128	0,119	0,102	0,098	0,093	0,087
V _v 1GHz (%)	0,690	0,926	1,020	0,349	0,965	0,622
min _v 2GHz (m/ns)	0,133	0,124	0,103	0,101	0,095	0,089
max _v 2GHz (m/ns)	0,137	0,127	0,107	0,103	0,099	0,091
sr _v 2GHz (m/ns)	0,135	0,125	0,105	0,102	0,097	0,090
V _v 2GHz (%)	0,837	0,919	1,160	0,596	1,063	0,606

V_v- koeficijent varijacije brzine EM vala

Prilog 5.2 Brzina EM vala u uzorcima izrađenim od mješavine M₁

Oznaka uzorka	V _{1GHz,u} (m/ns)	V _{1GHz,p} (m/ns)	V _{2GHz,u} (m/ns)	V _{2GHz,p} (m/ns)
M ₁ W ₁ _I	0,124	0,130	0,133	0,130
M ₁ W ₁ _II	0,130	0,131	0,135	0,135
M ₁ W ₁ _III	0,123	0,123	0,135	0,134
M ₁ W ₂ _I	0,117	0,118	0,121	0,118
M ₁ W ₂ _II	0,117	0,117	0,118	0,117
M ₁ W ₂ _III	0,116	0,116	0,114	0,116
M ₁ W ₃ _I	0,095	0,095	0,097	0,096
M ₁ W ₃ _II	0,093	0,093	0,095	0,092
M ₁ W ₃ _III	0,094	0,094	0,095	0,095
M ₁ W ₄ _I	0,091	0,091	0,093	0,092
M ₁ W ₄ _II	0,091	0,088	0,092	0,084
M ₁ W ₄ _III	0,092	0,092	0,095	0,094
M ₁ W ₅ _I	0,087	0,086	0,086	0,086
M ₁ W ₅ _II	0,084	0,086	0,085	0,085
M ₁ W ₅ _III	0,086	0,086	0,084	0,081
M ₁ W ₆ _I	0,081	0,081	0,078	0,078
M ₁ W ₆ _II	0,080	0,079	0,078	0,077
M ₁ W ₆ _III	0,080	0,082	0,078	0,078

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₁ W ₁	M ₁ W ₂	M ₁ W ₃	M ₁ W ₄	M ₁ W ₅	M ₁ W ₆
min _v 1GHz (m/ns)	0,123	0,116	0,093	0,088	0,084	0,079
max _v 1GHz (m/ns)	0,131	0,118	0,095	0,092	0,087	0,082
sr _v 1GHz (m/ns)	0,127	0,117	0,094	0,091	0,086	0,081
V _v 1GHz (%)	2,784	0,588	0,869	1,471	1,046	1,189
min _v 2GHz (m/ns)	0,130	0,114	0,092	0,084	0,081	0,077
max _v 2GHz (m/ns)	0,135	0,121	0,097	0,095	0,086	0,078
sr _v 2GHz (m/ns)	0,134	0,117	0,095	0,092	0,085	0,078
V _v 2GHz (%)	1,343	1,819	1,608	3,916	2,021	0,479

V_v- koeficijent varijacije brzine EM vala

Prilog 5.3 Brzina EM vala u uzorcima izrađenim od mješavine M₂

Oznaka uzorka	V _{1GHz,u} (m/ns)	V _{1GHz,p} (m/ns)	V _{2GHz,u} (m/ns)	V _{2GHz,p} (m/ns)
M ₂ W ₁ _I	0,129	0,128	0,128	0,128
M ₂ W ₁ _II	0,127	0,129	0,128	0,128
M ₂ W ₁ _III	0,127	0,127	0,126	0,125
M ₂ W ₂ _I	0,108	0,108	0,107	0,108
M ₂ W ₂ _II	0,109	0,108	0,114	0,108
M ₂ W ₂ _III	0,107	0,107	0,107	0,106
M ₂ W ₃ _I	0,102	0,102	0,101	0,102
M ₂ W ₃ _II	0,102	0,102	0,101	0,101
M ₂ W ₃ _III	0,102	0,102	0,102	0,102
M ₂ W ₄ _I	0,098	0,098	0,099	0,098
M ₂ W ₄ _II	0,095	0,096	0,098	0,098
M ₂ W ₄ _III	0,096	0,097	0,097	0,098
M ₂ W ₅ _I	0,085	0,084	0,086	0,086
M ₂ W ₅ _II	0,084	0,084	0,086	0,087
M ₂ W ₅ _III	0,087	0,086	0,088	0,087
M ₂ W ₆ _I	0,082	0,082	0,084	0,084
M ₂ W ₆ _II	0,082	0,082	0,082	0,082
M ₂ W ₆ _III	0,081	0,082	0,083	0,083

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₂ W ₁	M ₂ W ₂	M ₂ W ₃	M ₂ W ₄	M ₂ W ₅	M ₂ W ₆
min _v 1GHz (m/ns)	0,127	0,107	0,102	0,095	0,084	0,081
max _v 1GHz (m/ns)	0,129	0,109	0,102	0,097	0,087	0,082
sr _v 1GHz (m/ns)	0,128	0,108	0,102	0,096	0,085	0,082
V _v 1GHz (%)	0,702	0,637	0,000	1,148	1,358	0,455
min _v 2GHz (m/ns)	0,125	0,106	0,101	0,097	0,086	0,082
max _v 2GHz (m/ns)	0,128	0,114	0,102	0,099	0,088	0,084
sr _v 2GHz (m/ns)	0,127	0,108	0,102	0,098	0,087	0,083
V _v 2GHz (%)	0,954	2,423	0,493	0,589	0,860	0,984

V_v- koeficijent varijacije brzine EM vala

Prilog 5.4 Brzina EM vala u uzorcima izrađenim od mješavine M₃

Oznaka uzorka	V _{1GHz,u} (m/ns)	V _{1GHz,p} (m/ns)	V _{2GHz,u} (m/ns)	V _{2GHz,p} (m/ns)
M ₃ W ₁ _I	0,132	0,133	0,133	0,132
M ₃ W ₁ _II	0,128	0,132	0,126	0,126
M ₃ W ₁ _III	0,126	0,126	0,128	0,132
M ₃ W ₂ _I	0,121	0,122	0,122	0,121
M ₃ W ₂ _II	0,119	0,119	0,119	0,119
M ₃ W ₂ _III	0,121	0,122	0,121	0,120
M ₃ W ₃ _I	0,110	0,117	0,117	0,110
M ₃ W ₃ _II	0,110	0,110	0,110	0,110
M ₃ W ₃ _III	0,099	0,099	0,109	0,110
M ₃ W ₄ _I	0,101	0,100	0,100	0,101
M ₃ W ₄ _II	0,101	0,100	0,099	0,099
M ₃ W ₄ _III	0,098	0,098	0,098	0,098
M ₃ W ₅ _I	0,089	0,091	0,091	0,089
M ₃ W ₅ _II	0,089	0,089	0,089	0,089
M ₃ W ₅ _III	0,088	0,088	0,088	0,089
M ₃ W ₆ _I	0,084	0,083	0,083	0,084
M ₃ W ₆ _II	0,082	0,082	0,082	0,082
M ₃ W ₆ _III	0,082	0,082	0,080	0,082

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₃ W ₁	M ₃ W ₂	M ₃ W ₃	M ₃ W ₄	M ₃ W ₅	M ₃ W ₆
min _v 1GHz (m/ns)	0,126	0,119	0,099	0,098	0,088	0,082
max _v 1GHz (m/ns)	0,133	0,122	0,117	0,101	0,091	0,084
sr _v 1GHz (m/ns)	0,130	0,121	0,108	0,100	0,089	0,083
V _v 1GHz (%)	2,262	1,034	6,047	1,247	1,124	0,926
min _v 2GHz (m/ns)	0,126	0,119	0,109	0,098	0,088	0,080
max _v 2GHz (m/ns)	0,133	0,122	0,117	0,101	0,091	0,084
sr _v 2GHz (m/ns)	0,130	0,120	0,111	0,099	0,089	0,082
V _v 2GHz (%)	2,262	0,919	2,440	1,076	1,007	1,477

V_v- koeficijent varijacije brzine EM vala

Prilog 5.5 Brzina EM vala u uzorcima izrađenim od mješavine M₄

Oznaka uzorka	V _{1GHz,u} (m/ns)	V _{1GHz,p} (m/ns)	V _{2GHz,u} (m/ns)	V _{2GHz,p} (m/ns)
M ₄ W ₁ _I	0,130	0,133	0,138	0,136
M ₄ W ₁ _II	0,136	0,135	0,142	0,139
M ₄ W ₁ _III	0,134	0,133	0,139	0,139
M ₄ W ₂ _I	0,125	0,125	0,127	0,128
M ₄ W ₂ _II	0,124	0,123	0,126	0,126
M ₄ W ₂ _III	0,123	0,124	0,127	0,127
M ₄ W ₃ _I	0,105	0,105	0,105	0,106
M ₄ W ₃ _II	0,104	0,104	0,105	0,104
M ₄ W ₃ _III	0,103	0,102	0,103	0,104
M ₄ W ₄ _I	0,096	0,096	0,095	0,093
M ₄ W ₄ _II	0,095	0,095	0,092	0,093
M ₄ W ₄ _III	0,094	0,094	0,096	0,096
M ₄ W ₅ _I	0,090	0,090	0,088	0,089
M ₄ W ₅ _II	0,089	0,089	0,088	0,087
M ₄ W ₅ _III	0,088	0,089	0,087	0,086
M ₄ W ₆ _I	0,080	0,080	0,076	0,075
M ₄ W ₆ _II	0,081	0,080	0,076	0,075
M ₅ W ₆ _III	0,079	0,079	0,075	0,075

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₄ W ₁	M ₄ W ₂	M ₄ W ₃	M ₄ W ₄	M ₄ W ₅	M ₄ W ₆
min _v 1GHz (m/ns)	0,130	0,123	0,102	0,094	0,088	0,079
max _v 1GHz (m/ns)	0,136	0,125	0,105	0,095	0,090	0,081
sr _v 1GHz (m/ns)	0,134	0,124	0,104	0,095	0,089	0,080
V _v 1GHz (%)	1,418	0,658	1,028	0,859	0,771	0,861
min _v 2GHz (m/ns)	0,136	0,126	0,103	0,092	0,086	0,075
max _v 2GHz (m/ns)	0,142	0,128	0,106	0,096	0,089	0,076
sr _v 2GHz (m/ns)	0,139	0,127	0,105	0,094	0,087	0,075
V _v 2GHz (%)	1,276	0,542	0,916	1,670	1,065	0,626

V_v- koeficijent varijacije brzine EM vala

Prilog 5.6 Brzina EM vala u uzorcima izrađenim od mješavine M₅

Oznaka uzorka	V _{1GHz,u} (m/ns)	V _{1GHz,p} (m/ns)	V _{2GHz,u} (m/ns)	V _{2GHz,p} (m/ns)
M ₅ W ₁ _I	0,133	0,132	0,133	0,133
M ₅ W ₁ _II	0,133	0,134	0,134	0,134
M ₅ W ₁ _III	0,134	0,136	0,138	0,136
M ₅ W ₂ _I	0,125	0,122	0,130	0,130
M ₅ W ₂ _II	0,120	0,118	0,126	0,126
M ₅ W ₂ _III	0,125	0,127	0,132	0,130
M ₅ W ₃ _I	0,105	0,104	0,110	0,108
M ₅ W ₃ _II	0,107	0,111	0,115	0,113
M ₅ W ₃ _III	0,106	0,106	0,108	0,112
M ₅ W ₄ _I	0,092	0,092	0,095	0,095
M ₅ W ₄ _II	0,091	0,092	0,088	0,090
M ₅ W ₄ _III	0,093	0,092	0,093	0,092
M ₅ W ₅ _I	0,084	0,083	0,084	0,084
M ₅ W ₅ _II	0,082	0,083	0,079	0,080
M ₅ W ₅ _III	0,082	0,082	0,083	0,082
M ₅ W ₆ _I	0,075	0,075	0,077	0,076
M ₅ W ₆ _II	0,074	0,074	0,076	0,076
M ₅ W ₆ _III	0,075	0,075	0,074	0,075

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₅ W ₁	M ₅ W ₂	M ₅ W ₃	M ₅ W ₄	M ₅ W ₅	M ₅ W ₆
min _v 1GHz (m/ns)	0,132	0,118	0,104	0,091	0,082	0,074
max _v 1GHz (m/ns)	0,136	0,127	0,111	0,093	0,084	0,075
sr _v 1GHz (m/ns)	0,134	0,123	0,107	0,092	0,083	0,075
V _v 1GHz (%)	0,933	2,549	2,082	0,628	0,902	0,631
min _v 2GHz (m/ns)	0,133	0,126	0,108	0,088	0,079	0,074
max _v 2GHz (m/ns)	0,138	0,132	0,115	0,095	0,084	0,077
sr _v 2GHz (m/ns)	0,135	0,129	0,111	0,092	0,082	0,076
V _v 2GHz (%)	1,333	1,733	2,326	2,760	2,335	1,246

V_v- koeficijent varijacije brzine EM vala

Prilog 5.7 Rezultati deskriptivne statističke analize mješavina materijala u pogledu vrijednosti brzine EM valova

Mješavina materijala	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
min_v 1GHz (m/ns)	0,086	0,079	0,081	0,082	0,079	0,074
max_v 1GHz (m/ns)	0,129	0,131	0,129	0,133	0,136	0,136
sr_v 1GHz (m/ns)	0,105	0,099	0,100	0,105	0,104	0,102
V_v 1GHz (%)	0,014	0,017	0,016	0,017	0,019	0,021
Q1_v 1GHz (m/ns)	0,094	0,086	0,085	0,089	0,089	0,083
Mdn_v 1GHz (m/ns)	0,099	0,093	0,100	0,101	0,099	0,099
Q3_v 1GHz (m/ns)	0,118	0,117	0,108	0,121	0,124	0,123
min_v 2GHz (m/ns)	0,089	0,077	0,082	0,080	0,075	0,074
max_v 2GHz (m/ns)	0,137	0,135	0,128	0,133	0,142	0,138
sr_v 2GHz (m/ns)	0,109	0,100	0,101	0,105	0,105	0,104
V_v 2GHz (%)	0,016	0,020	0,015	0,017	0,022	0,023
Q1_v 2GHz (m/ns)	0,097	0,085	0,087	0,089	0,088	0,083
Mdn_v 2GHz (m/ns)	0,103	0,095	0,100	0,105	0,100	0,102
Q3_v 2GHz (m/ns)	0,125	0,117	0,107	0,120	0,127	0,130

V_v- koeficijent varijacije brzine EM vala

Prilog 6: Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Prilog 6.1 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M₀

Oznaka uzorka	rdp1GHz,u	rdp1GHz,p	rdp2GHz,u	rdp2GHz,p
M ₀ W ₁ _I	5,561	5,561	5,044	4,949
M ₀ W ₁ _II	5,561	5,561	5,044	4,949
M ₀ W ₁ _III	5,401	5,401	4,899	4,807
M ₀ W ₂ _I	6,367	6,455	5,775	5,745
M ₀ W ₂ _II	6,241	6,241	5,661	5,555
M ₀ W ₂ _III	6,455	6,566	5,855	5,843
M ₀ W ₃ _I	8,472	8,556	7,985	7,911
M ₀ W ₃ _II	8,988	8,810	8,472	8,146
M ₀ W ₃ _III	8,571	8,571	8,079	7,925
M ₀ W ₄ _I	9,358	9,358	8,821	8,652
M ₀ W ₄ _II	9,213	9,213	8,684	8,518
M ₀ W ₄ _III	9,230	9,230	8,700	8,533
M ₀ W ₅ _I	10,442	10,172	9,655	9,588
M ₀ W ₅ _II	10,480	10,480	9,690	9,879
M ₀ W ₅ _III	9,959	10,172	9,207	9,588
M ₀ W ₆ _I	12,034	12,034	11,126	11,343
M ₀ W ₆ _II	11,970	11,606	11,067	10,940
M ₀ W ₆ _III	11,874	11,874	10,978	11,193

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₀ W ₁	M ₀ W ₂	M ₀ W ₃	M ₀ W ₄	M ₀ W ₅	M ₀ W ₆
min _{rdp} 1GHz	5,401	6,241	8,472	9,213	9,959	11,606
max _{rdp} 1GHz	5,561	6,566	8,988	10,442	10,480	12,034
sr _{rdp} 1GHz	5,508	6,388	8,661	9,267	10,284	11,899
V _{rdp} 1GHz (%)	1,369	1,851	2,065	0,700	1,918	1,232
min _{rdp} 2GHz	4,807	5,555	7,911	8,518	9,207	10,940
max _{rdp} 2GHz	5,044	5,855	8,472	8,821	9,879	11,343
sr _{rdp} 2GHz	4,949	5,739	8,086	8,651	9,601	11,108
V _{rdp} 2GHz (%)	1,666	1,822	2,364	1,193	2,097	1,218

V_{rdp}- koeficijent varijacije vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Prilog 6.2 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M₁

Oznaka uzorka	rdp1GHz,u	rdp1GHz,p	rdp2GHz,u	rdp2GHz,p
M ₁ W ₁ _I	5,845	5,318	5,081	5,318
M ₁ W ₁ _II	5,318	5,237	4,931	4,931
M ₁ W ₁ _III	5,941	5,941	4,931	5,005
M ₁ W ₂ _I	6,566	6,455	6,139	6,455
M ₁ W ₂ _II	6,566	6,566	6,455	6,566
M ₁ W ₂ _III	6,679	6,679	6,916	6,679
M ₁ W ₃ _I	9,959	9,959	9,552	9,752
M ₁ W ₃ _II	10,391	10,391	9,959	10,619
M ₁ W ₃ _III	10,172	10,172	9,959	9,959
M ₁ W ₄ _I	10,853	10,853	10,391	10,619
M ₁ W ₄ _II	10,853	11,606	10,619	12,737
M ₁ W ₄ _III	10,619	10,619	9,959	10,172
M ₁ W ₅ _I	11,874	12,152	12,152	12,152
M ₁ W ₅ _II	12,737	12,152	12,440	12,440
M ₁ W ₅ _III	12,152	12,152	12,737	13,698
M ₁ W ₆ _I	13,698	13,698	14,772	14,772
M ₁ W ₆ _II	14,043	14,401	14,772	15,159
M ₁ W ₆ _III	14,043	13,366	14,772	14,772

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₁ W ₁	M ₁ W ₂	M ₁ W ₃	M ₁ W ₄	M ₁ W ₅	M ₁ W ₆
min _{rdp} 1GHz	5,237	6,455	9,959	10,619	11,874	13,366
max _{rdp} 1GHz	5,941	6,679	10,391	12,152	12,737	14,401
s _{rdp} 1GHz	5,600	6,585	10,174	10,775	12,203	13,875
V _{rdp} 1GHz (%)	5,565	1,174	1,737	3,085	2,127	2,379
min _{rdp} 2GHz	4,931	6,139	9,552	9,959	12,152	14,772
max _{rdp} 2GHz	5,318	6,916	10,619	12,737	13,698	15,159
s _{rdp} 2GHz	5,033	6,535	9,966	10,749	12,603	14,837
V _{rdp} 2GHz (%)	2,754	3,625	3,285	8,555	4,197	0,970

V_{rdp}- koeficijent varijacije vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Prilog 6.3 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M₂

Oznaka uzorka	rdp1GHz,u	rdp1GHz,p	rdp2GHz,u	rdp2GHz,p
M ₂ W ₁ _I	5,401	5,486	5,486	5,486
M ₂ W ₁ _II	5,572	5,401	5,486	5,486
M ₂ W ₁ _III	5,572	5,572	5,661	5,752
M ₂ W ₂ _I	7,705	7,705	7,850	7,705
M ₂ W ₂ _II	7,565	7,705	6,916	7,705
M ₂ W ₂ _III	7,850	7,850	7,850	7,999
M ₂ W ₃ _I	8,639	8,639	8,810	8,639
M ₂ W ₃ _II	8,639	8,639	8,810	8,810
M ₂ W ₃ _III	8,639	8,639	8,639	8,639
M ₂ W ₄ _I	9,358	9,358	9,170	9,358
M ₂ W ₄ _II	9,959	9,752	9,358	9,358
M ₂ W ₄ _III	9,752	9,552	9,552	9,358
M ₂ W ₅ _I	12,440	12,737	12,152	12,152
M ₂ W ₅ _II	12,737	12,737	12,152	11,874
M ₂ W ₅ _III	11,874	12,152	11,606	11,874
M ₂ W ₆ _I	13,366	13,366	12,737	12,737
M ₂ W ₆ _II	13,366	13,366	13,366	13,366
M ₂ W ₆ _III	13,698	13,366	13,046	13,046

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₂ W ₁	M ₂ W ₂	M ₂ W ₃	M ₂ W ₄	M ₂ W ₅	M ₂ W ₆
min _{rdp} 1GHz	5,401	7,565	8,639	9,358	11,874	13,366
max _{rdp} 1GHz	5,572	7,850	8,639	12,737	12,737	13,698
sr _{rdp} 1GHz	5,501	7,730	8,639	9,690	12,446	13,422
V _{rdp} 1GHz (%)	1,399	1,272	0,000	2,274	2,682	0,922
min _{rdp} 2GHz	5,486	6,916	8,639	9,170	11,606	12,737
max _{rdp} 2GHz	5,752	7,999	8,810	9,552	12,152	13,366
sr _{rdp} 2GHz	5,559	7,671	8,725	9,359	11,968	13,050
V _{rdp} 2GHz (%)	1,933	4,592	0,985	1,178	1,706	1,968

V_{rdp}- koeficijent varijacije vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Prilog 6.4 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M₃

Oznaka uzorka	rdp1GHz,u	rdp1GHz,p	rdp2GHz,u	rdp2GHz,p
M ₃ W ₁ _I	5,158	5,081	5,081	5,158
M ₃ W ₁ _II	5,486	5,158	5,661	5,661
M ₃ W ₁ _III	5,661	5,661	5,486	5,158
M ₃ W ₂ _I	6,139	6,038	6,038	6,139
M ₃ W ₂ _II	6,347	6,347	6,347	6,347
M ₃ W ₂ _III	6,139	6,038	6,139	6,241
M ₃ W ₃ _I	7,428	6,566	6,566	7,428
M ₃ W ₃ _II	7,428	7,428	7,428	7,428
M ₃ W ₃ _III	9,170	9,170	7,565	7,428
M ₃ W ₄ _I	8,810	8,988	8,988	8,810
M ₃ W ₄ _II	8,810	8,988	9,170	9,170
M ₃ W ₄ _III	9,358	9,358	9,358	9,358
M ₃ W ₅ _I	11,346	10,853	10,853	11,346
M ₃ W ₅ _II	11,346	11,346	11,346	11,346
M ₃ W ₅ _III	11,606	11,606	11,606	11,346
M ₃ W ₆ _I	12,737	13,046	13,046	12,737
M ₃ W ₆ _II	13,366	13,366	13,366	13,366
M ₃ W ₆ _III	13,366	13,366	14,043	13,366

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₃ W ₁	M ₃ W ₂	M ₃ W ₃	M ₃ W ₄	M ₃ W ₅	M ₃ W ₆
min _{rdp} 1GHz	5,081	6,038	6,566	8,810	10,853	12,737
max _{rdp} 1GHz	5,661	6,347	9,170	11,346	11,606	13,366
sr _{rdp} 1GHz	5,367	6,175	7,865	8,993	11,351	13,208
V _{rdp} 1GHz (%)	4,539	2,080	12,359	2,537	2,210	1,823
min _{rdp} 2GHz	5,081	6,038	6,566	8,810	10,853	12,737
max _{rdp} 2GHz	5,661	6,347	7,565	9,358	11,606	14,043
sr _{rdp} 2GHz	5,367	6,208	7,307	9,142	11,307	13,321
V _{rdp} 2GHz (%)	4,539	1,836	4,589	2,136	1,982	2,977

V_{rdp}- koeficijent varijacije vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Prilog 6.5 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M₄

Oznaka uzorka	rdp1GHz,u	rdp1GHz,p	rdp2GHz,u	rdp2GHz,p
M ₄ W ₁ _I	5,318	5,081	4,719	4,859
M ₄ W ₁ _II	4,859	4,931	4,457	4,652
M ₄ W ₁ _III	5,005	5,081	4,652	4,652
M ₄ W ₂ _I	5,752	5,752	5,572	5,486
M ₄ W ₂ _II	5,845	5,941	5,661	5,661
M ₄ W ₂ _III	5,941	5,845	5,572	5,572
M ₄ W ₃ _I	8,152	8,152	8,152	7,999
M ₄ W ₃ _II	8,309	8,309	8,152	8,309
M ₄ W ₃ _III	8,472	8,639	8,472	8,309
M ₄ W ₄ _I	9,752	9,752	9,959	10,391
M ₄ W ₄ _II	9,959	9,959	10,619	10,391
M ₄ W ₄ _III	10,172	10,172	9,752	9,752
M ₄ W ₅ _I	11,096	11,096	11,606	11,372
M ₄ W ₅ _II	11,346	11,346	11,606	11,874
M ₄ W ₅ _III	11,606	11,346	11,874	12,152
M ₄ W ₆ _I	14,043	14,043	15,560	15,978
M ₄ W ₆ _II	13,698	14,043	15,560	15,978
M ₅ W ₆ _III	14,401	14,401	15,978	15,978

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₄ W ₁	M ₄ W ₂	M ₄ W ₃	M ₄ W ₄	M ₄ W ₅	M ₄ W ₆
min _{rdp} 1GHz	4,859	5,752	8,152	9,752	11,096	13,698
max _{rdp} 1GHz	5,318	5,941	8,639	11,096	11,606	14,401
sr _{rdp} 1GHz	5,046	5,846	8,339	9,961	11,306	14,105
V _{rdp} 1GHz (%)	2,873	1,317	2,071	1,719	1,546	1,717
min _{rdp} 2GHz	4,457	5,486	7,999	9,752	11,372	15,560
max _{rdp} 2GHz	4,859	5,661	8,472	10,619	12,152	15,978
sr _{rdp} 2GHz	4,665	5,587	8,232	10,144	11,747	15,839
V _{rdp} 2GHz (%)	2,542	1,082	1,833	3,341	2,133	1,243

V_{rdp}- koeficijent varijacije vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Prilog 6.6 Uzorci izrađeni od mješavine M₅

Oznaka uzorka	rdp _{1GHz,u}	rdp _{1GHz,p}	rdp _{2GHz,u}	rdp _{2GHz,p}
M ₅ W ₁ _I	5,081	5,158	5,081	5,081
M ₅ W ₁ _II	5,081	5,005	5,005	5,005
M ₅ W ₁ _III	5,005	4,859	4,719	4,859
M ₅ W ₂ _I	5,752	6,038	5,318	5,318
M ₅ W ₂ _II	6,241	6,455	5,661	5,661
M ₅ W ₂ _III	5,752	5,572	5,158	5,318
M ₅ W ₃ _I	8,152	8,309	7,428	7,705
M ₅ W ₃ _II	7,850	7,294	6,796	7,039
M ₅ W ₃ _III	7,999	7,999	7,705	7,165
M ₅ W ₄ _I	10,619	10,619	9,959	9,959
M ₅ W ₄ _II	10,853	10,619	11,606	11,096
M ₅ W ₄ _III	10,391	10,619	10,391	10,619
M ₅ W ₅ _I	12,737	13,046	12,737	12,737
M ₅ W ₅ _II	13,366	13,046	14,401	14,043
M ₅ W ₅ _III	13,366	13,366	13,046	13,366
M ₅ W ₆ _I	15,978	15,978	15,159	15,560
M ₅ W ₆ _II	16,413	16,413	15,560	15,560
M ₅ W ₆ _III	15,978	15,978	16,413	15,978

u- uzdužni smjer; p- poprečni smjer

- statistička obrada

Oznaka uzorka	M ₅ W ₁	M ₅ W ₂	M ₅ W ₃	M ₅ W ₄	M ₅ W ₅	M ₅ W ₆
min _{rdp} 1GHz	4,859	5,572	7,294	10,391	12,737	15,978
max _{rdp} 1GHz	5,158	6,455	8,309	13,046	13,366	16,413
sr _{rdp} 1GHz	5,032	5,968	7,934	10,621	13,155	16,123
V _{rdp} 1GHz (%)	1,850	5,148	4,028	1,255	1,788	1,271
min _{rdp} 2GHz	4,719	5,158	6,796	9,959	12,737	15,159
max _{rdp} 2GHz	5,081	5,661	7,705	11,606	14,401	16,413
sr _{rdp} 2GHz	4,958	5,406	7,306	10,605	13,389	15,705
V _{rdp} 2GHz (%)	2,622	3,500	4,626	5,611	4,742	2,516

V_{rdp}- koeficijent varijacije vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Prilog 6.7 Rezultati deskriptivne statističke analize mješavina materijala u pogledu vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Mješavina materijala	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
min_{rdp} 1GHz	5,401	5,237	5,401	5,081	4,859	4,859
max_{rdp} 1GHz	12,034	14,401	13,698	13,366	14,401	16,413
sr_{rdp} 1GHz	8,668	9,890	9,560	8,836	9,100	9,805
V_{rdp} 1GHz (%)	2,219	2,988	2,750	2,831	3,165	3,996
Q1_{rdp} 1GHz	6,433	6,566	7,705	6,139	5,845	5,967
Mdn_{rdp} 1GHz	9,100	10,505	8,998	8,899	9,195	9,350
Q3_{rdp} 1GHz	10,239	12,152	12,514	11,346	11,346	13,126
min_{rdp} 2GHz	4,807	4,931	5,486	5,081	4,457	4,719
max_{rdp} 2GHz	11,343	15,159	13,366	14,043	15,978	16,413
sr_{rdp} 2GHz	8,022	9,954	9,389	8,776	9,369	9,561
V_{rdp} 2GHz (%)	2,159	3,432	2,565	2,869	3,842	4,101
Q1_{rdp} 2GHz	5,768	6,538	7,814	6,216	5,572	5,318
Mdn_{rdp} 2GHz	8,495	10,065	8,990	8,188	9,112	8,832
Q3_{rdp} 2GHz	9,604	12,514	11,944	11,346	11,673	13,126

V_{rdp}- koeficijent varijacije vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti

Prilog 7 Rezultati terenskih istražnih radova

Prilog 7.1 Prikaz lokacija

- Lokacija 13

Lokacija 1 nalazila se u Zagrebačkoj ulici na stacionaži km 0+180. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 10 cm i MNS-a debljine 47 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 57,5 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,1%.

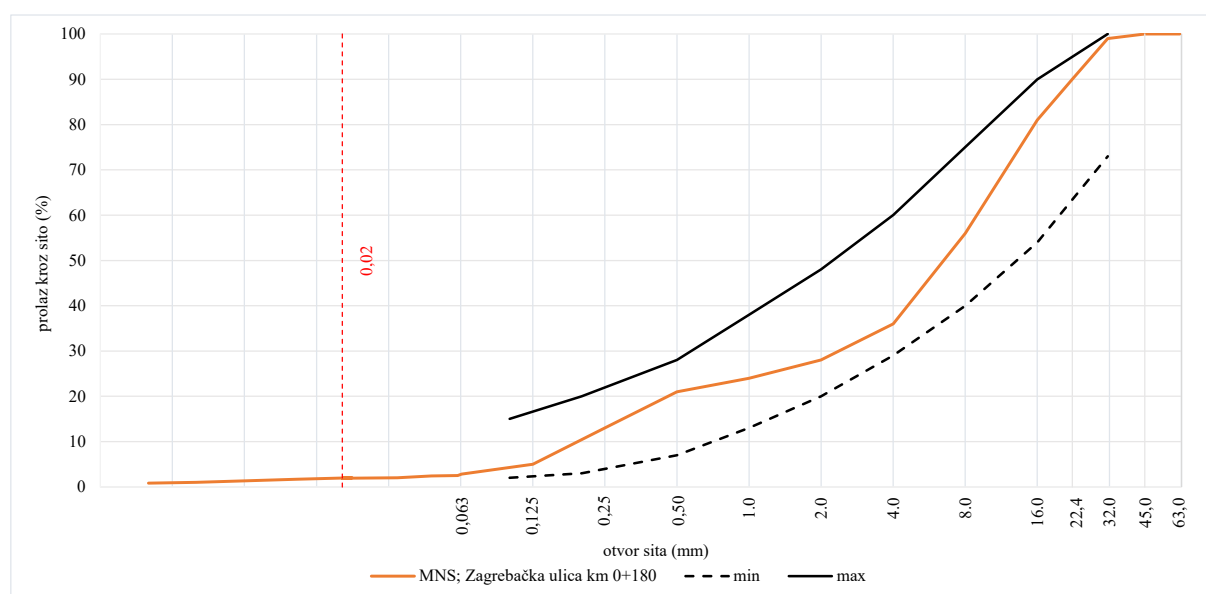


MNS na lokaciji 1: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 1

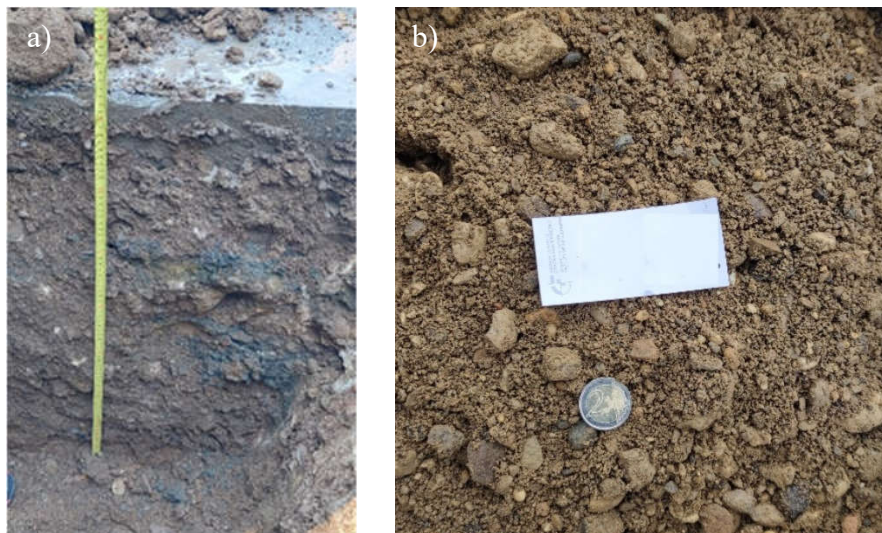
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
2,8	5	13	21	24	28	36	56	81	90	99	100	100

Promjer zrna (mm)								
0,0607	0,0472	0,0339	0,0220	0,0130	0,0077	0,0049	0,0031	0,0015
Udio zrna (%)								
2,5	2,4	2,0	2,0	1,7	1,3	1,0	0,8	0,4



- Lokacija 2

Lokacija 2 nalazila se u Zagrebačkoj ulici na stacionaži km 0+510. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 6 i 7 cm te MNS-a debljine 50 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 63,3 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

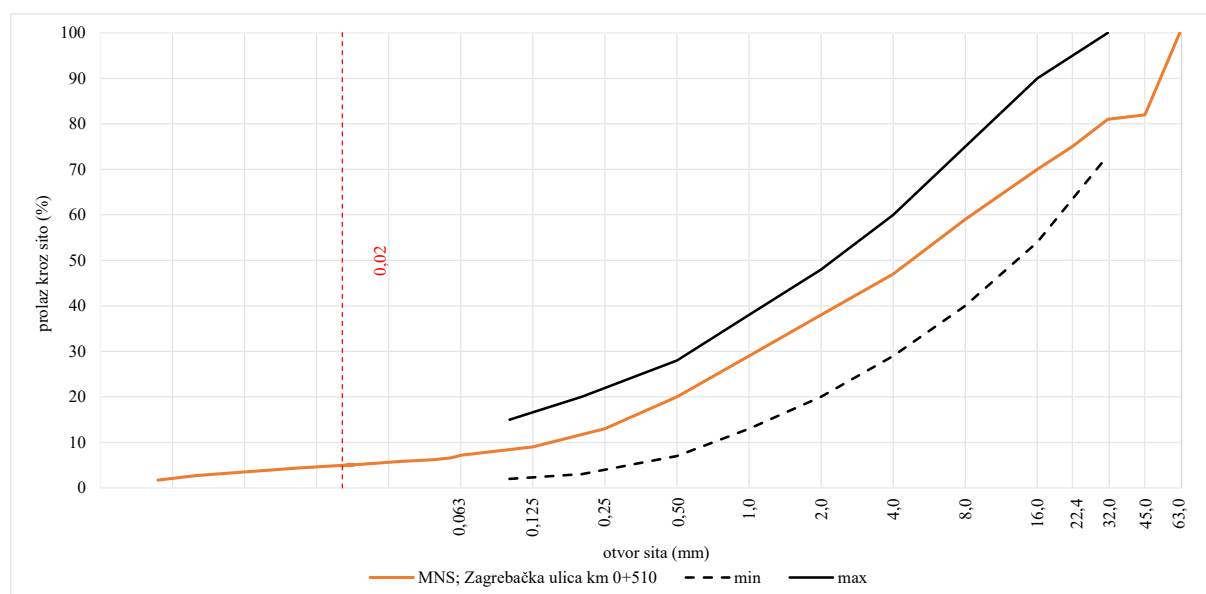


MNS na lokaciji 2: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 2

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
7,2	9	13	20	29	38	47	59	70	75	81	82	100

Promjer zrna (mm)									
0,0569	0,0481	0,0345	0,0224	0,0132	0,0079	0,0049	0,0034	0,0016	
Udio zrna (%)									
6,6	6,2	5,8	5,1	4,4	3,5	2,7	1,7	1,0	



- Lokacija 3

Lokacija 3 nalazila se u Zagrebačkoj ulici na stacionaži km 0+850. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 11 cm i MNS-a debljine 41 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 63,3 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

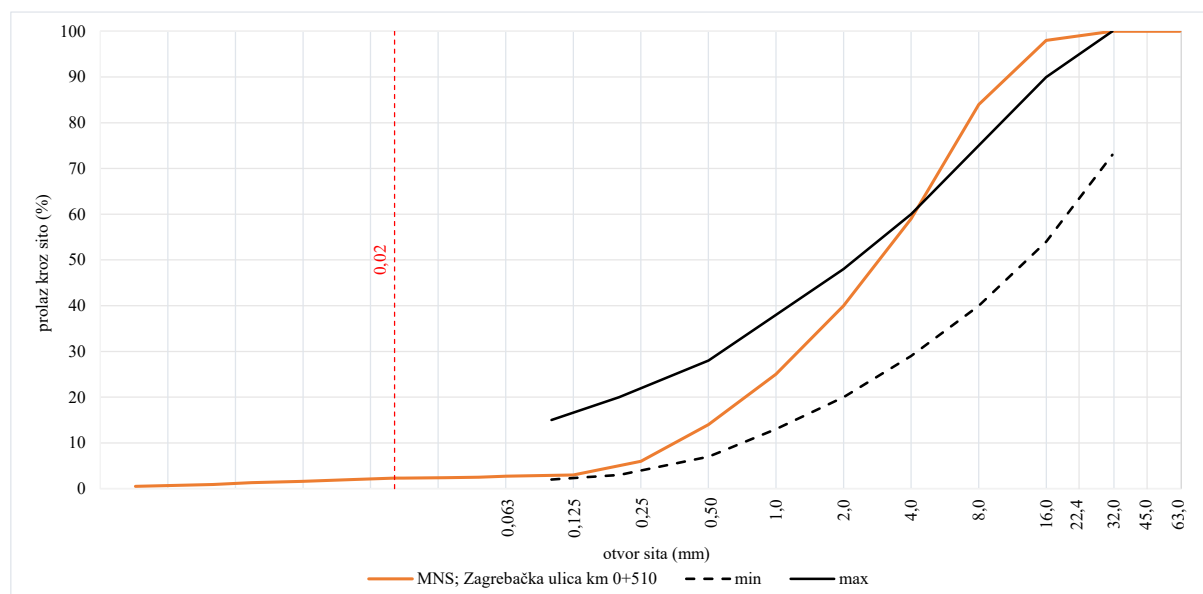


MNS na lokaciji 3: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 3

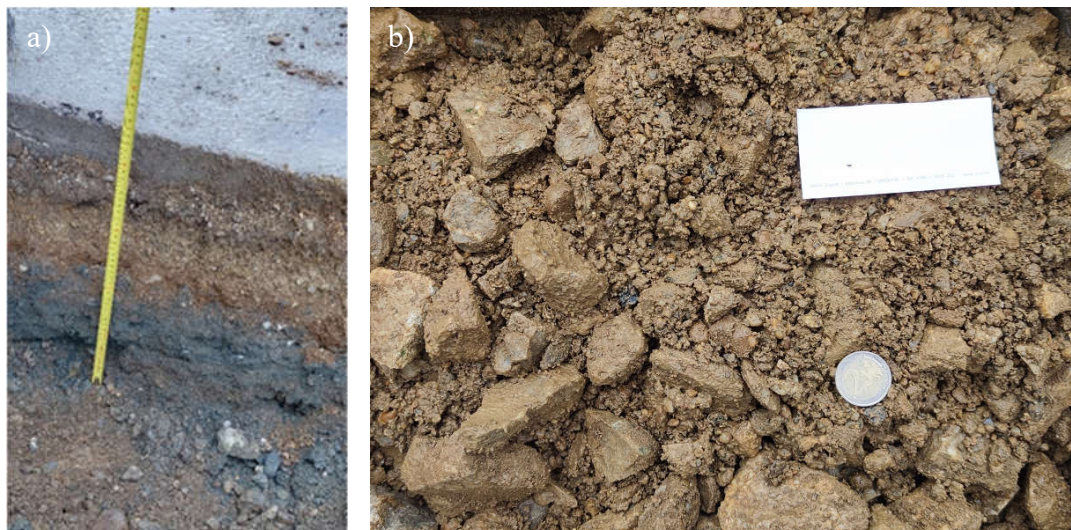
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
2,7	3	6	14	25	40	59	84	98	99	100	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0473	0,0336	0,0220	0,0130	0,0077	0,0046	0,0031	0,0014
Udio zrna (%)							
2,5	2,4	2,3	2,0	1,6	1,3	0,9	0,5



- Lokacija 4

Lokacija 4 nalazila se u Zagrebačkoj ulici na stacionaži km 1+050. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 6 i 7 cm te MNS-a debljine 58 cm. MNS se sastojao od drobljenog kamena te pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 63,3 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

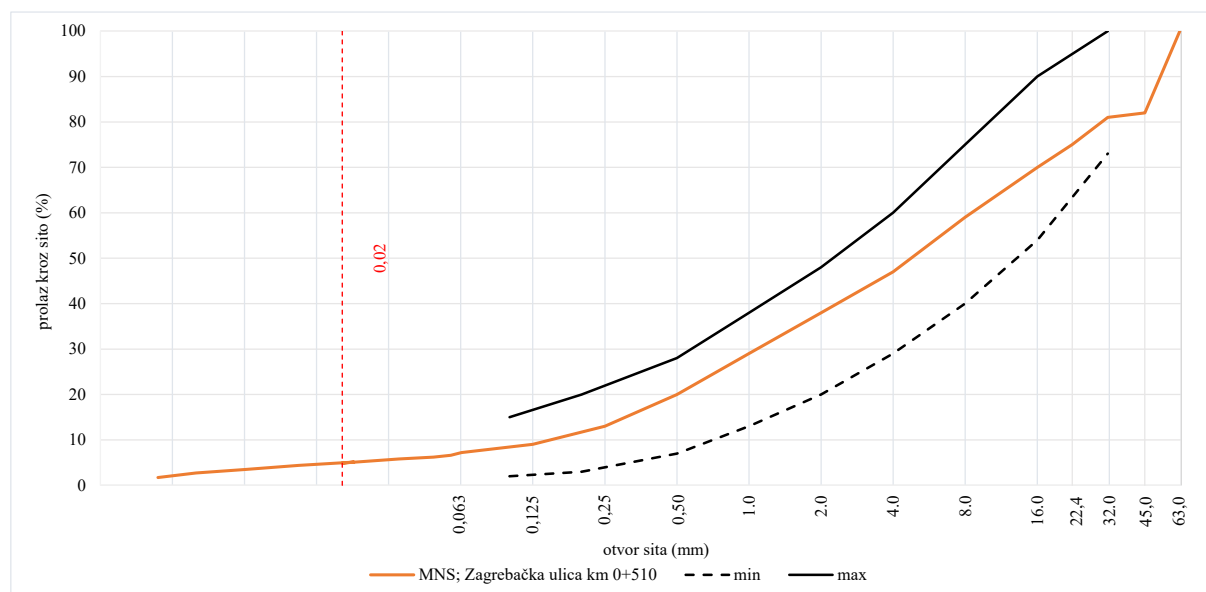


MNS na lokaciji 4: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 4

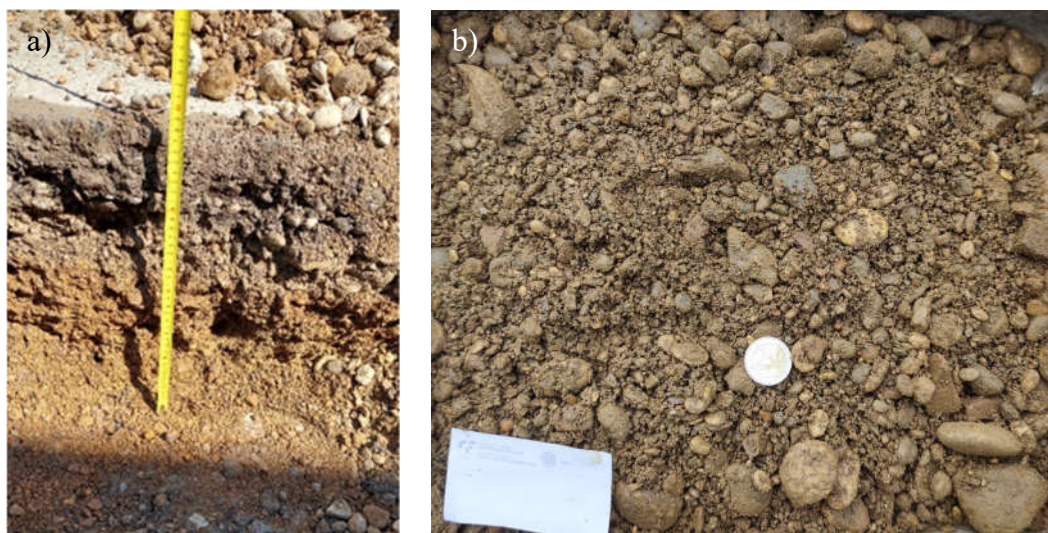
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
2,9	4	6	11	15	19	27	38	48	56	67	95	100

Promjer zrna (mm)							
0,0473	0,0336	0,0220	0,0130	0,0077	0,0046	0,0031	0,0014
Udio zrna (%)							
2,3	2,1	1,9	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6



• Lokacija 5

Lokacija 5 nalazila se u Ulici Dragutina Careka na stacionaži km 0+210. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 7 i 8 cm te MNS-a debljine 30 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 45,5 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,2%.

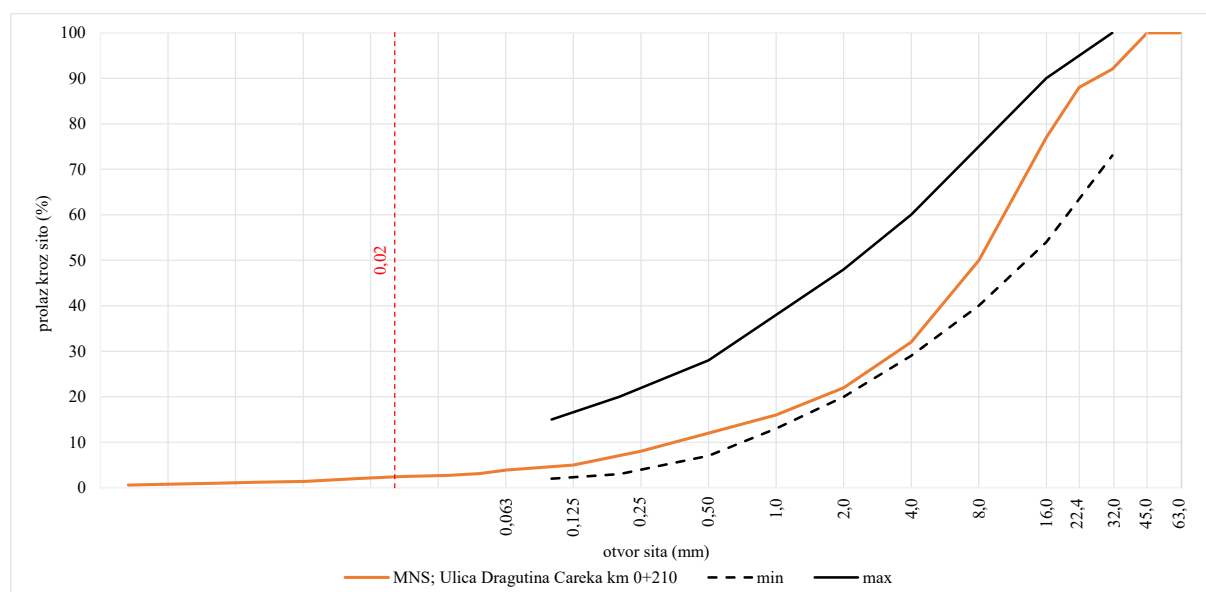


MNS na lokaciji 5: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 5

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
3,9	5	8	12	16	22	32	50	77	88	92	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0480	0,0348	0,0226	0,0134	0,008	0,005	0,0032	0,0013
Udio zrna (%)							
3,1	2,7	2,5	2,0	1,4	1,2	1,0	0,6



- Lokacija 6

Lokacija 6 nalazila se u Ulici Ante Kovačića na stacionaži km 0+210. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 6 i 7 cm te MNS-a debljine 36 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 76,1 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,1%.

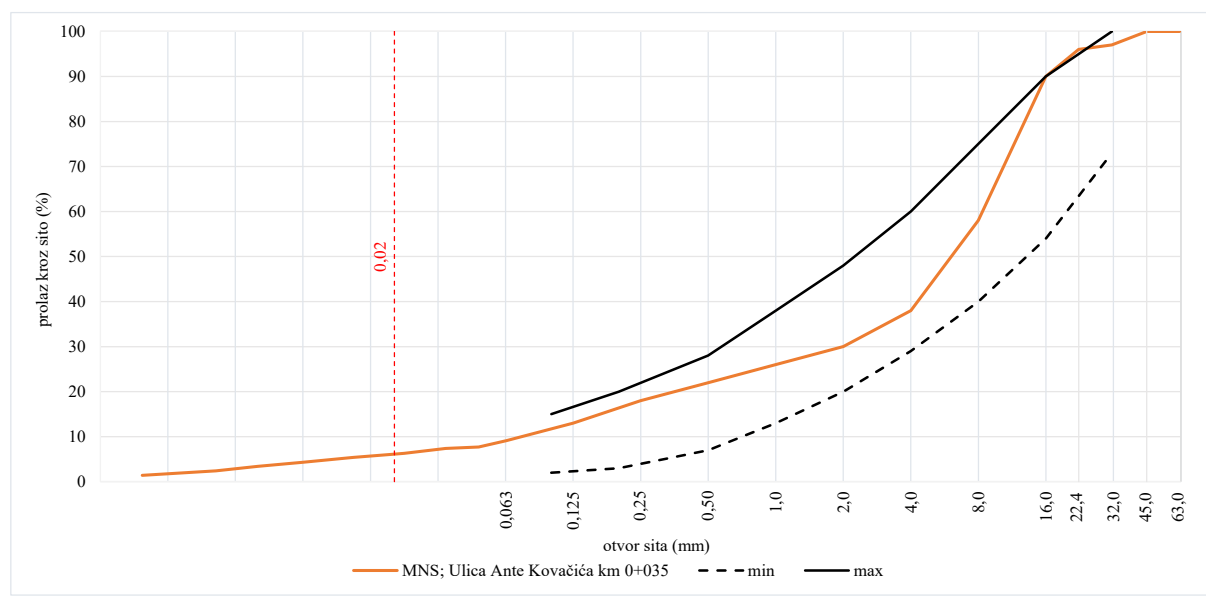


MNS na lokaciji 6: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 6

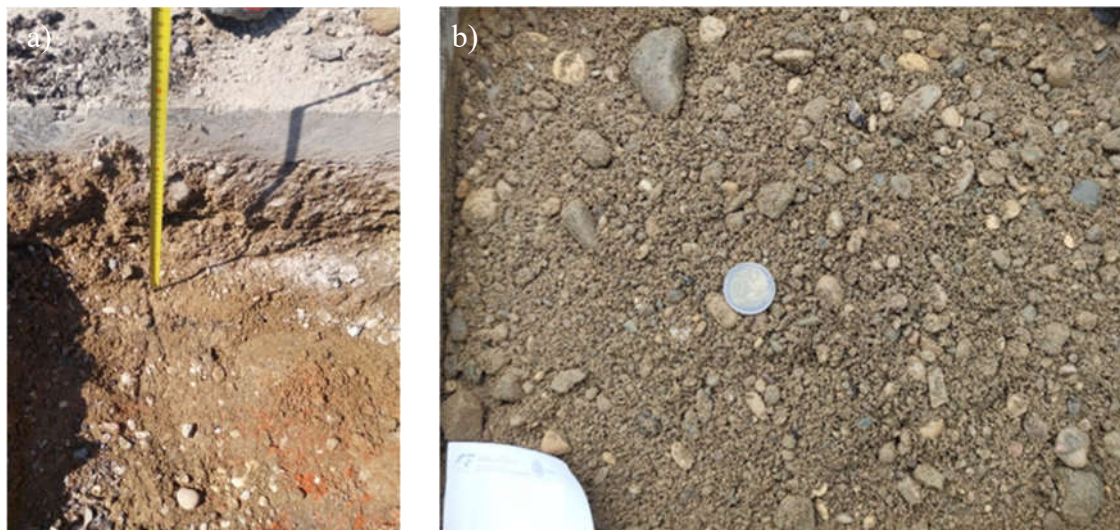
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
9,1	13	18	22	26	30	38	58	90	96	97	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0474	0,0338	0,0221	0,0131	0,0078	0,0049	0,0032	0,0015
Udio zrna (%)							
7,7	7,4	6,3	5,4	4,3	3,4	2,4	1,4



• Lokacija 7

Lokacija 7 nalazila se u Ulici Ive Lole Ribara na stacionaži km 0+090. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 6 i 8 cm te MNS-a debljine 26 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 60,6 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 99,9%.

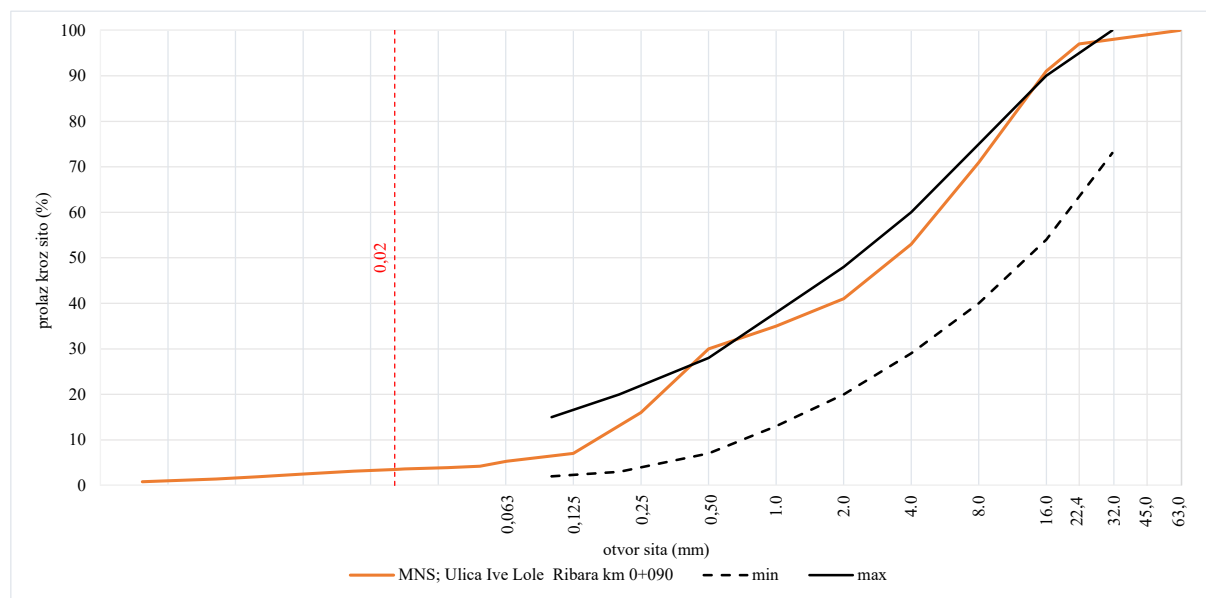


MNS na lokaciji 7: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 7

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
5.3	7	16	30	35	41	53	71	91	97	100	100	100

Promjer zrna (mm)							
0.0480	0.0344	0.0221	0.0131	0.0078	0.0049	0.0032	0.0015
Udio zrna (%)							
4.2	3.9	3.6	3.1	2.5	1.9	1.4	0.8



- Lokacija 8

Lokacija 8 nalazila se u Ulici Ive Maline na stacionaži km 0+110. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 4 i 5 cm te MNS-a debljine 16 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 53,3 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

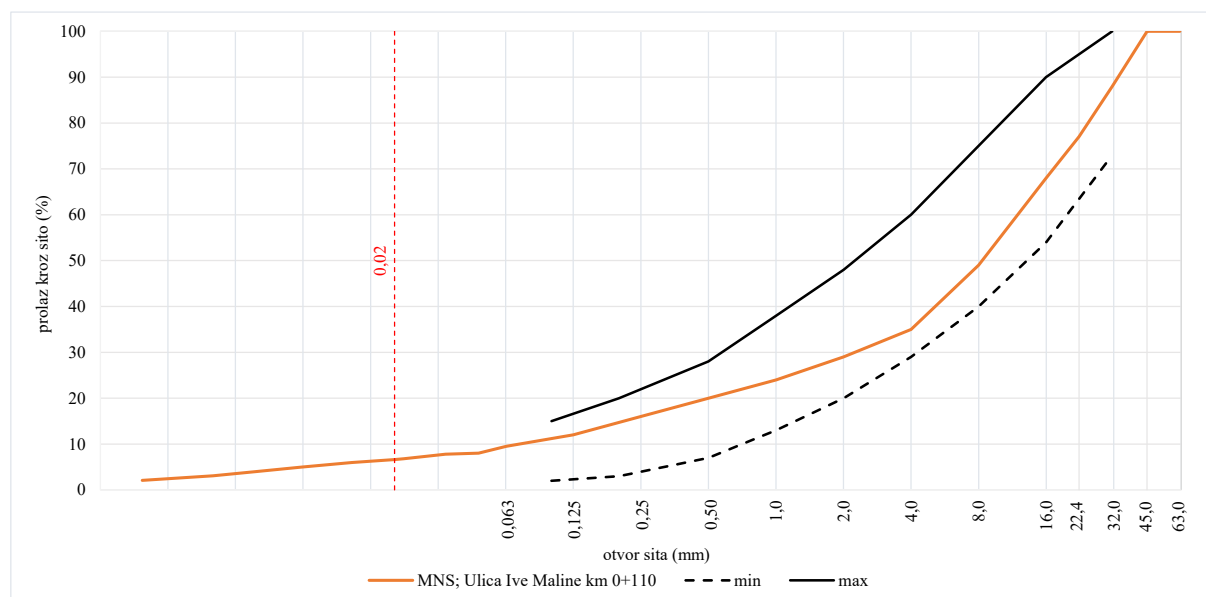


MNS na lokaciji 8: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 8

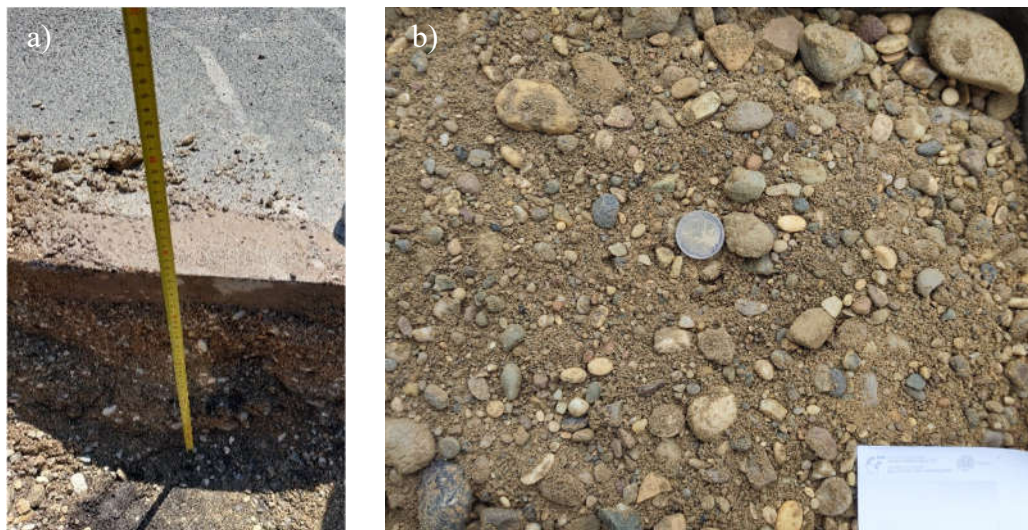
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
9,5	12	16	20	24	29	35	49	68	77	88	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0473	0,0337	0,0219	0,0129	0,0077	0,0048	0,0031	0,0015
Udio zrna (%)							
8,0	7,8	6,8	6,0	5,0	4,0	3,1	2,1



• Lokacija 9

Lokacija 9 nalazila se u Ulici Ive Maline na stacionaži km 0+600. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 4 i 5 cm te MNS-a debljine 23 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 51,7 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

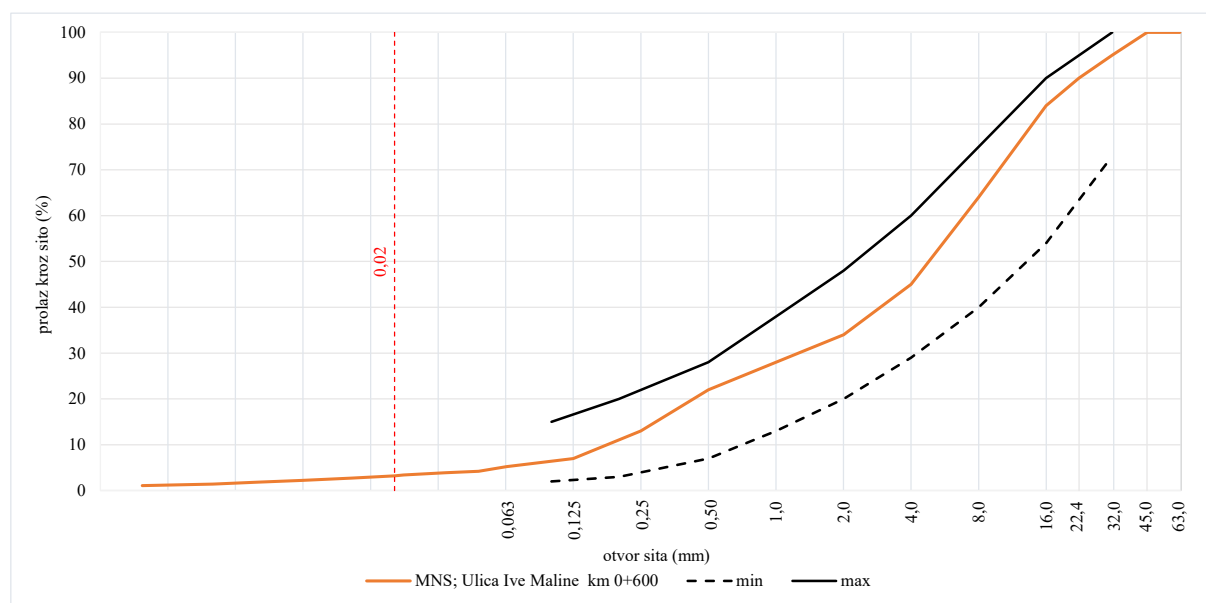


MNS na lokaciji 9: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 9

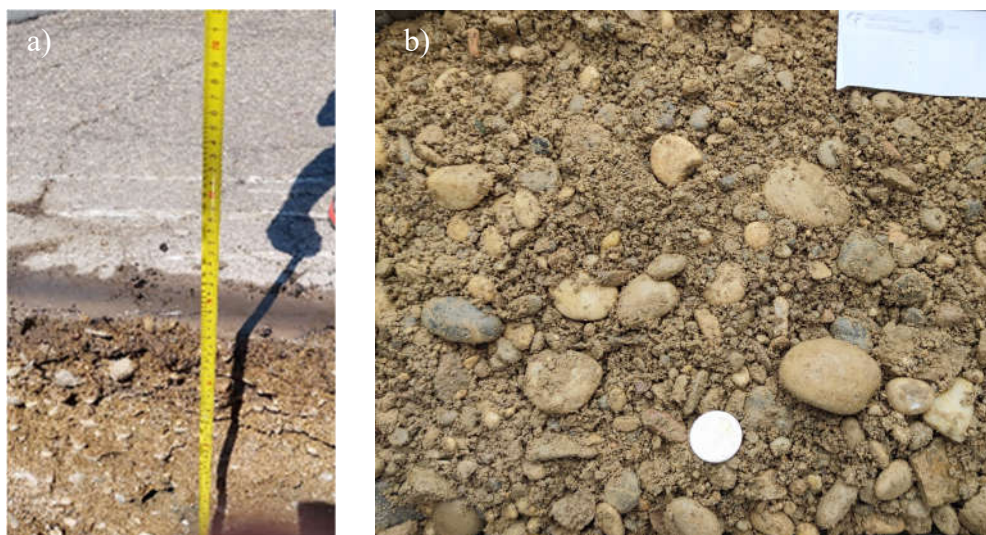
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
5,2	7	13	22	28	34	45	64	84	90	95	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0473	0,0337	0,0219	0,0129	0,0077	0,0048	0,0031	0,0015
Udio zrna (%)							
4,2	3,9	3,4	2,7	2,2	1,8	1,4	1,1



- Lokacija 10

Lokacija 10 nalazila se u Ulici Ive Maline na stacionaži km 1+100. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 5 i 6 cm te MNS-a debljine 33 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 43,2 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

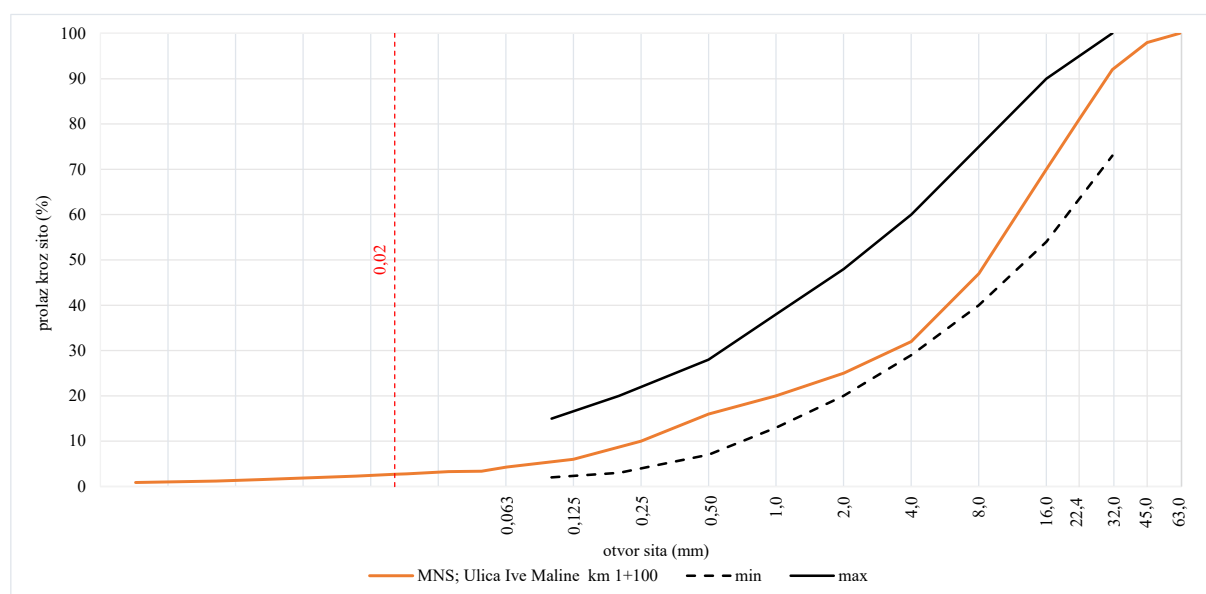


MNS na lokaciji 10: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 10

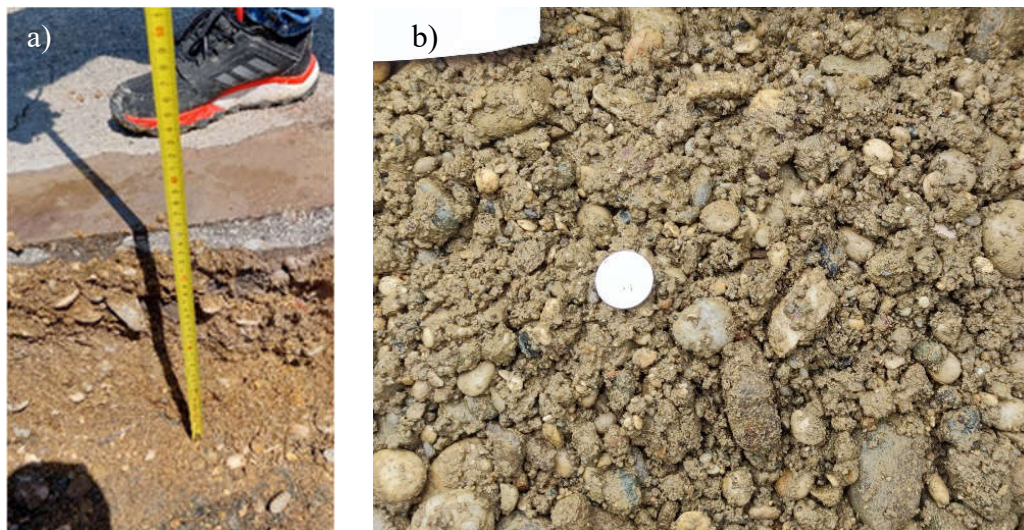
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
4,3	6	10	16	20	25	32	47	70	81	92	98	100

Promjer zrna (mm)							
0,0487	0,0348	0,0226	0,0135	0,0080	0,0050	0,0032	0,0014
Udio zrna (%)							
3,4	3,3	2,8	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9



- Lokacija 11

Lokacija 11 nalazila se u Ulici Ive Maline na stacionaži km 1+600. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 5 i 7 cm te MNS-a debljine 25 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 54,6 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

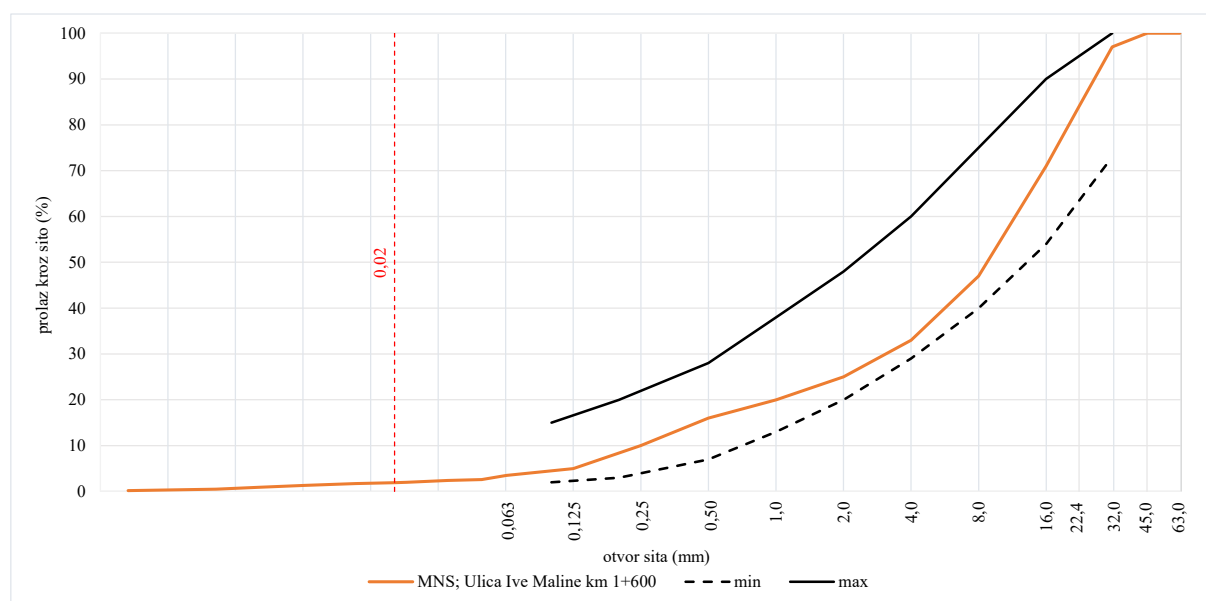


MNS na lokaciji 11: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 11

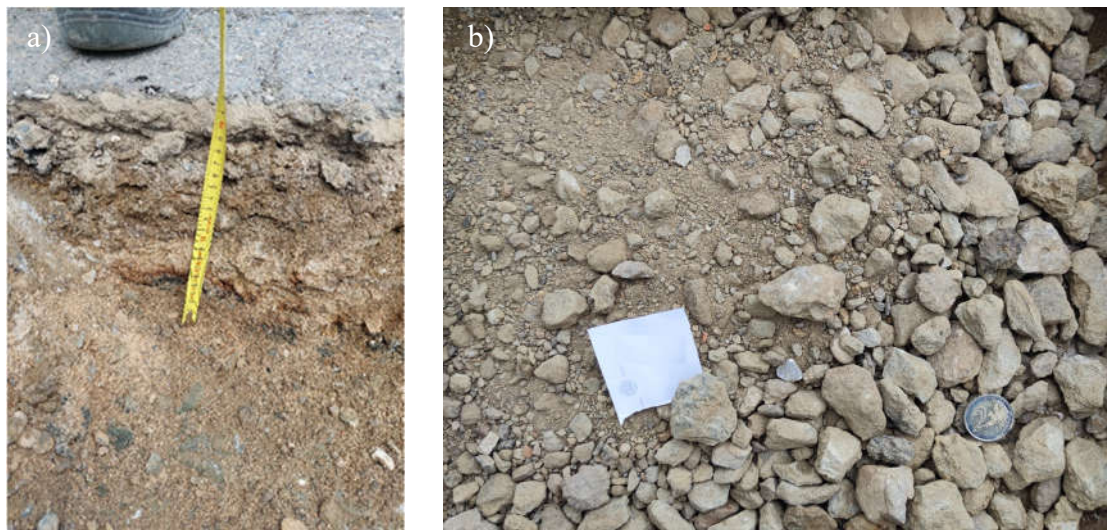
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
3,5	5	10	16	20	25	33	47	71	84	97	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0488	0,0345	0,0227	0,0134	0,0079	0,0050	0,0032	0,0013
Udio zrna (%)							
2,6	2,4	2,0	1,7	1,3	0,9	0,5	0,2



- Lokacija 12

Lokacija 12 nalazila se u Ulici Vjekoslava Klaića na stacionaži km 0+200. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 6 cm te MNS-a debljine 12 cm. MNS se sastojao od drobljenog kamenog materijala. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 37,7 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 99,8%.

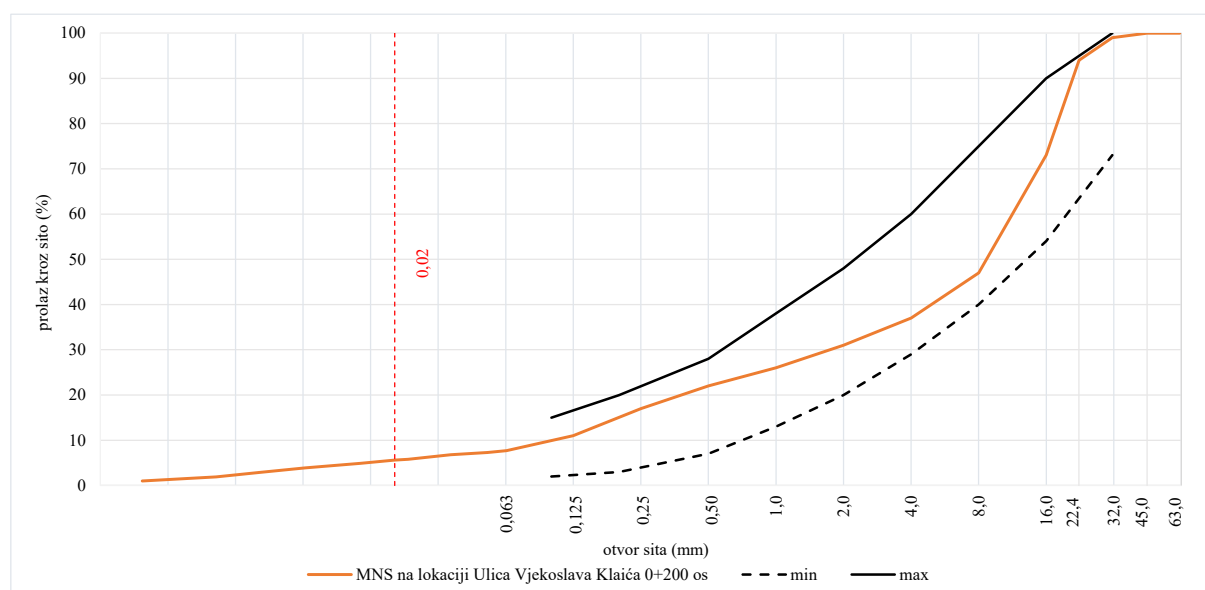


MNS na lokaciji 12: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 13

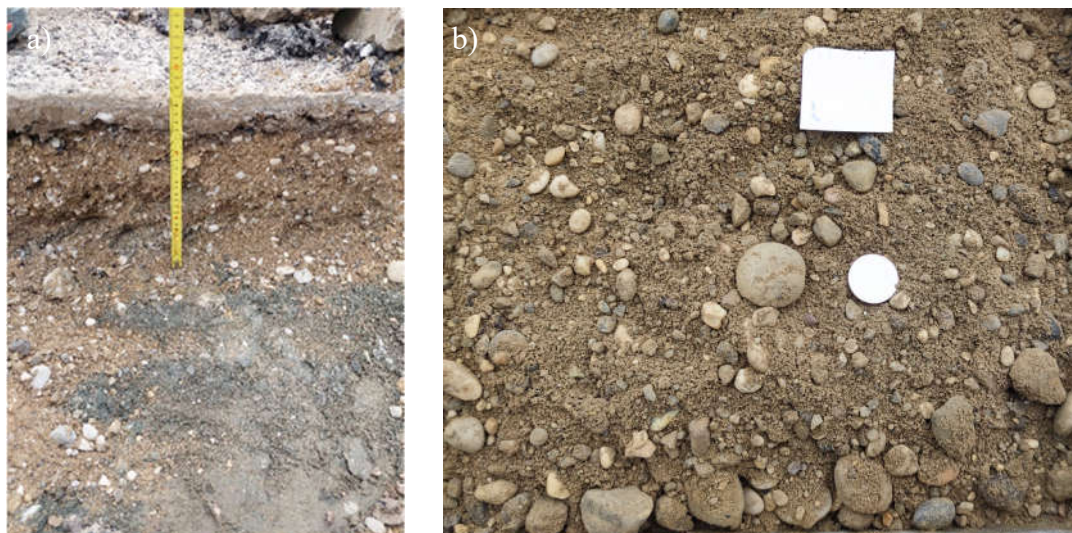
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
7,7	11	17	22	26	31	37	47	73	94	99	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0519	0,0355	0,0230	0,0140	0,0080	0,0050	0,0032	0,0015
Udio zrna (%)							
7,3	6,8	5,8	4,9	3,9	2,9	1,9	1,0



• Lokacija 13

Lokacija 13 nalazila se u Ulici Tadije Smičiklase na stacionaži km 0+250. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 6 i 7 cm te MNS-a debljine 22 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 53,2 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,1%.

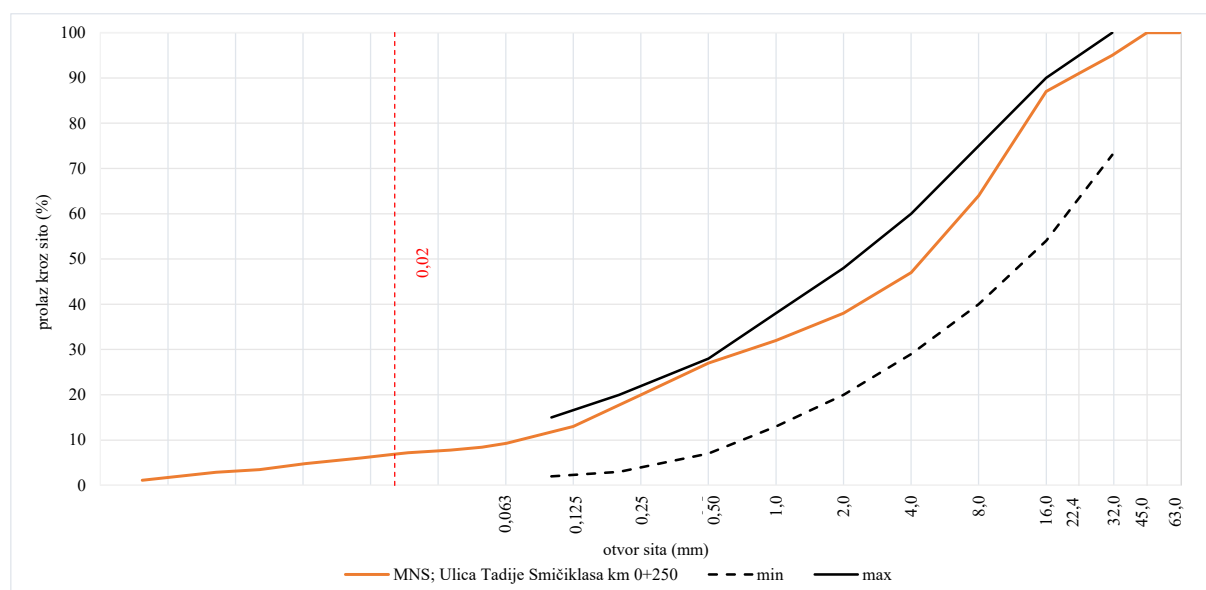


MNS na lokaciji 13: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 13

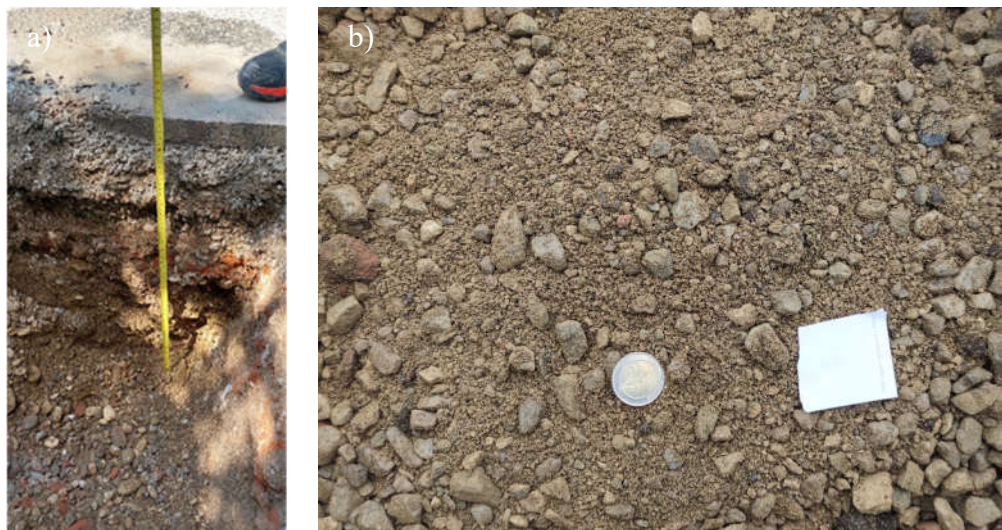
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
9,3	13	20	27	32	38	47	64	87	91	95	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0489	0,0355	0,0230	0,0140	0,0080	0,0050	0,0032	0,0015
Udio zrna (%)							
8,4	7,8	7,2	6,0	4,8	3,5	2,9	1,1



• Lokacija 14

Lokacija 14 nalazila se u Ulici Matije Mesića na stacionaži km 0+240. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 4 i 5 cm te MNS-a debljine 17 cm. MNS se sastojao od pijeska, šljunka i drobljenog kamena. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 99,1 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

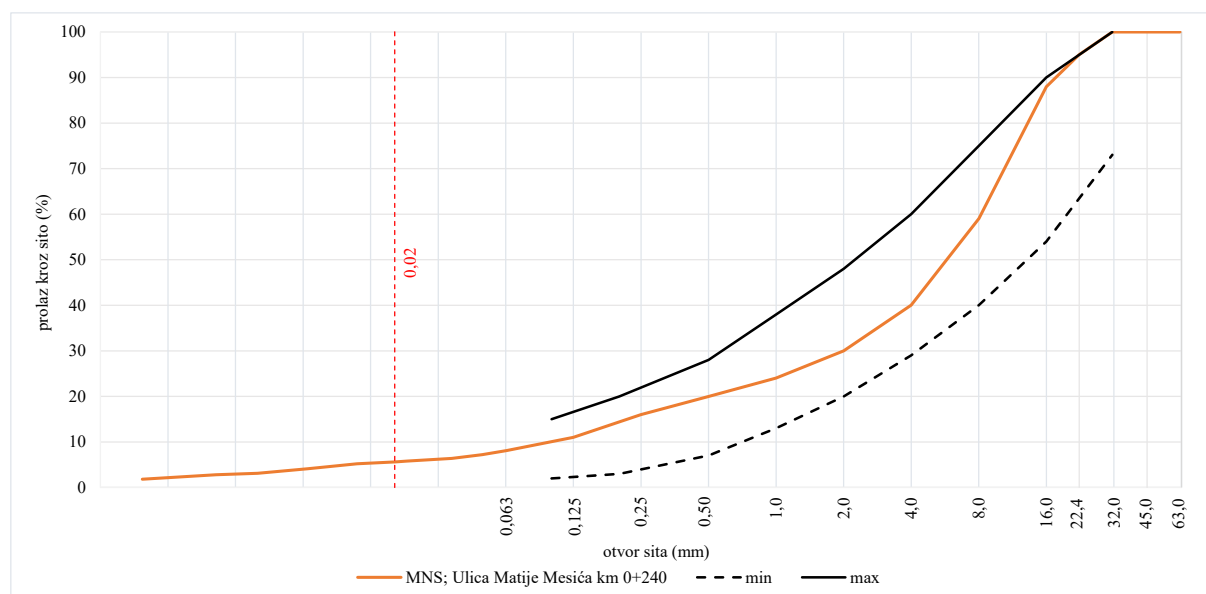


MNS na lokaciji 14: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 14

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
8,1	11	16	20	24	30	40	59	88	95	100	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0491	0,0359	0,0228	0,0136	0,0082	0,0049	0,0032	0,0015
Udio zrna (%)							
7,2	6,4	5,8	5,2	4,1	3,1	2,8	1,8



• Lokacija 15

Lokacija 15 nalazila se u Ulici Ivana Lučića na stacionaži km 0+155. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 6 cm i MNS-a debljine 13,5 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 87,5 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,1%.

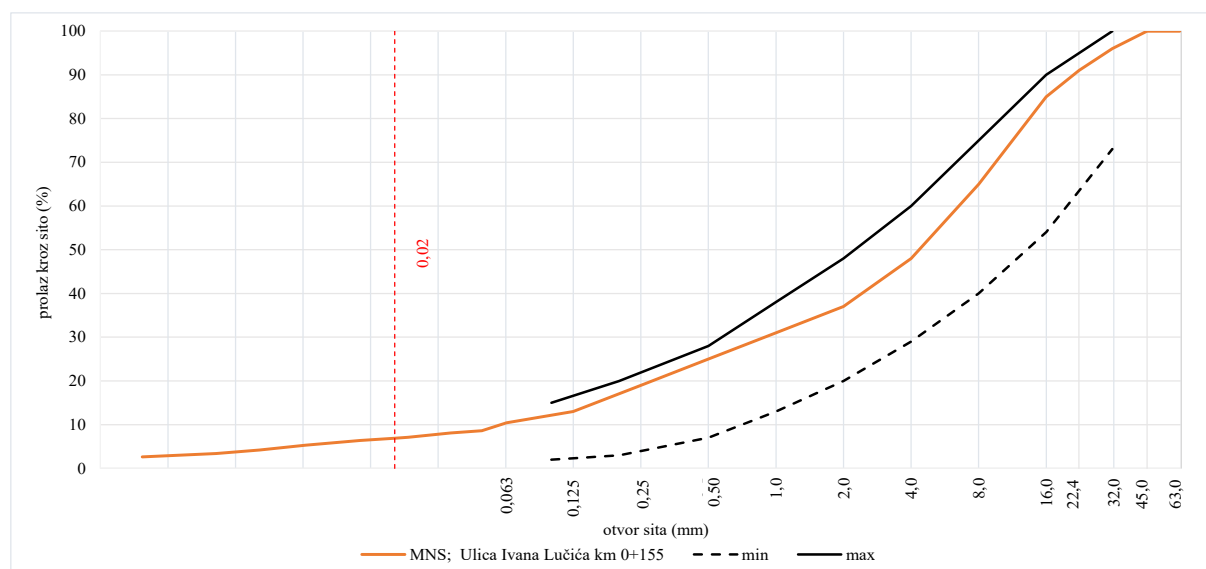


MNS na lokaciji 15: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 15

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
10,4	13	19	25	31	37	48	65	85	91	96	100	100

Promjer zrna (mm)							
0.0489	0.0355	0.0230	0.0140	0.0080	0.0050	0.0032	0.0015
Udio zrna (%)							
8,6	8,1	7,1	6,4	5,3	4,2	3,4	2,6



• Lokacija 16

Lokacija 16 nalazila se u Ulici Ivana Kukuljevića Sakcinskog na stacionaži km 0+360. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 5 i 7 cm te MNS-a debljine 40 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 77,5 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

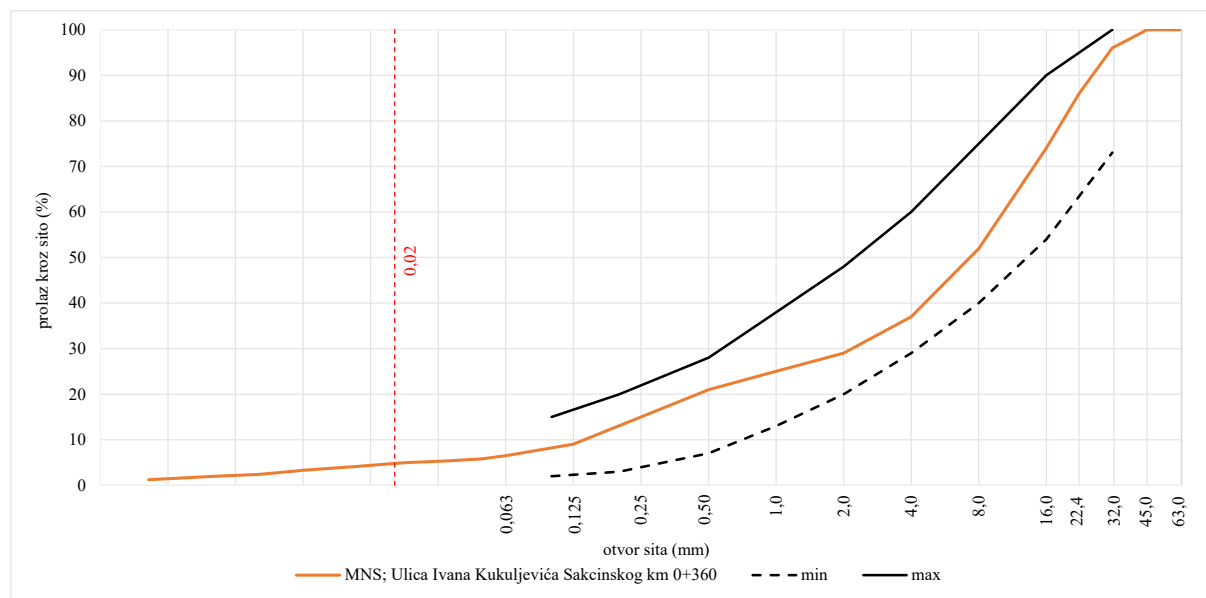


MNS na lokaciji 16: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 16

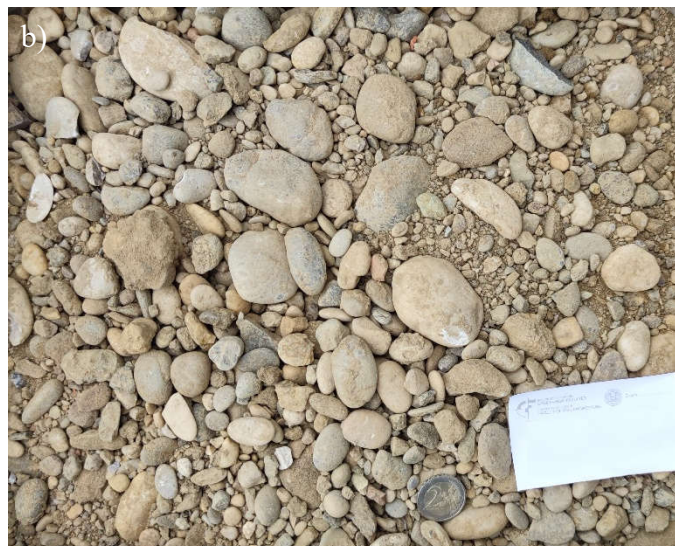
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
6,5	9	15	21	25	29	37	52	74	86	96	100	100

Promjer zrna (mm)								
0.0491	0.0352	0.0226	0.0134	0.0079	0.0050	0.0032	0.0016	
Udio zrna (%)								
5,8	5,4	5,0	4,1	3,3	2,4	2,0	1,2	



• Lokacija 17

Lokacija 17 nalazila se u Ulici Gustava Bolteka na stacionaži km 0+140. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 6 cm i MNS-a debljine 20 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 60,8 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

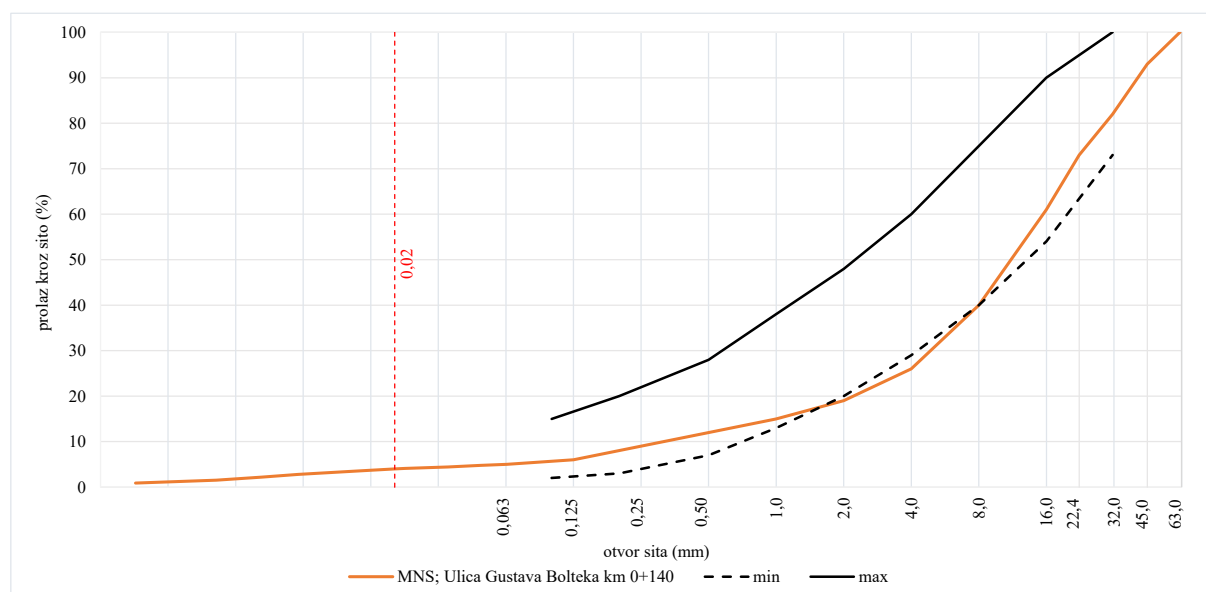


MNS na lokaciji 17: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 17

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
5,1	6	9	12	15	19	26	40	61	73	82	93	100

Promjer zrna (mm)							
0,0482	0,0345	0,0222	0,0133	0,0074	0,0051	0,0032	0,0014
Udio zrna (%)							
4,8	4,4	4,1	3,5	2,8	2,2	1,5	0,9



• Lokacija 18

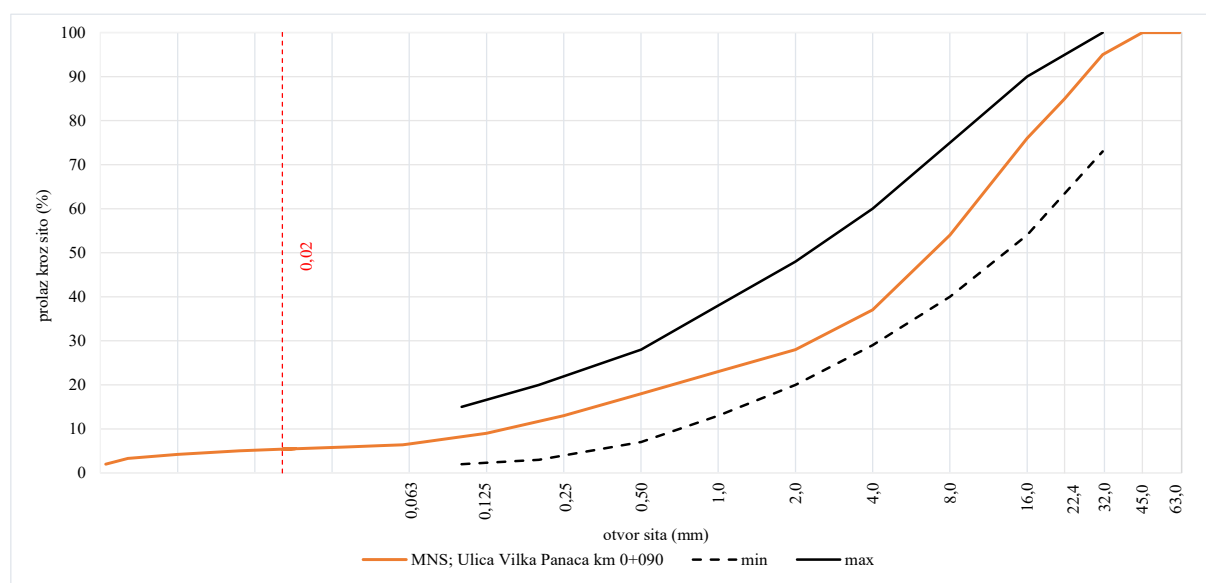
Lokacija 18 nalazila se u Ulica Vilka Panaca na stacionaži km 0+090. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 5 cm i MNS-a debljine 40 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 55,8 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,1%.



Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 18

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
6,6	9	13	18	23	28	37	54	76	85	95	100	100

Promjer zrna (mm)									
0,0589	0,0487	0,0349	0,0225	0,0136	0,0078	0,0050	0,0041	0,0014	
Udio zrna (%)									
6,4	6,2	5,9	5,5	5,0	4,2	3,3	2,0	0,8	



- Lokacija 19

Lokacija 19 nalazila se u Ulica Franje Jelačića na stacionaži km 0+160. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 5 i 7 cm te MNS-a debljine 17 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 40,7 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 99,9%.

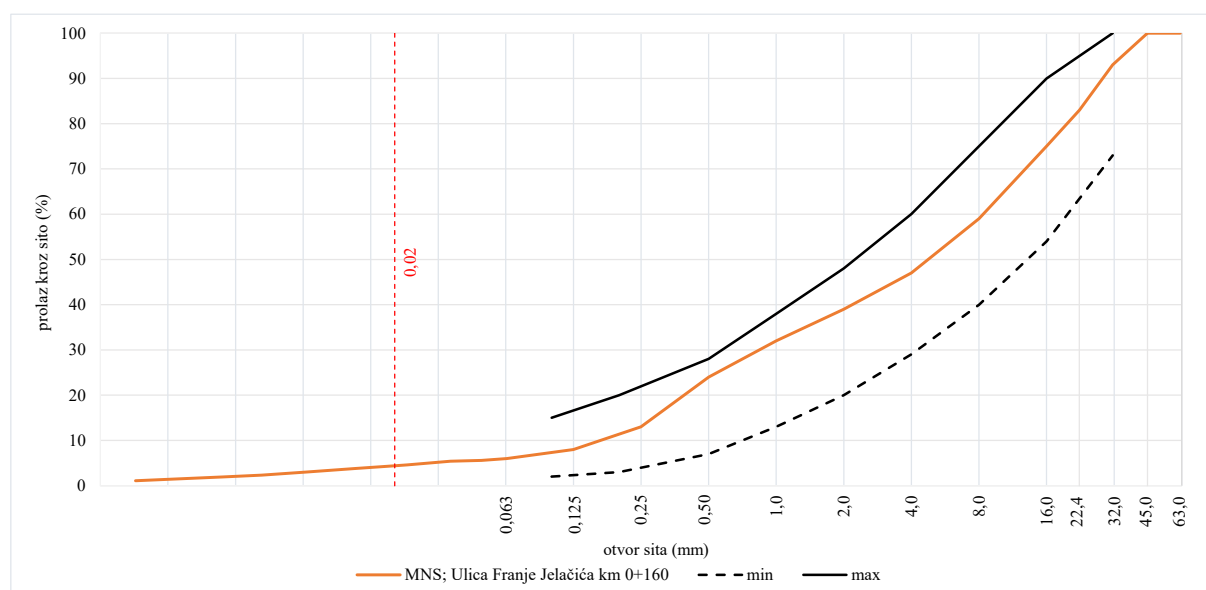


MNS na lokaciji 19: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 19

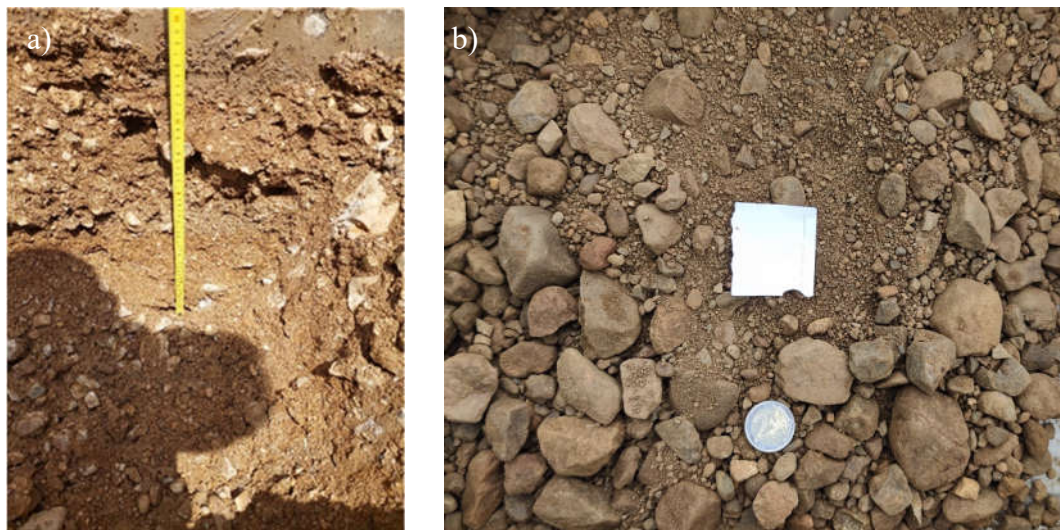
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
6,1	8	13	24	32	39	47	59	75	83	93	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0487	0,0354	0,0227	0,0135	0,0080	0,0051	0,0034	0,0014
Udio zrna (%)							
5,6	5,4	4,6	3,8	3,0	2,3	1,9	1,1



- Lokacija 20

Lokacija 20 nalazila se u Ulici Mije Srnaka na stacionaži km 0+490. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 6 i 7 cm te MNS-a debljine 25 cm. MNS se sastojao od pijeska, šljunka i drobljenog kamena. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 65,9 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

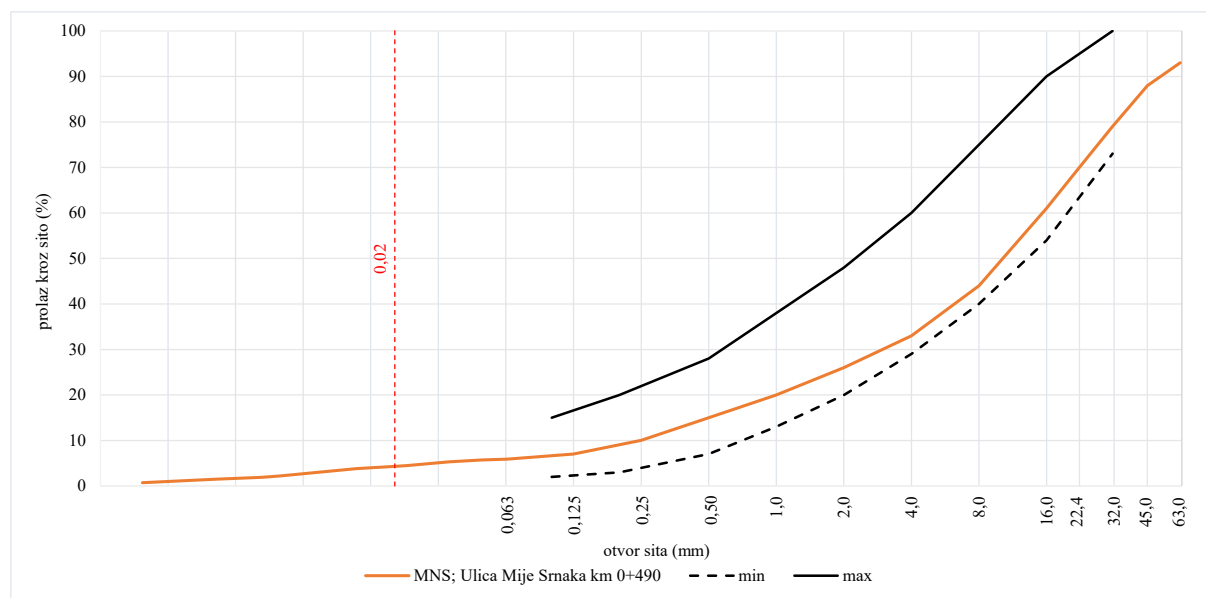


MNS na lokaciji 20: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 20

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
5,9	7	10	15	20	26	33	44	61	70	79	88	93

Promjer zrna (mm)							
0,0488	0,0350	0,0227	0,0135	0,0062	0,0051	0,0032	0,0015
Udio zrna (%)							
5,7	5,3	4,5	3,8	2,2	1,9	1,5	0,7



- Lokacija 21

Lokacija 21 nalazila se u Ulici Ivana Gundulića na stacionaži km 0+110. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 10 i 18 cm te MNS-a debljine 10 cm (. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 48,5 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,1%.

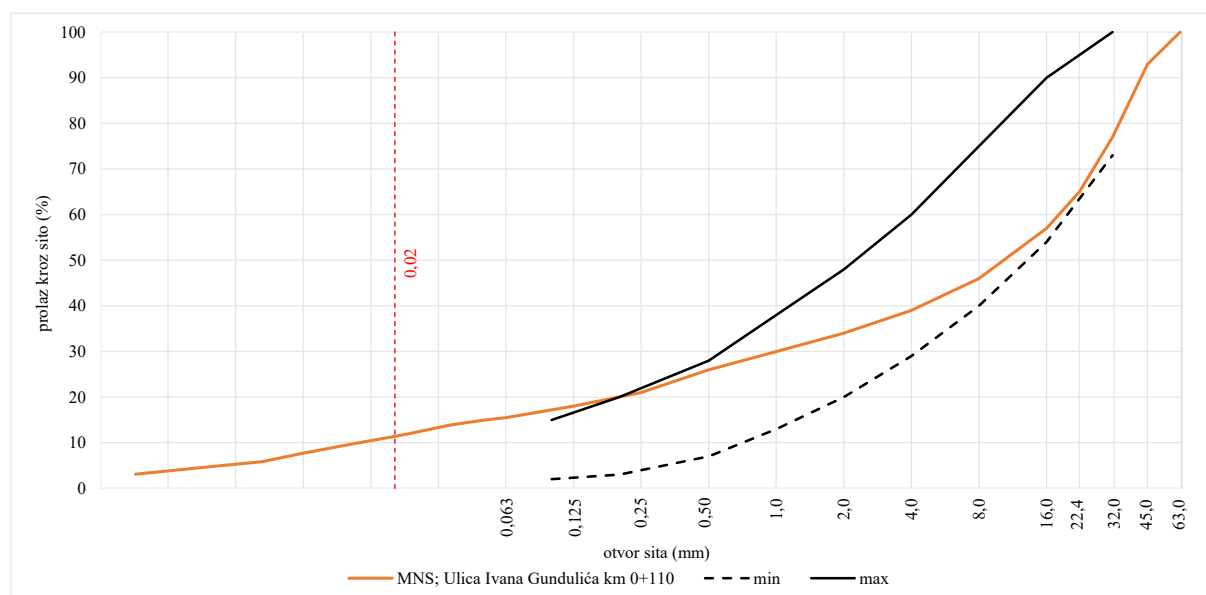


MNS na lokaciji 21: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 21

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
15,5	18	21	26	30	34	39	46	57	65	77	93	100

Promjer zrna (mm)							
0,0487	0,0354	0,0227	0,0135	0,0080	0,0051	0,0034	0,0014
Udio zrna (%)							
14,9	13,9	11,9	9,9	7,8	5,8	5,0	3,1



- Lokacija 22

Lokacija 22 nalazila se u Prilazu sisačkoj ulici na stacionaži km 0+220. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 5 cm i MNS-a debljine 20 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 86,5 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

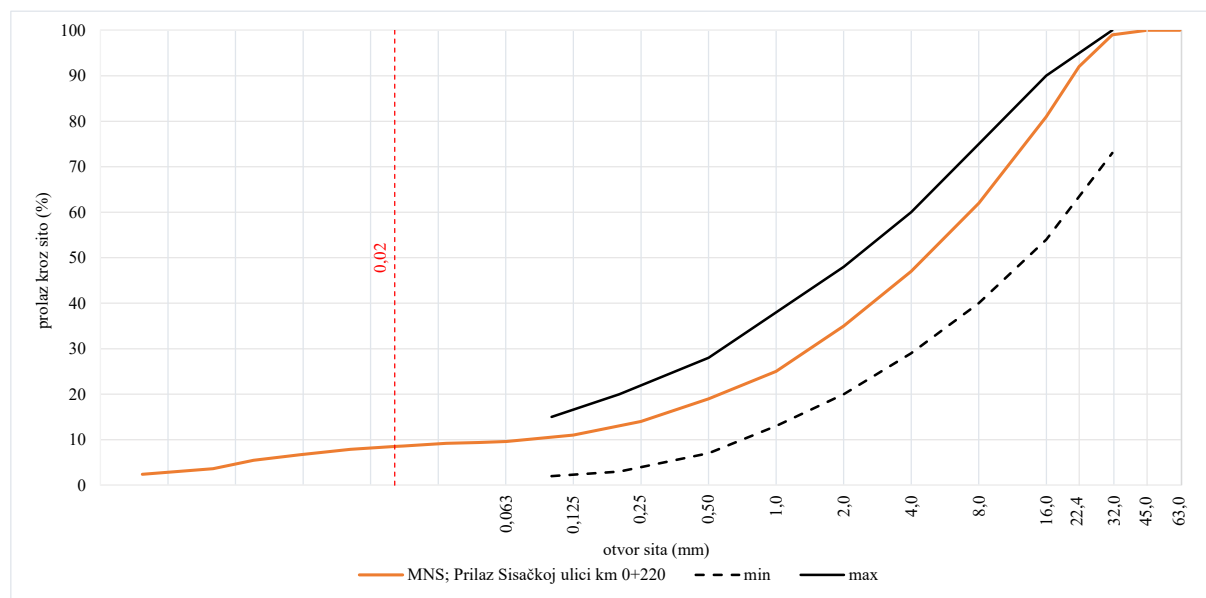


MNS na lokaciji 22: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 22

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
9,6	11	14	19	25	35	47	62	81	92	99	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0473	0,0339	0,0218	0,0127	0,0076	0,0047	0,0031	0,0015
Udio zrna (%)							
9,4	9,2	8,6	7,9	6,7	5,5	3,6	2,4



- Lokacija 23

Lokacija 23 nalazila se u Ulici Ljudevita Gaja na stacionaži km 0+200. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 4 i 5 cm te MNS-a debljine 21 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 35,6 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 99,8%.

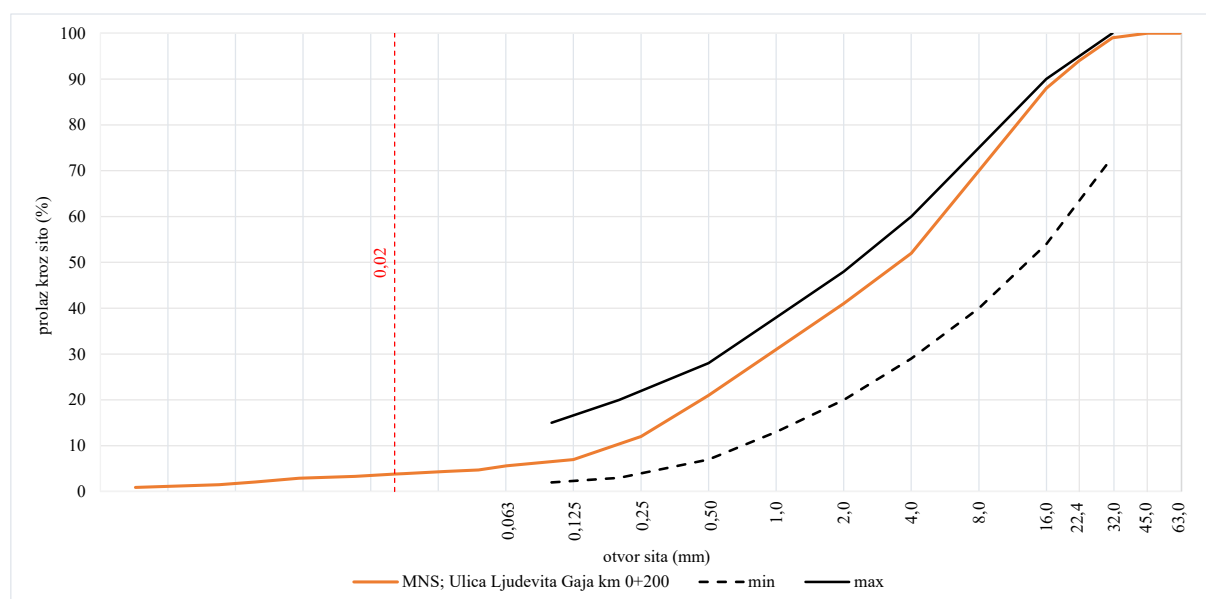


MNS na lokaciji 23: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 23

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
5,6	7	12	21	31	41	52	70	88	94	99	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0472	0,0339	0,0219	0,0133	0,0075	0,0048	0,0033	0,0014
Udio zrna (%)							
4,7	4,4	3,9	3,3	2,9	2,1	1,5	0,9



- Lokacija 24

Lokacija 24 nalazila se u Ulici Ljudevita Gaja na stacionaži km 0+700. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 8 cm i MNS-a debljine 34 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 50,7 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 99,9%.

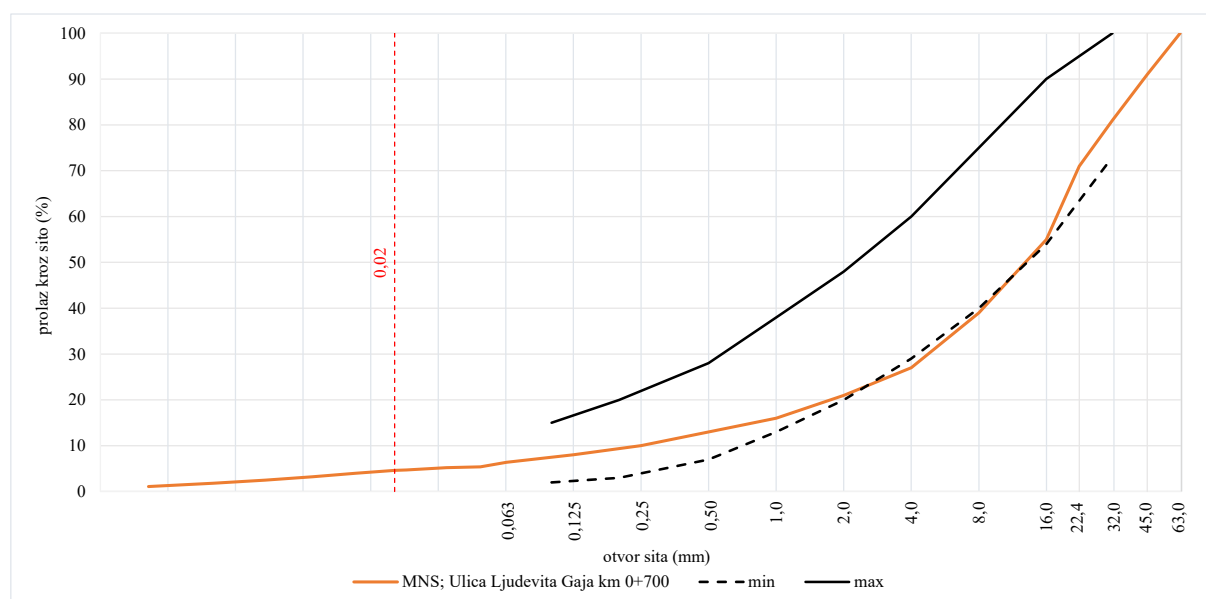


MNS na lokaciji 24: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 24

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
6,4	8	10	13	16	21	27	39	55	71	81	91	100

Promjer zrna (mm)							
0,0481	0,0341	0,0225	0,0134	0,0086	0,0053	0,0031	0,0016
Udio zrna (%)							
5,4	5,2	4,7	4,0	3,2	2,5	1,8	1,1



• Lokacija 25

Lokacija 25 nalazila se u Vinogradskoj ulici na stacionaži km 0+150. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 4 i 5 cm te MNS-a debljine od 10 do 11 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 40,1 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

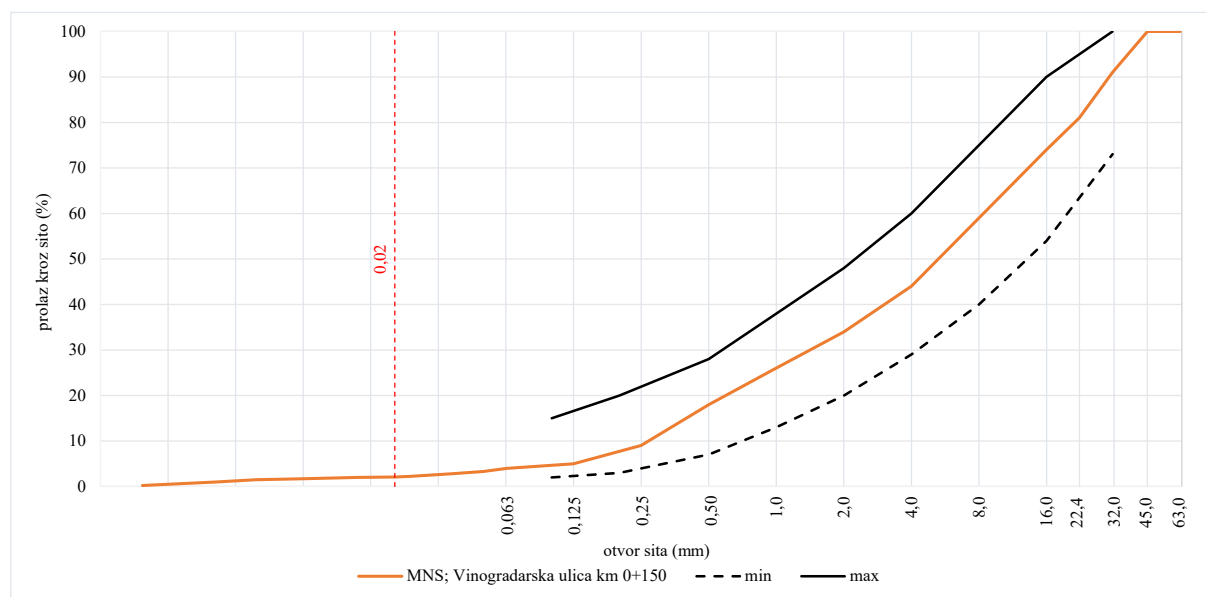


MNS na lokaciji 25: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 25

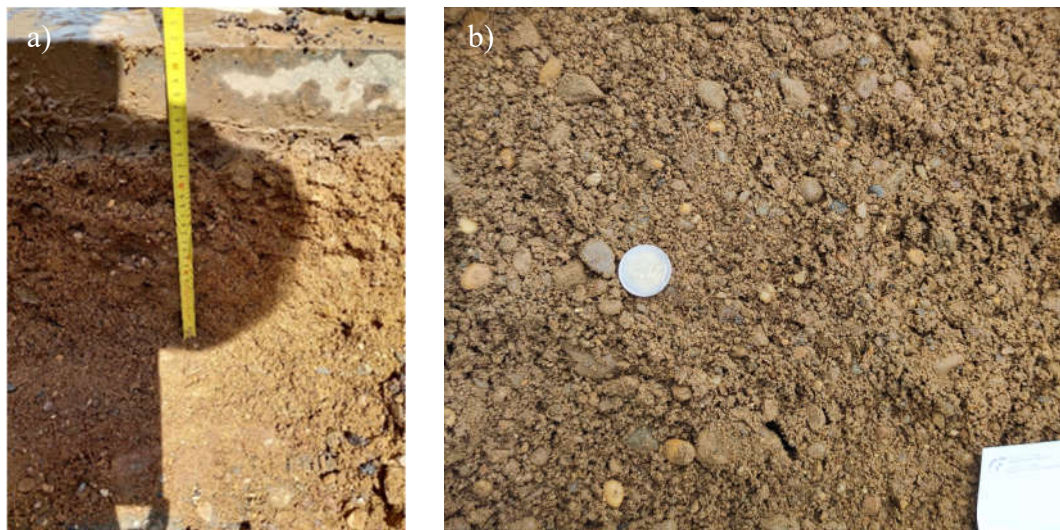
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
4	5	9	18	26	34	44	59	74	81	91	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0495	0,0360	0,0233	0,0136	0,0080	0,0048	0,0032	0,0015
Udio zrna (%)							
3,3	2,8	2,2	2,0	1,7	1,5	1,0	0,2



• Lokacija 26

Lokacija 26 nalazila se u Vinogradskoj ulici na stacionaži km 0+510. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 8 cm i MNS-a debljine 25 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 41,2 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.

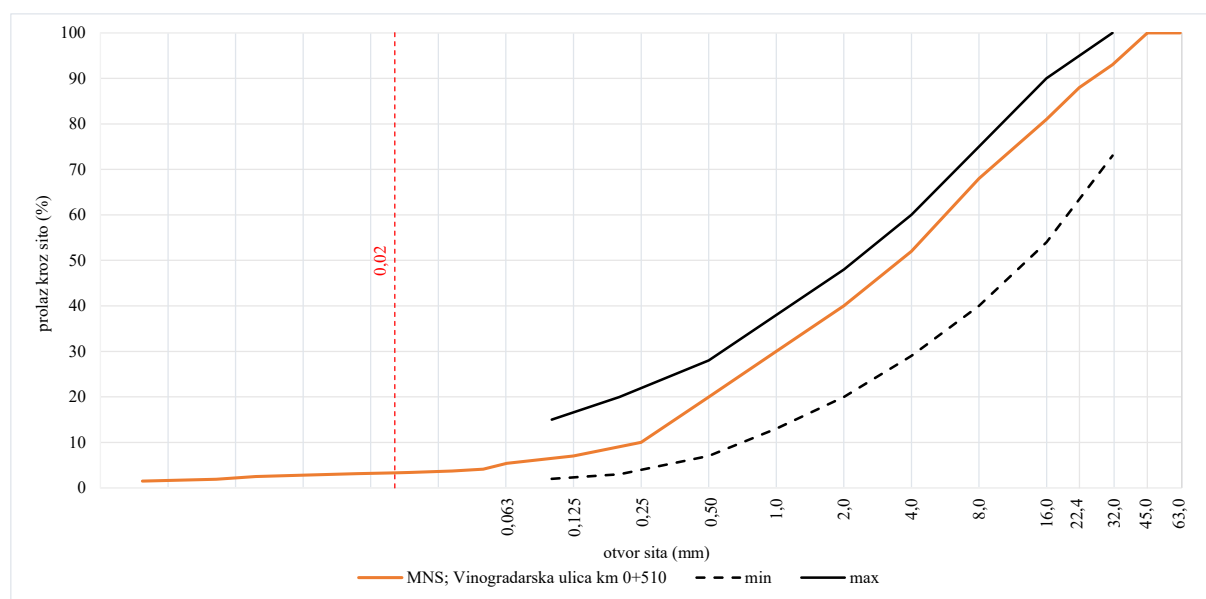


MNS na lokaciji 26: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 26

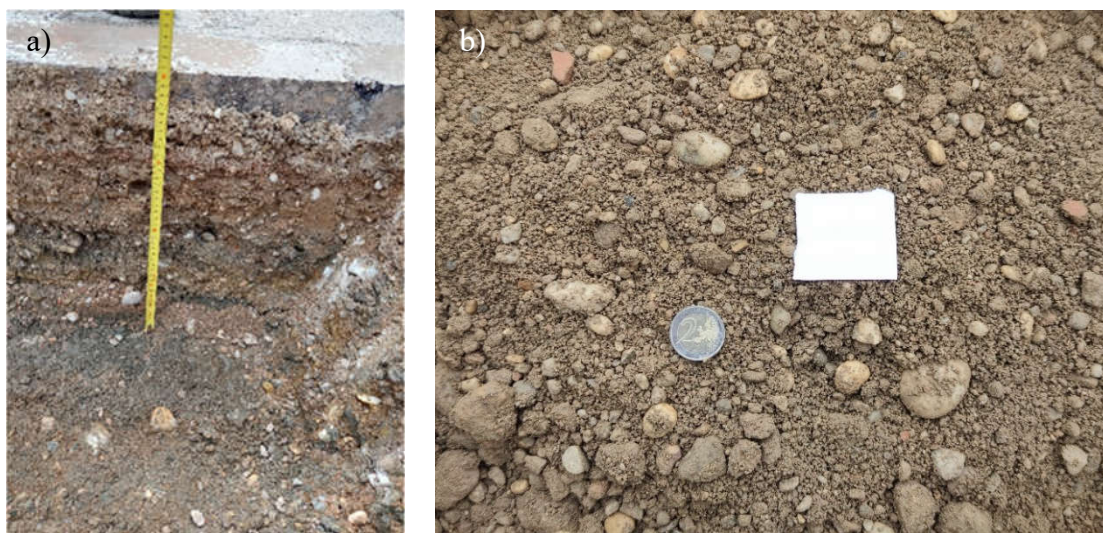
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
5,4	7	10	20	30	40	52	68	81	88	93	100	100

Promjer zrna (mm)							
0,0495	0,0360	0,0233	0,0136	0,0080	0,0048	0,0032	0,0015
Udio zrna (%)							
4,1	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	1,9	1,5



• Lokacija 27

Lokacija 27 nalazila se u Ulici Ivana Trnskog na stacionaži km 0+100. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 6 i 7 cm te MNS-a debljine 34 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 49,2 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 99,1%.

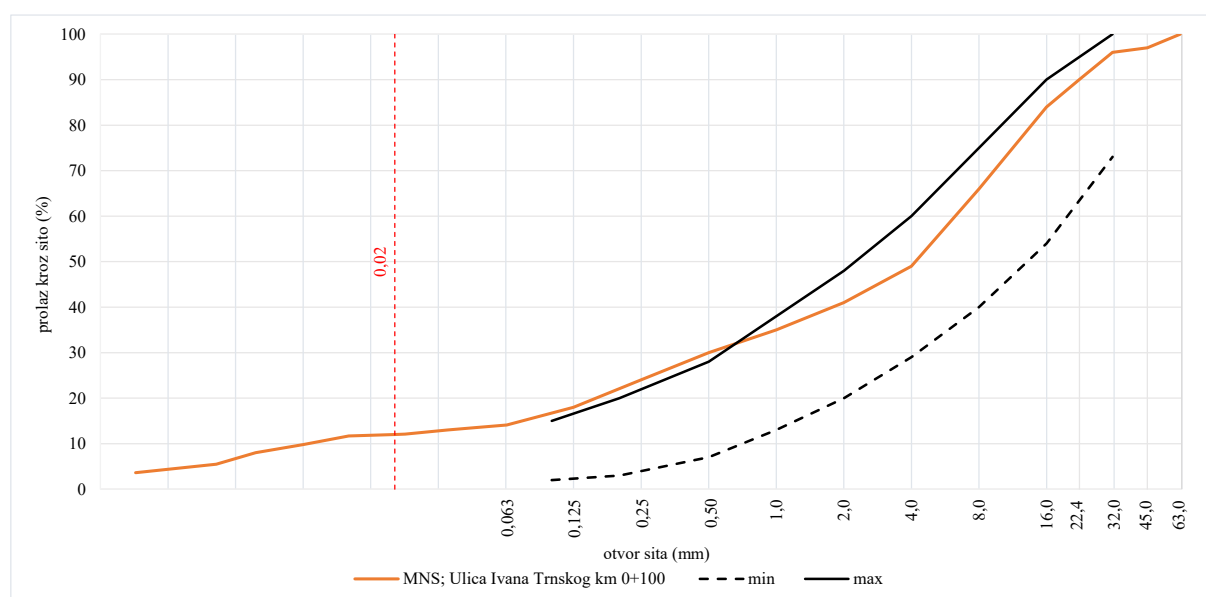


MNS na lokaciji 27: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 27

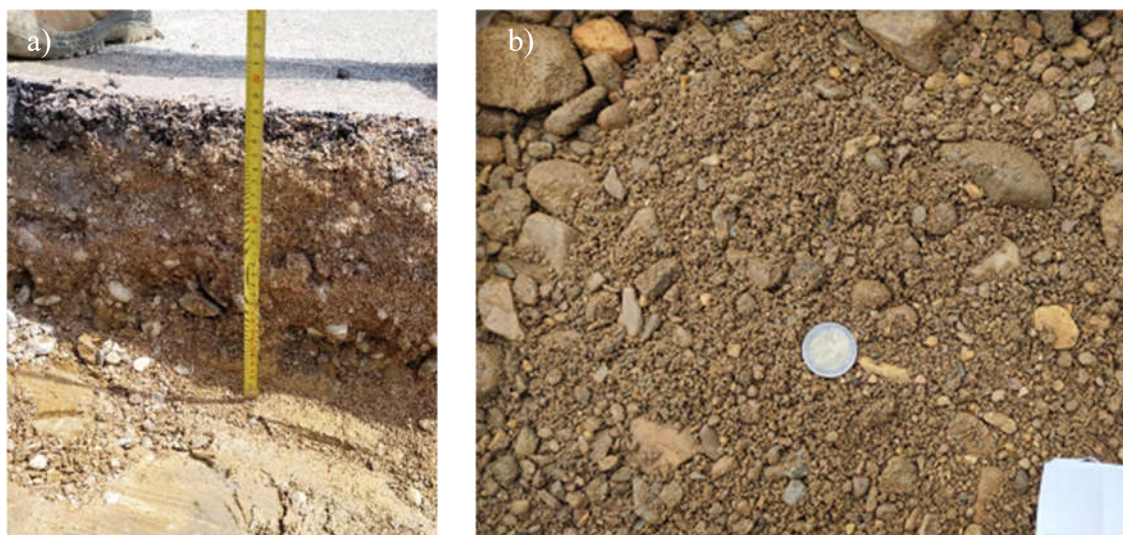
Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
14,1	18	24	30	35	41	49	66	84	90	96	97	100

Promjer zrna (mm)							
0,0451	0,0344	0,0222	0,0125	0,0078	0,0048	0,0032	0,0014
Udio zrna (%)							
13,5	13,0	12,1	11,7	9,8	8,0	5,5	3,6



• Lokacija 28

Lokacija 28 nalazila se u Ulici Slavoljuba Kostinčera na stacionaži km 0+310. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine 5 cm i MNS-a debljine 20 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 51,1 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 99,8%.

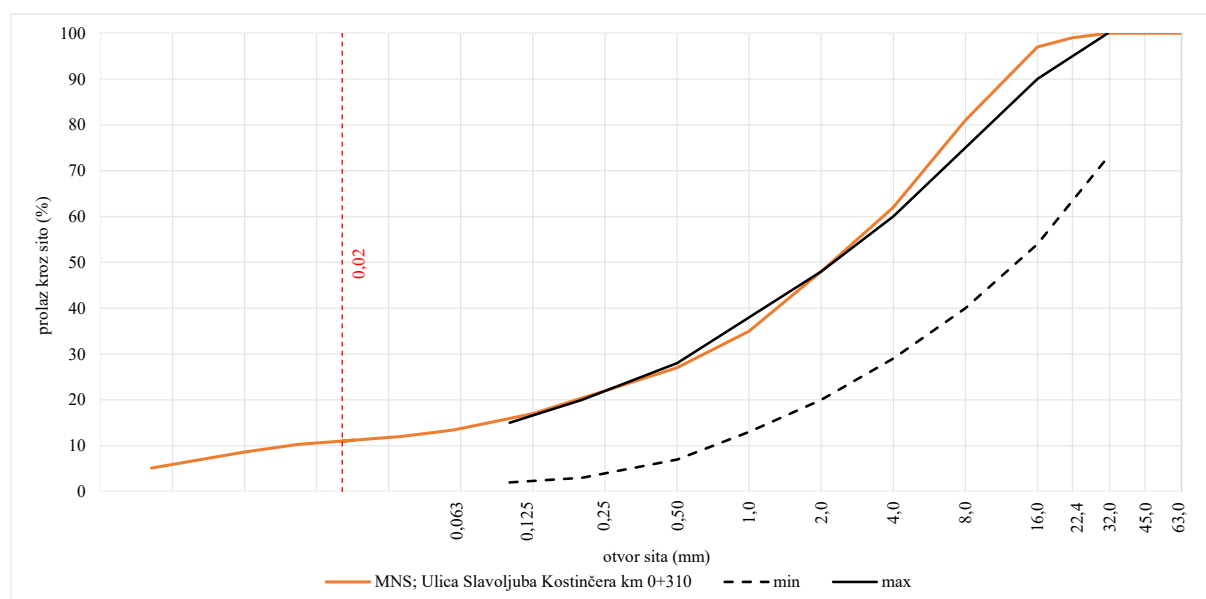


MNS na lokaciji 28: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati granulometrijske analize MNS-a na lokaciji 28

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
13,8	17	22	27	35	48	62	81	97	99	100	100	100

Promjer zrna (mm)									
0,0579	0,0487	0,0350	0,0224	0,0131	0,0078	0,0049	0,0032	0,0016	
Udio zrna (%)									
13,4	12,9	12,0	11,2	10,3	8,6	6,8	5,1	3,3	



- Lokacija 29

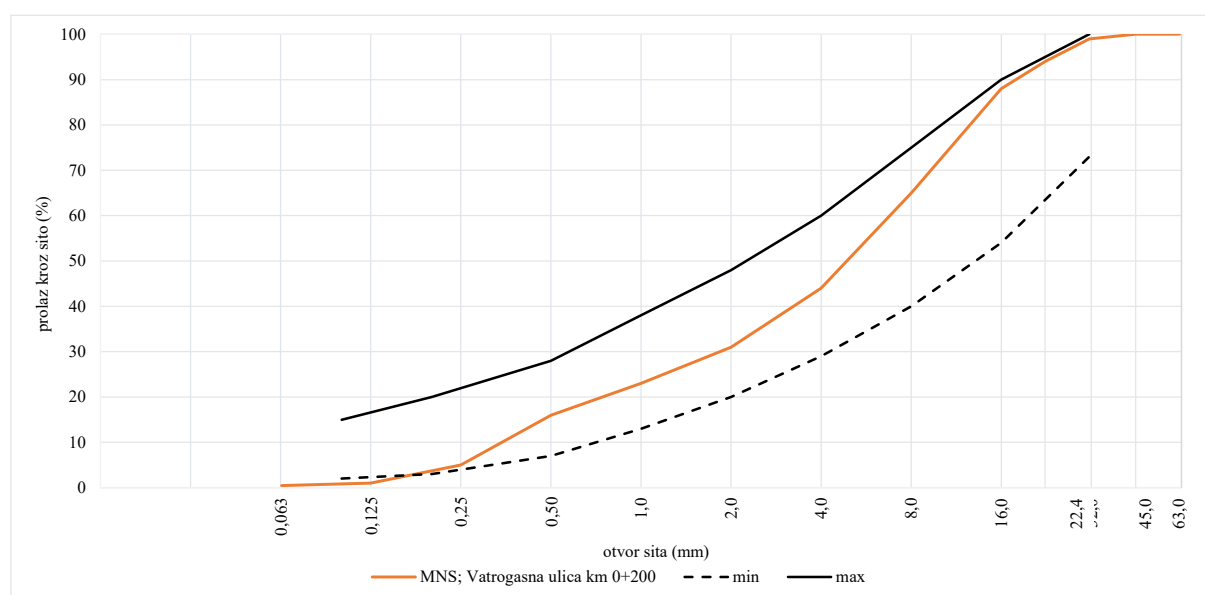
Lokacija 29 nalazila se u Vatrogasnoj ulici na stacionaži km 0+200. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 4 i 5 cm te MNS-a debljine 20 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Zbog malog udjela zrna promjera manjeg od 0,063 mm postupak areometriranje nije proveden. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 60,1 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.



MNS na lokaciji 29: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati prosijavanja MNS-a na lokaciji 29

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
0,5	1	5	16	23	31	44	65	88	94	99	100	100



- Lokacija 30

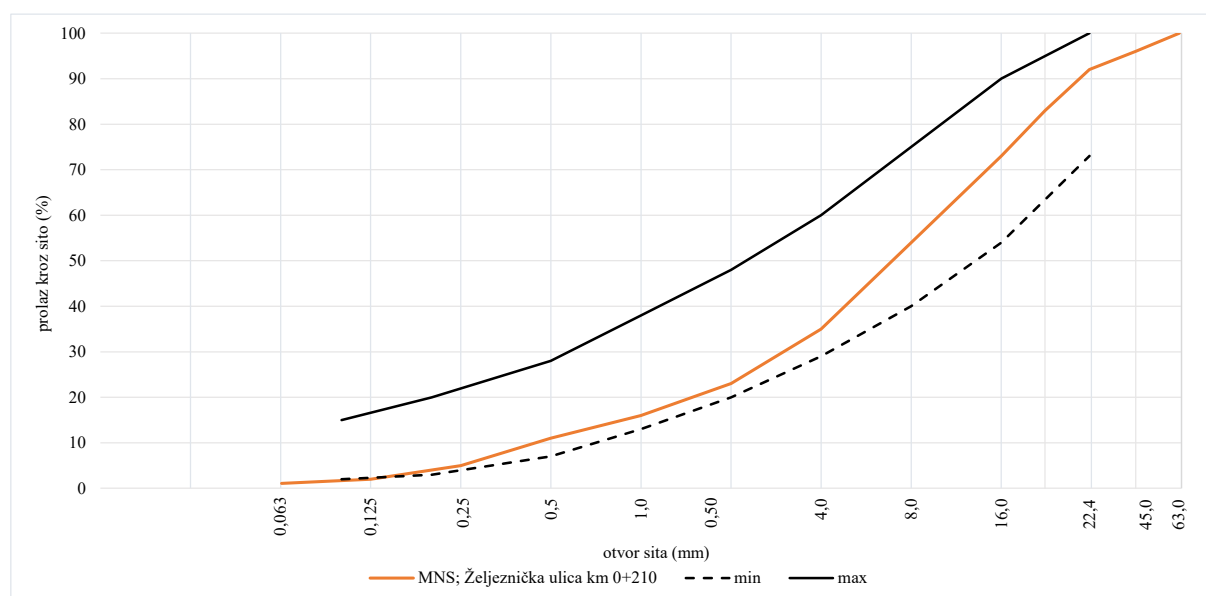
Lokacija 30 nalazila se u Željezničkoj ulici na stacionaži km 0+210. Kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnog sloja debljine između 3 i 4 cm te MNS-a debljine 45 cm. MNS se sastojao od pijeska i šljunka. Zbog malog udjela zrna promjera manjeg od 0,063 mm postupak areometriranje nije proveden. Vrijednost dinamičkog modula deformacije MNS-a iznosila je 67,2 MN/m², dok je stupanj zbijenosti bio 100,0%.



MNS na lokaciji 30: a) debljina sloja; b) materijal izvađen iz sloja

Rezultati prosijavanja MNS-a na lokaciji 30

Otvor sita (mm)												
0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0
Prolaz kroz sito (%)												
1,1	2	5	11	16	23	35	54	73	83	92	96	100



Prilog 7.2 Usporedba debljina MNS-a

Lokacija	d _{izmjereno} (m)	d _{GPR} (m)	δ (%)
1	47,0	42,346	9,9
2	50,0	43,843	12,3
3	41,0	40,519	1,2
4	58,0	61,047	5,3
5	30,0	31,600	5,3
6	36,0	38,060	5,7
7	26,0	25,484	2,0
8	16,0	17,186	7,4
9	23,0	25,435	10,6
10	33,0	34,440	4,4
11	25,0	22,935	8,3
12	12,0	13,718	14,3
13	22,0	23,367	6,2
14	17,0	18,673	9,8
15	13,5	10,443	22,6
16	40,0	39,622	0,9
17	20,0	21,794	9,0
18	40,0	36,352	9,1
19	17,0	13,510	20,5
20	25,0	25,203	0,8
21	10,0	10,203	2,0
22	20,0	16,628	16,9
23	21,0	18,299	12,9
24	34,0	35,004	3,0
25	11,0	12,759	16,0
26	25,0	26,624	6,5
27	34,0	38,268	12,6
28	20,0	16,625	16,9
29	20,0	19,225	3,9
30	45,0	43,249	3,9

Prilog 7.3 Usporedba vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti MNS-a

Lokacija	rdp _{KHM}	rdp _{SRM}	δ (%)
1	3,310	4,037	22,0
2	2,902	3,738	28,8
3	4,622	4,695	1,6
4	5,173	4,645	10,2
5	5,045	4,498	10,9
6	6,022	5,341	11,3
7	3,567	3,637	2,0
8	3,652	3,113	14,8
9	4,504	3,646	19,0
10	4,244	3,844	9,4
11	3,745	4,365	16,6
12	5,429	4,047	25,5
13	3,761	3,294	12,4
14	3,361	2,736	18,6
15	2,924	4,714	61,2
16	3,136	3,172	1,2
17	4,232	3,500	17,3
18	2,915	3,495	19,9
19	2,468	3,805	54,2
20	6,634	6,448	2,8
21	4,108	3,815	7,1
22	3,143	4,465	42,1
23	2,983	3,845	28,9
24	6,302	5,888	6,6
25	6,261	4,551	27,3
26	6,235	5,436	12,8
27	6,611	5,171	21,8
28	3,142	4,465	42,1
29	3,844	4,073	6,0
30	4,265	4,603	7,9

Popis slika

Slika 1-1 Shematski prikaz faza istraživanja.....	6
Slika 2-1 Prijenos opterećenje u kolničkoj konstrukciji.....	10
Slika 2-2 Oštećenja površine kolnika [5]: a) udarne rupe; b) kolotrazi; c) lokalna ulegnuća; d) izdizanje kolnika; e) uzdužne pukotine, f) mrežaste pukotine; g) pukotine u tragovima kotača	11
Slika 2-3 Stanje naprezanja elementa MNS-a [37]	11
Slika 2-4 Stanje naprezanja u MNS-u [20]	12
Slika 2-5 Shematski prikaz migracije vode unutar kolničke konstrukcije	17
Slika 2-6 Promjena čvrstoće tijekom razdoblja smrzavanja i odmrzavanja [109]	21
Slika 2-7 Shematski prikaz varijacije defleksije kolničke konstrukcije tijekom godine [109]	22
Slika 3-1 Shematski prikaz mjernog vozila opremljenog GPR-om	25
Slika 3-2 Raspon frekvencije antene GPR-a nazivne frekvencije 400 MHz [17].....	26
Slika 3-3 Shematski prikaz horizontalne i vertikalne rezolucije GPR-a [146]	27
Slika 3-4 GPR prikupljanje podataka: a) širenje EM valova, b) A-sken c) B-sken	30
Slika 3-5 Shematski prikaz utjecaja vlažnosti materijala na A-sken [174]: a) suhi pijesak i suha glina; b) suhi pijesak i vlažna glina; c) vlažni pijesak i vlažna glina	31
Slika 3-6 Određivanja brzine EM valova [175]: a) FO metoda; b) CMP metoda; c) WARR metoda	32
Slika 3-7 Ispitivanje utjecaja zablacenosti zastorne prizme na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [205]: a) prikaz modela; b) ispitne dionice	38
Slika 3-8 Odnos vrijednosti indeksa zablacenosti i relativne dielektrične permitivnosti [199]	39
Slika 3-9 Granulometrijski sastav [26]: a) čistog tucanika; b) zablacenog tucanika	40
Slika 3-10 Shematski prikaz kalupa [26]	41
Slika 3-11 Drveni kalup i air-coupled antena korišteni u istraživanju [25,252]	42
Slika 3-12 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti [252]: a) suhi uzorci s promjenjivim djelom zrna gline b) uzorci s 13% dodane gline pri različitim udjelima vlage.....	42
3-13 Uzorci zastorne prizme [207]: a) čisti agregat; b) čisti agregat s dodanim pijeskom; c) čisti agregat s dodanim pijeskom i šljunkom; d) čisti agregat s dodanim šljunkom.....	43
Slika 3-14 Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti materijala s različitim tipom i udjelom punila [207]	44
Slika 3-15 Uzorci zastorne prizme [188]: a) čisti suhi agregat; b) čisti agregat s dodanom vodom; c) čisti agregat potpuno saturirani; d) agregat s dodanim pijeskom; e) vlažni mješavina	

čistog agregata i pijeska; f) čisti agregat s dodanim šljunkom.....	45
Slika 3-16 Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka bez dodanog punila s različitim udjelima vlage [207]	45
Slika 3-17 Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka s dodatkom pijeska pri različitim udjelima vlage [207]	46
Slika 3-18 Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka s dodatkom šljunka pri različitim udjelima vlage [207]	46
Slika 3-19 Prikaz postavki ispitivanja [254]	47
Slika 3-20 Različite razine zablacenosti [254]	48
Slika 3-21 Prikaz materijala korištenih u ispitivanju [255]: a) šljunak; b) krupnozrnati pijesak; c) sitnozrnati pijesak; d) bentonitna glina	48
Slika 3-22 Prikaz opreme korištene u istraživanju [23]: a) stepped frequency air-coupled GPR; b) ground-coupled GPR-a	49
Slika 3-23 Određivanje utjecaja stupnja zbijenosti i udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [257]: a) granulometrijski sastav materijala; b) prikaz ispitivanja	50
Slika 4-1 Percometer i različiti tipovi sonda [262]	52
Slika 4-2 Postavke TST [27]: a) izrada uzorka; b) uzorak u vodenoj kupelji; c) raspored lokacija očitavanja	53
Slika 4-3 Utjecaj udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [30]....	55
Slika 4-4 Granulometrijska sastav materijala korištenih u ispitivanju [95]	55
Slika 4-5 Rezultati TST-a [95]	56
Slika 5-1 Prikaz sastavnih komponenti TDR-a	58
Slika 5-2 Shematski prikaz refleksije EM vala kod TDR-a [267]	59
Slika 5-3 Usporedni shematski prikaz sonde TDR-a [270]: a) s tri šipke; b) s dvije šipke	61
Slika 5-4 Shematski prikaz položaja ugrađenih senzora u kolničkoj konstrukciji [299]	64
Slika 5-5 Shematski prikaz kalupa i položaja sonde: a) tlocrt; b) uzdužni presjek [268].....	65
Slika 5-6 Usporedba rezultata istraživanja s postojećim modelima [268]	66
Slika 5-7 Praćenje procese sušenja TDR-om [268]	66
Slika 5-8 Postavke ispitivanja [300]: a) sonde; b) priprema uzoraka	67
Slika 5-9 Rezultati istraživanja TDR-om [300]: a) uzorci s promjenjivim udjelom vlage; b) uzorci s promjenjivim stupnjem zbijenosti	67
Slika 5-10 Utjecaj duljine ravnog trakastog kabela na rezultate mjerenja [300]	68
Slika 5-11 Postupak instalacije TDR-a sa sondama s ravnim trakastim kabelom [303].....	68
Slika 5-12 Položaj TDR sonde unutar kalupa [257]	69

Slika 5-13 Prikaz rezultata istraživanja Muller i suradnika [257].....	70
Slika 6-1 Kamenolom Gorjak	71
Slika 6-2 Oprema korištena za granulometrijsku analizu: a) set sita i tresilica; b) areometar; c) pješčana kupelj	72
Slika 6-3 Shematski prikaz granulometrijske analize [310]: 1– uzorak; 2– “suhi” postupak; 3– četvrtanje; 4– sušenje; 5– “mokri” postupak; 6– vaganje; 7– disperzijsko sredstvo; 8– namakanje i miješanje; 9– suho odvajanje; 10– odvajanje i ispiranje; 11– ostatak od ispiranja; 12– sakupljanje; 13– sedimentacija; 14– sušenje; 15– prosijavanje; 16– suspenzija; 17– areometriranje; 18– vaganje ostataka materijala na pojedinom situ, 19– obrada rezultata.....	73
Slika 6-4 Granulometrijski sastav drobljenog kamenog materijala	75
Slika 6-5 Određivanje oblika zrna: a) kljunasto mjerilo; b) zrna nepovoljnog oblika.....	76
Slika 6-6 Ispitivanje metilenskim modrilom: a) oprema za ispitivanje; b) suspenzije s nedovoljnom količinom otopine metilenskog modrila; c) suspenzija sa dovoljnom količinom otopine metilenskog modrila [316]	77
Slika 6-7 Određivanje ekvivalenta pijeska: a) oprema za ispitivanje; b) ispitni uzorak nakon procesa taloženja; c) postupak određivanja visine h_1 i h_2 [321]	78
Slika 6-8 Određivanje prisutnosti humusa- referentna tekućina (lijevo) i ispitni uzorak (desno)	79
Slika 6-9 Određivanje gustoće i upijanje vode: a) piknometar; b) određivanje površinski suhog stanja uzorka frakcije 0,063/4 mm	80
Slika 6-10 Ispitivanje otpornosti na smrzavanje metodom natrijevog sulfata	81
Slika 6-11 Određivanje otpornosti na drobljenje: a) uređaj; b) materijal nakon ispitivanja	82
Slika 6-12 Modificirani Proctor-ov pokus: a) uređaj za zbijanje; b) uzorak poslije zbijanja ..	83
Slika 6-13 Rezultati Proctor-ovog pokusa za osnovni materijala	83
Slika 6-14 Ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti: a) namakanje uzoraka; b) provođenje ispitivanja; c) uzorak nakon ispitivanja.....	84
Slika 6-15 Grafički prikaz suhe gustoće i vrijednosti CBR-a drobljenog kamenog materijala	85
Slika 6-16 Dodani sitnozrnati materijal: a) nepečeni crijep; b) usitnjavanje valjkom s glatkim čeličnim kotačima; c) usitnjavanje u uređaju za provođenje Los Angeles pokusa	85
Slika 6-17 Analiza granulometrijskog sastava: a) suspenzija; b) prosijavanje „mokrim“ postupkom; c) ostatak na situ veličine otvora 0,063 mm	86
Slika 6-18 Analiza granulometrijskog sastava dodanog materijala	86
Slika 6-19 Određivanje granica tečenja: a) Casagrande-ov uređaj; b) ispitni uzorak	87
Slika 6-20 Određivanje granice tečenja	87

Slika 6-21 Određivanje granice plastičnosti: a) ručno valjanje valjčića; b) rezultati ispitivanja	88
Slika 6-22 analiza granulometrijskog sastava mješavina materijala	89
Slika 7-1 Shematski prikaz otiska ground-coupled antene [343]	91
Slika 7-2 Shematski prikaz otiska air-coupled antene	92
Slika 7-3 Kalupi: a) izrađen od PE cijevi s dnom od HDPE ploče; b) izrađen od oplatnih ploča	93
Slika 7-4 Dimenzije sonde TDR-315H [347]	94
Slika 7-5 Instalacija TDR sondi: a) postavljanje sonde na određenoj dubini; b) primarno ručno zbijanje; c) uzorak s tri ugrađene sonde	95
Slika 7-6 Priprema materijala za ugradnju u kalup	96
Slika 7-7 Izrada uzorka: a) zbijanje uzorka; b) uzorak nakon zbijanja	97
Slika 7-8 Centralna jedinica SIR 20 i antene 4105 i 4108 proizvođača GSSI	97
Slika 7-9 Air-coupled antena za vrijeme kalibracije	98
Slika 7-10 Ispravan izgled A-skene [356]: a) antena 2 GHz; b) antena 1 GHz	100
Slika 7-11 Dinamička ploča	101
Slika 7-12 Određivanje volumena volumetrom: a) podnožna ploča, b) rupa u koju se utiskuje balon; c) volumetar	102
Slika 7-13 Tube suction test: a) kalup i podkalup za izradu uzorka; b) izvođenje istraživanja	103
Slika 7-14 Distribucija vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 1 GHz	105
Slika 7-15 Distribucija vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 2 GHz	105
Slika 7-16 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_0	106
Slika 7-17 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_1	107
Slika 7-18 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_2	107
Slika 7-19 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_3	108
Slika 7-20 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_4	108
Slika 7-21 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti uzoraka izrađenih od mješavine M_5	109

Slika 7-22 Utjecaj promjene udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti pri udjelu vlage od 1%	110
Slika 7-23 Utjecaj promjene udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti pri udjelu vlage od 3%	111
Slika 7-24 Utjecaj promjene udjela sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti pri udjelu vlage od 5%	111
Slika 7-25 Promjena vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti tijekom TST-a	112
Slika 8-1 Shematski prikaz lokacija u Petrinji na kojima su provedeni terenski istražni radovi	114
Slika 8-2 Rasipanje vrijednosti debljina MNS-a zbog EM šuma.....	115
Slika 8-3 Usporedba debljina MNS-a određenih direktnim mjerenjem i GPR-om	117
Slika 8-4 Usporedba vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određen s KHM i SRM	117
Slika 9-1 Linearna regresija za udio vlage i relativnu dielektričnu permitivnost- 1 GHz	120
Slika 9-2 Linearna regresija za udio sitnih zrna i relativnu dielektričnu permitivnost- 1 GHz	120
Slika 9-3. Pearson-ova matrica korelacije- 1 GHz	121
Slika 9-4 Podaci korišteni za izradu modela- 1 GHz	122
Slika 9-5 Validacija modela za predviđanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 1 GHz	123
Slika 9-6 Linearna regresija za udio vlage i relativnu dielektričnu permitivnost- 2 GHz	124
Slika 9-7 Linearna regresija za udio sitnih zrna i relativnu dielektričnu permitivnost- 2 GHz	125
Slika 9-8 Matrica Pearson-ove korelacije- 2 GHz	125
Slika 9-9 Podaci korišteni za izradu modela- 2 GHz	126
Slika 9-10 Rezultati validacije modela- 2 GHz.....	127
Slika 9-11 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene KHM i modelom.....	130
Slika 9-12 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene SRM i modelom.....	131

Popis tablica

Tablica 2-1 Promjer sitnog zrna i najveći dozvoljeni udio [20].....	13
Tablica 2-2 Granulometrijski sastav dodane gline [59]	14
Tablica 3-1 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za pojedine materijale [11]	28
Tablica 3-2 Vrijednosti električne provodnosti za pojedine materijale [11].....	30
Tablica 3-3 Rezultati određivanja debljina sloja [180]	34
Tablica 3-4 Točnost GPR-a [166]	35
Tablica 3-5 Utjecaj vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti zastorne prizme [199]	39
Tablica 3-6 Utjecaj vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti zastorne prizme [26]	41
Tablica 3-7 Utjecaj promijene sastava mješavine na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [207].....	44
Tablica 3-8 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti tucanika s dodanim pijeskom i šljunkom [207]	44
Tablica 3-9 Utjecaj promjene udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti čistog tucanika [207,253]	45
Tablica 3-10 Granulometrijski sastav agregata [254]	47
Tablica 3-11 Granulometrijski sastav dodanog materijala [254]	47
Tablica 3-12 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene SRM [254].....	48
Tablica 3-13 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti određene TDSP [254]	48
Tablica 3-14 Granulometrijski sastav bentonitne gline [23,255]	49
Tablica 3-15 Vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti za različite mješavine osnovnih materijala i bentonitne gline [23,255]	49
Tablica 3-16 Utjecaj udjela vlage na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [257]....	50
Tablica 3-17 Utjecaj promjene stupnja zbijenosti na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti [257].....	50
Tablica 4-1 Kvaliteta materijala s obzirom na rezultate TST-a [28,29].....	53
Tablica 4-2 Veza između vrste materijala i vrijednosti TST-a [27,264].....	54
Tablica 5-1 Usporedba modela za određivanje udjela vlage na temelju vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti [268]	63
Tablica 6-1 Rezultati prosijavanja.....	74
Tablica 6-2 Rezultati areometriranja.....	74

Tablica 6-3 Granično područje granulometrijskog sastava kamenog materijala za izradu nevezanog sloja bez veziva [313].....	75
Tablica 6-4 Određivanje udjela zrna nepovoljnog oblika	77
Tablica 6-5 Rezultati ispitivanja gustoća zrna i upijanje vode.....	81
Tablica 6-6 Rezultati ispitivanja otpornosti na smrzavanje	82
Tablica 6-7 Rezultati prosijavanja.....	86
Tablica 6-8 Rezultati areometriranja.....	86
Tablica 6-9 Udio dodanog sitnozrnatog materijala u pojedinoj mješavini	88
Tablica 6-10 Maseni udio zrna polumjera $\leq 0,02$ mm u pojedinoj mješavini materijala	89
Tablica 6-11 Najveća suhe gustoća i optimalni udio vlage za pojedine mješavine	89
Tablica 6-12 Vrijednosti CBR-a za pojedine mješavine materijala.....	90
Tablica 7-1 Dimenzije otiska air-coupled antena.....	93
Tablica 7-2 Parametri koji se mogu odrediti sandom TDR-315H [347]	95
Tablica 7-3 Parametri i filteri korišteni u provedbi glavnih laboratorijskih istraživanja	98
Tablica 7-4 Srednja vrijednost udjela sitnih zrna za pojedine mješavine materijala	104
Tablica 7-5 Srednje vrijednosti udjeli vlage za pojedine mješavine materijala.....	104
Tablica 7-6 Rezultati TST-a.....	113
Tablica 8-1 Postavke GPR pri provedbi terenskih istražnih radova	115
Tablica 8-2 Prikaz udjela vlage i sitnih zrna na lokacijama u Petrinji.....	116
Tablica 9-1 Rezultati deskriptivne statističke analize- 1 GHz	119
Tablica 9-2 Rezultati Shapiro-Wilk testa- 1 GHz	121
Tablica 9-3 Rezultati deskriptivne statističke analize- 2 GHz	124
Tablica 9-4 Rezultati Shapiro-Wilkov testa- 2 GHz	126
Tablica 9-5 Usporedba vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 1 GHz.....	128
Tablica 9-6 Transformacija vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti- 2 GHz.....	129

Životopis s popisom objavljenih djela

Šime Bezina rođen je 15. ožujka 1988. godine u Splitu. Osnovnu školu Mertojak završio je 2002. godine, nakon čega upisuje Graditeljsko-geodetsku tehničku školu Split. Maturirao je 2006. godine te stekao stručni naziv geodetski tehničar. Na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Splitu 2010. godine završio je stručni preddiplomski studij. Iste godine upisao je preddiplomski sveučilišni studij na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Akademski naziv sveučilišni prvostupnik inženjer građevinarstva stekao je 2012. godine, a naziv sveučilišni magistar inženjer građevinarstva 2014. godine. Poslijediplomski sveučilišni studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Prometnice upisao je 11.11.2015. godine. Od siječnja 2015. do siječnja 2021. godine radio je kao asistent na Zavodu za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, gdje na preddiplomskom studiju održavao vježbe iz kolegija Ceste, a na diplomskom studiju iz kolegija: Cestovna čvorišta, Kolničke konstrukcije i Projektiranje cesta. U periodu od siječnja 2021. do siječnja 2024. godine zaposlen je na Građevinskom fakultetu u Zagreb kao viši stručni suradnik u sklopu projekta Sustav senzora za kontinuirano praćenje ponašanja kolničke konstrukcije pod opterećenjem. Tijekom zaposlenja na fakultetu bio je uključen u stručnu djelatnost zavoda. Sudjelovao je u radu Laboratorija za prometnice te na poslovima obrade i interpretacije podataka prikupljenih georadarom na prometnim površinama. Trenutno je zaposlenik tvrtke TPA održavanje kvaliteta i inovacija d.o.o. gdje radi kao tehnolog za asfalte. U sklopu radnog mjesta prvenstveno se bavi projektiranjem sastava bitumenskih mješavina te kontrolom njihove proizvodnje i ugradnje. Do danas je samostalno i u koautorstvu objavio 2 znanstvena rada u časopisima indeksirana u Current Contents Connect bazi, 5 znanstvenih radova u časopisima indeksiranim u Scopus i Web of Science Core Collection bazama te 15 znanstvenih radova u zbornicima skupova s međunarodnom ili domaćom recenzijom.

Popis radova u časopisima:

- Džambas, Tamara; Čudina Ivančev, Ana; Dragčević, Vesna; Bezina, Šime: Analysis of road traffic noise in an urban area in Croatia using different noise prediction models // Noise mapping, XI (2024), 1; 1-17. doi: 10.1515/noise-2024-0003
- Stančerić, Ivica; Klarić Marko; Bezina, Šime: Redesign of Four-leg Urban Intersection with Light Rail in a Street Corridor: Case Study in Zagreb // Transportation research procedia, 73 (2023), 2023; 41-48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.889>
- Domitrović, Josipa; Bezina, Šime; Stančerić, Ivica; Rukavina, Tatjana: 3D modelling of asphalt concrete overlay based on GPR data // International Journal of Pavement

Engineering, (2021), doi: 10.1080/10298436.2021.2004413

- Bezina, Šime; Stančerić, Ivica; Domitrović, Josipa; Rukavina, Tatjana: Spatial Representation of GPR Data—Accuracy of Asphalt Layers Thickness Mapping // Remote sensing, 13 (2021), 5; 1-22. doi: 10.3390/rs13050864
- Bezina, Šime; Dragčević, Vesna; Stančerić, Ivica: Approach Alignment Impact on the Geometric Design of Urban Roundabouts // Transportation research procedia, 45 (2020), 700-707. doi: 10.1016/j.trpro.2020.02.108
- Ahac, Maja; Ahac, Saša; Devald, Mihael; Bezina, Šime: Analysis of the functional efficiency of small town arterial thoroughfare (Case Study of Našice Town) // Transportation research procedia, 45 (2020), 242-249. doi: 10.1016/j.trpro.2020.03.013
- Stančerić, Ivica; Ahac, Saša; Bezina, Šime; Vlaović, Filip: Granični kutovi presijecanja osi privoza na izvangradskim kružnim raskrižjima // Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, 71 (2019), 5; 389-399. doi: 10.14256/JCE.2029.2017

Popis radova u zbornicima skupova:

- Domitrović, Josipa; Dukić, Marija; Bezina, Šime; Stančerić, Ivica; Rukavina, Tatjana: Reliability of GPR Data Interpretation Methods for Determining the Thickness of Asphalt Layer // Road and Rail Infrastructure VIII, Proceedings of the Conference CETRA 2024 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2024. str. 717-723 doi: 10.5592/CO/CETRA.2024.1652
- Bezina, Šime; Rudeš, Ana; Domitrović, Josipa; Stančerić, Ivica; Rukavina, Tatjana: The Use of Recycled Plastics in Warm Mix Asphalt // Road and Rail Infrastructure VIII, Proceedings of the Conference CETRA 2024 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2024. str. 645-652 doi: 10.5592/CO/CETRA.2024.1736
- Stančerić, Ivica; Puljar-Matić, Marin; Džambas, Tamara; Bezina, Šime: Redesign of Four-Leg Urban Intersection With Light Rail in a Corridor Of Two Streets: Case Study in Zagreb // Road and Rail Infrastructure VIII, Proceedings of the Conference CETRA 2024. Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2024. str. 455-461 doi: 10.5592/CO/CETRA.2024.1534
- Stančerić, Ivica; Bezina, Šime; Stepan, Željko; Džambas, Tamara: Evaluation of Available Sight Distance Estimation Method on Rural Roads According to Croatian Regulation // Road and Rail Infrastructure VIII, Proceedings of the Conference CETRA 2024. Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2024. str. 153-160

doi: 10.5592/CO/CETRA.2024.1532

- Rukavina, Tatjana ; Domitrović, Josipa ; Bezina, Šime ; Stančerić, Ivica: Measuring pavement deflections with sensors: A review // Road and Rail Infrastructure VII, Proceedings of the Conference CETRA 2022 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Transportation,, 2022. str. 465-472 doi: 10.5592/CO/CETRA.2022.1502
- Bezina, Šime ; Stančerić, Ivica ; Rukavina, Tatjana ; Domitrović, Josipa: Influence of data acquisition speed on pavement layer thickness determined by GPR // Road and Rail Infrastructure VII, Proceedings of the Conference CETRA 2022 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Transportation,, 2022. str. 457-463 doi: 10.5592/CO/CETRA.2022.1423
- Stančerić, Ivica ; Tomić, Iris ; Bezina, Šime ; Džambas, Tamara: Road widening in curves according to Croatian regulations, German guidelines and the computer simulation of vehicle movement // Road and Rail Infrastructure VI, Proceedings of the Conference CETRA 2020* / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021. str. 475-482 doi: 10.5592/CO/CETRA.2020.983
- Džambas, Tamara; Dragčević, Vesna; Bezina, Šime; Grgić, Marijan: Reliability of vehicle movement simulation results in roundabout design procedure based on the rules of design vehicle movement geometry // Road and Rail Infrastructure VI / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021. str. 507-515 doi: 10.5592/CO/CETRA.2020.1331
- Domitrović, Josipa; Rukavina, Tatjana; Bezina, Šime; Stančerić, Ivica: Mapping of Runway Pavement Layers Thickness by GPR // Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019) - Challenges in Design and Management of Structures. 2019. str. 208-215
- Bezina, Šime; Cestar, Ivana; Stančerić, Ivica: Računalni programi za provjeru provoznosti na cestovnim raskrižjima // Zajednički temelji 2018 - uniSTem: Šesti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti / Sunara Kusić, Marina ; Galešić, Morena (ur.). Split: Udruga hrvatskih građevinskih fakulteta ; Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, 2018. str. 32-37 doi: 10.31534/CO/ZT.2018.04
- Domitrović, Josipa; Bezina, Šime; Rukavina, Tatjana; Stančerić, Ivica: Investigating the use of GPR for pavement condition assessment // Road and Rail Infrastructure V,

Proceedings of the Conference CETRA 2018 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb, 2018. str. 495-501 doi: 10.5592/CO/CETRA.2018.873

- Bezina, Šime: Primjena računalnih simulacija pri geometrijskom oblikovanju cestovnih raskrižja // ZAJEDNIČKI TEMELJI '17.- Zbornik radova / Gilja, G., Haladin, I., Lukačević, I. (ur.). Zagreb, 2017. str. 55-61
- Bezina, Šime; Stančerić, Ivica; Ahac, Saša: Design vehicles and roundabout safety - review of Croatian design guidelines // Transport Infrastructure and Systems / Dell'acqua, Gianluca; Wegman, Fred (ur.). Leiden: CRC Press; A.A. Balkema Publishers; Taylor & Francis, 2017. str. 237-244
- Bezina, Šime; Stančerić, Ivica: Oblikovanje cestovnih raskrižja u krivinama // 2. Simpozij doktorskog studija građevinarstva / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb, 2016. str. 107-117
- Bezina, Šime ; Stančerić, Ivica ; Ahac, Saša: Swept Path Analysis on Roundabouts for Three-axle Buses - Review of the Croatian Design Guidelines // Road and Rail Infrastructure IV, Proceedings of the Conference CETRA 2016 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2016. str. 901-908

Popis značajnijih stručnih radova:

- Izrada Općih tehničkih uvjeta za radove na cestama, Knjiga VII- Kolnička konstrukcija, naručitelj: Hrvatske ceste d.o.o., 2023.
- The thickness of pavement layers of Apron Z and Taxiway T at Cerklje ob Krki Airport, report no.: 05-23-2/2023, client: TPA d.o.o.; contractor: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering; 2023.
- The thickness of pavement layers of Apron S and Apron U at Cerklje ob Krki Airport, report no.: 03-23-1/2023, client TPA d.o.o.; contractor: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering; 2023.
- Određivanje debljine slojeva kolničke konstrukcije državne ceste DC 232 (dionica Lonja-Jasenovac) georadarom, broj elaborata 01-21-04/2021, naručitelj: Ramtech d.o.o., izvršitelj: Građevinski fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- Prijedlog novog Pravilnika o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljiti sa stajališta sigurnosti prometa, broj elaborata 170 – 280 / PP, Naručitelj: Hrvatske autoceste d.o.o., izvršitelj: Građevinski fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 2020.
- Određivanje ukupne debljine asfaltnih slojeva stajanke Zračne luke Pula, broj elaborata

05-2019/1, naručitelj: Zračna luka Pula, izvršitelj: Građevinski fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 2019.;

- Određivanje debljine asfaltnog sloja uzletno sletne staze zračne luke Split GPR uređajem (od km 0-750,00 do km 1+590,00), broj elaborata 03-18-3/2018, naručitelj: Zračna luka Split, izvršitelj: Građevinski fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 2018.