

# Krutost i čvrstoća zagrebačke gline poboljšane raznim vezivima

---

Lebo, Željko

Doctoral thesis / Disertacija

2024

*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:237:694451>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Željko Lebo

# KRUTOST I ČVRSTOĆA ZAGREBAČKE GLINE POBOLJŠANE RAZNIM VEZIVIMA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Željko Lebo

# **KRUTOST I ČVRSTOĆA ZAGREBAČKE GLINE POBOLJŠANE RAZNIM VEZIVIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević

Zagreb, 2024.



UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Željko Lebo

**STIFFNESS AND STRENGTH OF ZAGREB CLAY  
IMPROVED WITH DIFFERENT BINDERS**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Ph.D. Meho Saša Kovačević, full professor

Zagreb, 2024

## ZAHVALE

Zahvaljujem svojem mentoru, prof.dr.sc Mehi Saša Kovačeviću na velikoj pomoći koju mi je pružio pri izradi ove disertacije, na iskrenim savjetima i korisnim raspravama te omogućio provedbu pokusa u laboratoriju Zavoda za geotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Osobito zahvaljujem svojoj supruzi Snježani i djeci Dariji, Ivanu i Lani, na motivaciji i neiscrpnj podršci, koju su mi pružili za vrijeme izrade ovoga rada.

## **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.

Potpis:

mr.sc. Željko Lebo

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Željko Lebo', with a long, sweeping underline.

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	i
POPIS TABLICA .....	iv
POPIS SLIKA .....	v
SAŽETAK .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. UVOD .....	1
1.1. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA .....	1
1.2. CILJ ISTRAŽIVANJA .....	3
1.3. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA .....	3
1.4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA .....	4
1.5. STRUKTURA RADA .....	6
1.6. PRIMJENA ISTRAŽIVANJA .....	9
2. ZAGREBAČKA GLINA KAO PRIRODNI MATERIJAL .....	10
2.1. UVOD .....	10
2.2. GEOLOŠKI NASTANAK GLINENOG TLA .....	12
2.3. VRSTE GLINA .....	15
2.4. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ZAGREBAČKE GLINE .....	21
2.5. KARAKTERISTIKE ZAGREBAČKE GLINE UPOTREBLJENE ZA ISPITIVANJE U LABORATORIJU .....	24
2.6. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI .....	26
3. CEMENT KAO VEZIVO .....	27
3.1. UVOD .....	27
3.2. OPĆENITO O CEMENTU .....	29
3.3. MINERALOŠKI I KEMIJSKI SASTAV .....	33
3.4. GEOTEHNIČKE KARAKTERISTIKE CEMENTA .....	41
3.5. PRIMJENA CEMENTA U GEOTEHNICI .....	44
3.6. KARAKTERISTIKE CEMENTA UPOTREBLJENOG U LABORATORIJSKIM ISPITIVANJIMA .....	47
3.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI .....	48
4. LETEĆI PEPEO KAO VEZIVO .....	49
4.1. UVOD .....	49

4.2. MINERALOGIJA I KEMIJSKI SASTAV LETEĆEG PEPELA .....	60
4.3. GEOTEHNIČKE KARAKTERISTIKE LETEĆEG PEPELA .....	69
4.4. PRIMJENA LETEĆEG PEPELA U GEOTEHNICI .....	78
4.5. PREGLED LETEĆEG PEPELA HRVATSKOJ I OKOLICI .....	105
4.6. KARAKTERISTIKE LETEĆEG PEPELA UPOTREBLJAVANOG U LABORATORIJSKIM ISPITIVANJIMA .....	115
4.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI .....	116
5. ZGURA KAO VEZIVO .....	117
5.1. UVOD .....	117
5.2. OPĆENITO O ZGURI .....	118
5.3. KEMIJSKI SASTAV ZGURE .....	125
5.4. GEOTEHNIČKE KARAKTERISTIKE ZGURE .....	132
5.5. PRIMJENA ZGURE U GEOTEHNICI .....	135
5.6. KARAKTERISTIKE ZGURE UPOTREBLJAVANE U LABORATORIJSKIM ISPITIVANJIMA .....	137
5.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI .....	138
6. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE KRUTOSTI I ČVRSTOĆE GLINE .....	139
6.1. 139	
6.2. UVOD .....	139
6.3. NAPONSKO DEFORMACIJSKI ODNOSI .....	140
6.4. ISPITIVANJE JEDOOSNE I NEDRENIRANE ČVRSTOĆE GLINE .....	143
6.5. SLOM TLA I POSMIČNA ČVRSTOĆA .....	146
6.6. ISPITIVANJE KRUTOSTI KOMPRESIJOM .....	148
6.7. PREGLED KRUTOSTI TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA .....	150
6.8. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI .....	156
7. IZRADA I PRIPREMA KOMPOZITNIH UZORAKA U LABORATORIJU .	157
7.1. 157	
7.2. UVOD .....	157
7.3. OPĆENITO O UREĐAJU ZA ISPITIVANJE KOMPRESIJOM .....	158
7.4. IZRADA UZORAKA KOMPOZITA GLINE I VEZIVA .....	162
7.5. JEDNOOSNO ISPITIVANJE UZORAKA KOMPOZITA GLINE I VEZIVA 165	
8. REZULTATI ISPITIVANJA KOMPOZITNIH UZORAKA GLINE I VEZIVA	169



8.1. UVOD .....	169
8.2. ISPITIVANJE UZORAKA KOMPOZITA GLINE I CEMENTA .....	170
8.3. ISPITIVANJE UZORKA GLINE I LETEĆEG PEPELA .....	175
8.4. ISPITIVANJE UZORKA GLINE I ZGURE .....	181
8.5. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI .....	185
9. ANALIZE REZULTATA I NOVE SPOZNAJE PONAŠANJA ZAGREBAČKE GLINE POBOLJŠANE RAZNIM VEZIVIMA .....	186
9.1. UVOD .....	186
9.2. ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA KOMPOZITA .....	187
9.3. ANALIZE KOMPOZITA U VREMENSOJ DOMENI .....	195
9.4. ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA NORMALIZACIJOM .....	207
9.5. UTJECAJ VLAŽNOSTI NA MEHANIČKE KARAKTERISTIKE KOMPOZITA GLINE I VEZIVA .....	217
9.6. KARAKTERISTIČNA PONAŠANJA ČVRSTOĆE I KRUTOSTI ZAGREBAČKE GLINE POBOLJŠANE RAZLIČITIM VEZIVIMA .....	231
9.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI .....	251
10. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA .....	252
10.1. ZAKLJUČCI .....	252
10.2. PREPORUKE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA .....	255
LITERATURA .....	256

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Laboratorijska analiza uzorka gline s lokaliteta Dolac .....	25
Tablica 2.2. Laboratorijska analiza uzorka gline s lokaliteta Dolac .....	25
Tablica 3.1. Spojevi minerala cementa i najznačajnije karakteristike (Mandić i dr., 2023) .....	34
Tablica 3.2. Primjer kemijskog sastava sirovina za portlandski klinker (Mandić i dr. 2023) .....	36
Tablica 3.3. Podjela veziva prema načinu otvrdnjavanja (Mandić i dr., 2023) .....	39
Tablica 3.4. Svojstva silikatnog cementa (Ukrainczyk, 1994) .....	42
Tablica 3.5. Fizikalna i kemijska svojstva Holcim Expert® cementa i usporedba s normom HRN EN 197-1 i BAS EN 197:1 .....	47
Tablica 4.1. Postotci osnovnih sastojaka letećeg pepela pri izgaranju različitih ugljena (Izveštaj Američkog Instituta za Beton, 2010). .....	62
Tablica 4.2. Podjela letećih pepela prema cementirajućim karakteristikama i pripadajuće jednoosne tlačne čvrstoće (ASTM D 5239) .....	67
Tablica 4.3. Podjela letećih pepela na klase (ASTM D 5239) .....	67
Tablica 4.4. Koeficijenti propusnosti ovisno o vrsti tla (prema Santos i dr., 2011) .....	76
Tablica 4.5. Kemijski sastav letećeg pepela TE Plomin (www.hep.hr) .....	107
Tablica 4.6. Kemijski sastav letećeg pepela TE u Republici Sloveniji (www.te- sostanj.si) .....	108
Tablica 4.7. Kemijski sastav letećih pepela TE u Bosni i Hercegovini (www.elektroenergetika.info/he-bih).....	112
Tablica 4.8. Godišnja proizvodnja letećeg pepela u TE u Republici Srbiji (www.eps.rs)	113
Tablica 4.9. Kemijski sastav letećih pepela TE u Republici Srbiji (www.eps.rs) .....	114
Tablica 4.10. Kemijski sastav uzorka letećeg pepela (TE Plomin) .....	115
Tablica 5.1. Minerali prisutni u željeznoj zguri (Gojić, 2005.) .....	128
Tablica 5.2. Raspon kemijskog sastava čelične zgure (Yildirim i Prezzi, 2011) .....	129
Tablica 5.3. Minerali prisutni u čeličnoj zguri (Shi, 2002.) .....	131
Tablica 5.4. Primjena elektropečnih i visokopećnih zgura (Proctor i dr., 2000) .....	136
Tablica 5.5. Kemijske karakteristike uzorka zgure (Holcim d.o.o.) .....	137
Tablica 6.1. Prikaz elastičnih konstanti po teoriji elastičnosti .....	141

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Shema stijenskog kružnog toka (Grgić i dr., 2007) .....	12
Slika 2.2. Satelitski prikaz eksploatacijskih polja zagrebačke gline, Grmošnica, Novačić i Soblinec (HGI, 2013).....	23
Slika 2.3. Lokaliteti uzorkovanja gline, Krematorij i Dolac u gradu Zagrebu (Lebo i dr., 2021) .....	24
Slika 3.1. Proces proizvodnje cementa (Vrkljan i Klanfar, 2010.) .....	31
Slika 4.1. Izgled letećeg pepela, s većim udjelom kalcija (a), s većim udjelom organskih tvari (b), (Kumar i dr., 2011) .....	50
Slika 4.2. Shema industrijskog procesa nastajanja pepela (Turuallo i dr., 2018) .....	51
Slika 4.3. Potencijalni „tok“ letećeg pepela pri suhom odlaganju .....	55
Slika 4.4. Lagune za odlaganje letećeg pepela mokrim postupkom (www.hindu.com) .	56
Slika 4.5. Puknuće nasipa na lokaciji Kingston, Tennessee, SAD i posljedično onečišćenje letećim pepelom (www.tva.com) .....	57
Slika 4.6. Usporedba koncentracije toksičnih sastojaka letećeg pepela i tla (EPRI, 2010)	63
Slika 4.7. Usporedba koncentracije toksičnih sastojaka letećeg pepela s dopuštenim vrijednostima prema “Američkoj agenciji za zaštitu životne sredine” (EPRI, 2010) .....	64
Slika 4.8. Izgled čestica letećeg pepela pod elektronskim mikroskopom (uvećanje 2000 puta) (Lane i dr., 1982) .....	70
Slika 4.9. Izgled plesosfera (Goodarzi i dr., 2009) .....	71
Slika 4.10. Granulometrijski sastav tipičnih tala (prema Pandian, 2004) .....	71
Slika 4.11. Smanjenje granica vlažnosti u mješavinama tla i letećeg pepela, a uslijed povećanja sadržaja letećeg pepela ( prema Amadi, 2010) .....	73
Slika 4.12. Tipična krivulja odnosa gustoće i vlažnosti, rezultat Proctorovog pokusa (Duvnjak i dr., 2022.).....	74
Slika 4.13. Ugradnja CSLM-a (www.rockhillconcrete.com) .....	80
Slika 4.14. CSLM kao materijal ispune uz zid konstrukcije (Smith, 1991) .....	81
Slika 4.15. Usporedba cementnog veziva i veziva koje ne sadrži cement (Kovačević i dr., 2008.). .....	84
Slika 4.16. Stvaranje površinskih pukotina kao posljedica isušivanja tla (O’Neill i dr., 1980) .....	85

Slika 4.17. Konstrukcijski slom kao posljedica isušivanja tla, slom objekta (a), slom cestovne konstrukcije (b) ( <a href="http://www.civilease.com">www.civilease.com</a> ) .....	86
Slika 4.18. Shema miješanja prethodno nanesenog stabilizatora i tla (Kuelh i dr., 2017.)	91
Slika 4.19. Strojna ugradnja letećeg pepela u cilju stabilizacije tla (Kuelh i dr., 2017.)	91
Slika 4.20. Shema ojačanja tla dubinskim miješanjem (Hansson, 2008) .....	92
Slika 4.21. Stvaranje “umjetnog” sloja kod izvođenja dijafragme, pretežno sastavljenog od letećeg pepela .....	93
Slika 4.22. Nanošenje mlaznog betona u tunelima (GF- Tunelogradnja) .....	94
Slika 4.23. Nanošenje mlaznog betona na stijenskim pokosima (GF- Tunelogradnja) ..	94
Slika 4.24. Shema nanošenja mlaznog betona, suhim postupkom (a), mokrim postupkom (b) (GF- Tunelogradnja).....	95
Slika 4.25. Postupak mjerenja inklinometrom s naznačenim položajem injekcijske smjese (prema Mikkelsen, 2002) .....	99
Slika 4.26. Tipični poprečni presjek nasipa (SEPA, 2014) .....	100
Slika 4.27. Poprečni presjek nasipa čije je tijelo formirano od letećeg pepela .....	101
Slika 4.28. Lokacije termoelektrana na ugljen u Republici Hrvatskoj i regiji .....	105
Slika 4.29. TE Plomin ( <a href="http://www.hep.hr">www.hep.hr</a> ) .....	106
Slika 4.30. TE u Republici Srbiji – TE Šošanj (a), TE Trbovlje (b), TE Ljubljana (c)	108
Slika 4.31. Položaj rudnika ugljena i termoelektrana u BiH (ESSBIH, 2008) .....	109
Slika 4.32. Potrošnja ugljena u BIH u energetske sektoru 2021. Godine (Agencija za statistiku BiH 2023) .....	110
Slika 4.33. TE u Bosni i Hercegovini – TE Tuzla (a), TE Ugljevik (b), TE Gacko (c), TE Kakanj (d) ( <a href="http://www.elektroenergetika.info/he-bih">www.elektroenergetika.info/he-bih</a> ) .....	111
Slika 4.34. TE u Republici Srbiji – TE Nikola Tesla (a), TE Kolubara (b), TE Kostolac (c), TE Morava (d) ( <a href="http://www.eps.rs">www.eps.rs</a> ) .....	113
Slika 5.1. Razvrstavanje željeznih zgura prema mjestu nastanka (Sofilić, 2011) .....	119
Slika 6.1. Različiti modeli deformacija tla pri promjeni napreznja (Lebo, 2011) .....	141
Slika 6.2. Uzorka u jednoosnom stanju napreznja (Jurić Kačunić, 2009). .....	143
Slika 6.3. Naponsko deformacijska krivulja za jednoosno ispitivanje gline .....	145
Slika 6.4. Linearno elastičan-idealno plastičan odnos efektivnih napreznja i deformacija .....	146
Slika 6.5. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće .....	147
Slika 6.6. Srednji modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku (Jurić Kačunić, 2009). .....	148

Slika 6.7. Tangentni modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku (Jurić Kačunić, 2009).	149
Slika 6.8. Sekantni modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku (Jurić Kačunić, 2009).	.. 149
Slika 6.9. Bender elementi tvrtke GDS u troosnom uređaju Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Lebo, 2011)	..... 153
Slika 6.10. Dijagrami $G - \gamma$ , rezultata ispitivanja posmične krutosti gline prema nekim autorima (Matešić, 2002)	..... 155
Slika 7.1. Uređaja za ispitivanje kompresijom (jednoosne tlačne čvrstoće) u laboratoriju Zavoda za geotehniku na Građevinskm fakultetu Sveučilišta u Zagrebu	... 159
Slika 7.2. Pozicije LVDT osjetila na uređa za ispitivanje kompresijom (laboratorij Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu)	..... 160
Slika 7.3. Uređaja za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka u geotehničkom laboratoriju tvrtke GEOTEST d.o.o. iz Zagreba	..... 161
Slika 7.4. U gornjem redu su veziva (LP)-leteći pepeo, (C)-cement i (Z)-zgura, ispod je osnovni glineni materijal (M)	..... 162
Slika 7.5. Uzorak gline propremljen za miješanje sa vezivom	..... 163
Slika 7.6. Spravljanje (miješanje) kompozitne smjese gline i veziva	..... 164
Slika 7.7. Formiranje uzorka, stavljanje smjese gline i veziva u plastični kalup	..... 164
Slika 7.8. Označavanje uzoraka i čuvanje u staklenom desikatoru	..... 165
Slika 7.9. Vađenje uzorka iz kalupa	..... 165
Slika 7.10. Izvađeni uzorci iz kalupa pripremljeni za mjerenje i vaganje	..... 166
Slika 7.11. Mjerenje promjera uzorka na vrhu i dnu u dva okomita smjera	..... 166
Slika 7.12. Mjerenje visine uzorka u dvije okomite ravnine	..... 167
Slika 7.13. Umetanje uzorka na postolje uređaja i pozicioniranje LVDT	..... 167
Slika 7.14. Uzorak u aparatu za vrijeme i nakon jednoosnog smicanja	..... 168
Slika 7.15. Uzorci nakon jednoosnog smicanja	..... 168
Slika 8.1. Grafički prikaz rezultata jednoosnog pokusa u laboratoriju GF	..... 169
Slika 8.2. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij	..... 170
Slika 8.3. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij	..... 170
Slika 8.4. Rezultat ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij	..... 171

Slika 8.5. Rezultat ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac .....	172
Slika 8.6. Rezultat ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac .....	172
Slika 8.7. Rezultat ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac .....	173
Slika 8.8. Rezultat ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij .....	175
Slika 8.9. Rezultat ispitivanja modula stišljivosti uzorka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij .....	175
Slika 8.10. Rezultat ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij .....	176
Slika 8.11. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline s lokaliteta Dolac .....	178
Slika 8.12. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline s lokaliteta Dolac .....	178
Slika 8.13. Rezultat ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline s lokaliteta Dolac ..	179
Slika 8.14. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i zgure s lokaliteta Krematorij.....	181
Slika 8.15. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline i zgure s lokaliteta Krematorij .....	181
Slika 8.16. Rezultati ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i zgure s lokaliteta Krematorij .....	182
Slika 8.17. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i zgure s lokaliteta Dolac.....	183
Slika 8.18. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline i zgure s lokaliteta Dolac .....	183
Slika 8.19. Rezultati ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i zgure s lokaliteta Dolac .....	184
Slika 9.1. Analize ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i cementa, Krematorij i Dolac .....	187
Slika 9.2. Analiza ispitivanja modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i cementa, Krematorij i Dolac .....	187

Slika 9.3. Analiza ispitivanja vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa, Krematorij i Dolac .....	188
Slika 9.4. Analize ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i letećeg pepela, Krematorij i Dolac .....	190
Slika 9.5. Analize ispitivanja modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela, Krematorij i Dolac .....	190
Slika 9.6. Analize ispitivanja vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela, Krematorij i Dolac .....	191
Slika 9.7. Analize ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i zgure, Krematorij i Dolac .....	192
Slika 9.8. Analize ispitivanja modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure, Krematorij i Dolac .....	192
Slika 9.9. Analize ispitivanja vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure, Krematorij i Dolac .....	193
Slika 9.10. Analize rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće sa udjelom svih veziva za starost od 7 dana, Krematorij i Dolac .....	195
Slika 9.11. Analize rezultata ispitivanja modula elastičnosti sa udjelom svih veziva za starost od 7 dana, Krematorij i Dolac .....	196
Slika 9.12. Analize rezultata ispitivanja vlažnosti sa udjelom svih veziva za starost od 7 dana, Krematorij i Dolac .....	197
Slika 9.13. Analize rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće sa udjelom svih veziva za starost od 14 dana, Krematorij i Dolac .....	199
Slika 9.14. Analize rezultata ispitivanja modula elastičnosti sa udjelom svih veziva za starost od 14 dana, Krematorij i Dolac .....	200
Slika 9.15. Analize rezultata ispitivanja vlažnosti sa udjelom svih veziva za starost od 14 dana, Krematorij i Dolac .....	201
Slika 9.16. Analize rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće sa udjelom svih veziva za starost od 28 dana, Krematorij i Dolac .....	203
Slika 9.17. Analize rezultata ispitivanja modula elastičnosti sa udjelom svih veziva za starost od 28 dana, Krematorij i Dolac .....	204
Slika 9.18. Analize rezultata ispitivanja vlažnosti sa udjelom svih veziva za starost od 28 dana, Krematorij i Dolac .....	205

Slika 9.19. Normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitete Krematorij i Dolac .....	207
Slika 9.20. Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitete Krematorij i Dolac .....	208
Slika 9.21. Normalizirane vrijednosti vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitete Krematorij i Dolac .....	209
Slika 9.22. Normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitete Krematorij i Dolac .....	210
Slika 9.23. Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitete Krematorij i Dolac .....	211
Slika 9.24. Normalizirane vrijednosti vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitete Krematorij i Dolac .....	212
Slika 9.25. Normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitete Krematorij i Dolac .....	214
Slika 9.26. Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitete Krematorij i Dolac .....	215
Slika 9.27. Normalizirane vrijednosti vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitete Krematorij i Dolac .....	216
Slika 9.28. Prikaz omjera jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij .....	217
Slika 9.29. Prikaz omjera jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac .....	218
Slika 9.30. Prikaz omjera modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij .....	219
Slika 9.31. Prikaz omjera modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac .....	220
Slika 9.32. Prikaz omjera jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij.....	222
Slika 9.33. Prikaz omjera jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Dolac.....	223
Slika 9.34. Prikaz omjera modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij .....	224



Slika 9.35. Prikaz omjera modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Dolac .....	225
Slika 9.36. Prikaz omjera jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure s lokaliteta Krematorij .....	227
Slika 9.37. Prikaz omjera jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure s lokaliteta Dolac .....	228
Slika 9.38. Prikaz omjera modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure s lokaliteta Krematorij.....	229
Slika 9.39. Prikaz omjera modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure s lokaliteta Dolac.....	230
Slika 9.40. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kompozita gline i cementa za lokalitet Krematorij .....	231
Slika 9.41. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitet Dolac .....	234
Slika 9.42. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitet Krematorij i Dolac.....	237
Slika 9.43. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitet Krematorij .....	238
Slika 9.44. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitet Dolac .....	240
Slika 9.45. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitet Krematorij i Dolac .....	243
Slika 9.46. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitet Krematorij .....	244
Slika 9.47. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitet Dolac .....	247
Slika 9.48. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitet Krematorij i Dolac .....	250

## SAŽETAK

Poboljšanje tla predstavlja kontroliranu promjenu stanja, svojstava ili ponašanja tla radi postizanja planiranih i zadovoljavajućih rezultata postojećih ili predviđenih inženjerskih zahvata. Tehnologija dubinskog miješanja koristi mehaničke strojeve za razbijanje strukture tla, dok se vezivno sredstvo unosi u tlo kako bi se stvorili elementi različitih oblika i konfiguracija. Krajnji rezultat ovog postupka je povećana krutost i čvrstoća mekih tala. Veliki potencijal za primjenu industrijskih otpadnih materijala u dubinskom miješanju tla imaju zgura i leteći pepeo. Smanjenje upotrebe cementa i vapna doprinosi smanjenju emisije CO<sub>2</sub>.

Ovaj doktorski rad pruža uvid u krutost i čvrstoću zagrebačke gline poboljšane upotrebom veziva poput letećeg pepela, zgure i cementa. Rad detaljno opisuje postupak poboljšanja proveden u laboratorijskim uvjetima, kao i varijacije rezultata ispitivanja jednoosne čvrstoće i modula elastičnosti na uzorcima pripremljenim s različitim udjelima pojedinih komponenata veziva i zagrebačke gline.

Cilj ovog istraživanja jest razumjeti mehaničko ponašanje zagrebačke gline poboljšane različitim vezivima u različitim uvjetima tla. Time će se omogućiti određivanje fizikalnih i mehaničkih parametara potrebnih za projektiranje održivog poboljšanja zagrebačke gline, temeljenog na rezultatima standardnih laboratorijskih ispitivanja. Istraživanja su pokazala da se krutost prirodne gline može značajno povećati dodatkom određenih vrsta veziva, no to povećanje nije isto na svakoj lokaciji, zbog čega nije moguće dati univerzalno rješenje.

Za potrebe istraživanja u laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu ispitana su 432 uzorka kompozita zagrebačke gline i veziva (cementa, letećeg pepela i zgure).

Ključne riječi: krutost, čvrstoća, zagrebačka glina, cement, leteći pepeo, zgura,

## **ABSTRACT**

Soil improvement is a controlled change in the condition, nature or behavior of the soil due to the achievement of planned and satisfactory results of existing or designed engineering interventions. Deep mixing technology breaks down the soil structure with the help of mechanical machines, the binder is mixed into the soil and elements in the soil of various shapes and configurations are obtained. The end result is improved stiffness and strength of soft soils. The use of slag and fly ash has great potential for the use of industrial waste materials in deep soil mixing. Reducing cement and lime consumption will help reduce CO<sub>2</sub> emissions.

This doctoral thesis provides insight into the stiffness and strength of Zagreb clay improved with binders such as fly ash, slag and cement. The paper describes a detailed procedure for improvement in laboratory conditions, and the variation of uniaxial strength and modulus of elasticity test results on samples made with different proportions of each binder component and Zagreb clay.

The main goal of this research is to investigate a better understanding of the mechanical behavior of Zagreb clay improved by different binders in different soil conditions. This will enable the determination of mechanical parameters necessary for the design of sustainable improvement of Zagreb clay based on the results of standard laboratory experiments.

For research purposes, 432 samples of composites of Zagreb clay and binders (cement, fly ash and slag) were tested in the laboratory of the Faculty of Civil Engineering of the University of Zagreb.

Key words: stiffness, strength, zagreb clay, cement, fly ash, slag

## 1. UVOD

### 1.1. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Krutost i čvrstoća gline ključni su parametri za svaku numeričku analizu geotehničkih konstrukcija te predstavljaju jednu od najvažnijih zadaća u geotehničkom inženjerstvu. Glina je vrlo složen i heterogen materijal, često s različitim parametrima čvrstoće i krutosti koji ovise o geološkom podrijetlu, stupnju saturacije, stupnju konsolidacije, koeficijentu pora, relativnom porozitetu, kao i parametrima čvrstoće i modulu stišljivosti.

Šire područje Zagreba obuhvaća dvije osnovne strukturne jedinice: Medvednicu na sjeveru i Savsku potolinu južno od grada, odvojene reverznim rasjedom sjeveroistok-jugozapadnog pružanja koji prolazi središtem grada. Južno od rasjeda nalazi se površinska strukturna jedinica sastavljena od aluvijalnih naslaga prve i druge savske terase. Ove naslage, koje čine šljunak i pijesak, protežu se do dubine od desetak metara, prekriveni su tanjim slojem pjeskovitih i prahovitih glina. U podlozi se nalaze slojevi prekonsolidirane krute gline sa sličnim mehaničkim svojstvima, koji dosežu značajne dubine (Milaković, 2012).

Izgradnja podzemne željeznice i spuštanje postojeće željezničke mreže u podzemlje u središtu Zagreba predviđena je kao rješenje za bolje iskorištavanje prostora, integraciju transportnog sustava, smanjenje prometnih zagušenja i emisije štetnih tvari te povećanje kvalitete života u gradu (Pološki i dr., 2011). Većina tih podzemnih radova odvijala bi se u slojevima zagrebačke gline. Jedna od mjera za osiguranje stabilnosti podzemnih objekata uključuje održivo poboljšanje mehaničkih svojstava zagrebačke gline miješanjem s vezivima koja minimiziraju emisiju štetnih plinova.

Poboljšanje tla je tehnološki postupak kojim se povećava nosivost tla na slom (čvrstoća), kontrolira ukupno i diferencijalno slijeganje, smanjuje vrijeme potrebno za deformacije, smanjuje propusnost tla, uklanja voda stvaranjem unutarnjih drenažnih sustava, povećava erozijska stabilnost tla i smanjuje rizik od likvefakcije. To je kontrolirana promjena stanja, prirode ili ponašanja temeljnog tla s ciljem postizanja

planiranih i zadovoljavajućih rezultata postojećih ili projektiranih inženjerskih zahvata. Korištenjem mehaničkih strojeva za miješanje tla, vezivno sredstvo se unosi u tlo i formiraju se različiti oblici i konfiguracije u tlu (Madhyannapu i dr., 2010). Razni tehnološki postupci zbijanja i miješanja omogućuju da se prirodno tlo pretvori u novi materijal poboljšanih fizikalno-mehaničkih svojstava (Yee i Ooi, 2010). U tlo se unose prirodni ili umjetni materijali koji u manjoj ili većoj mjeri mogu utjecati na okoliš i podzemne izvore vode (Cerić i Kovačević, 2010).

Proizvodnja cementa i vapna kao standardnih vezivnih materijala troši velike količine prirodne sirovine i fosilnih goriva, uz oslobađanje velike količine CO<sub>2</sub> u atmosferu zbog kemijskog procesa dekarbonatizacije CaCO<sub>3</sub>. Međutim, hidratacija vezivnih materijala omogućava stvaranje sintetskih veziva, tzv. geopolimera (McLellan i dr., 2011). Korištenjem sintetskih veziva moguće je smanjiti udio cementa i vapna, dok se industrijski otpad, poput zgure i letećeg pepela, može upotrijebiti za poboljšanje tla (Sreevidya i dr., 2010; Habert i dr., 2011). Maseni udio cementa i vapna za poboljšanje tla iznosi 2% do 5%, a svako smanjenje potrošnje doprinosi očuvanju prirodnih resursa i smanjenju emisije CO<sub>2</sub>. Za poboljšanje jedne tone tla potrebno je 20 kg cementa, 30 kg prirodne sirovine i 96 MJ fosilnih goriva, uz emisiju 18 kg CO<sub>2</sub> u atmosferu (Kovačević i dr., 2008).

Korištenje industrijskih otpadnih materijala, poput zgure i letećeg pepela, u dubinskom miješanju tla ima velik potencijal za održivo poboljšanje tla. Tehnologija dubinskog miješanja pomoću mehaničkih strojeva razbija strukturu tla i miješa vezivno sredstvo, stvarajući različite oblike i konfiguracije u tlu (Kovačević i dr., 2014). Zgura, kao nusprodukt pročišćavanja metala, dostupna je u Hrvatskoj iz željezara u Sisku i Splitu u količini od oko 1.8 milijuna tona. Leteći pepeo, sekundarni proizvod izgaranja ugljena u termoelektranama, također je dostupan, posebno u Bosni i Hercegovini, gdje su značajne količine odloženog letećeg pepela koji bi se mogao upotrijebiti za poboljšanje tla.

Mnoga istraživanja diljem svijeta pokazala su učinkovitost letećeg pepela u smanjenju ekspanzivnosti glina (Zhang i Xing, 2002; Phani i Sarma, 2004; Nalbantoglu, 2004; Kate, 2005), kao i učinkovitost zgure (Higgins i dr., 1998; Wild i dr., 1999; Veith,

2000). Ahnberg i dr. (2003) istraživali su poboljšanje švedskih glina različitim vezivima, dok su Ahnberg i Johansson (2005) proučavali povećanje čvrstoće tijekom vremena kod švedskih glina s različitim vezivima, ovisno o vrsti i količini veziva. Istraživanja na indijskim (Gupta i dr., 2012; Yadu i dr., 2011), egipatskim (El Sadek, 2011), iračkim (Al-Dahlaki, 2007), talijanskim (Cortellazzo i Cola, 1999), irskim (Hebib i Farrell, 1999), engleskim (Sherwood, 1993) i njemačkim glinama (Stocker i Seidel, 2005) pokazuju da glina, poboljšana istom vrstom veziva u istim uvjetima, ima različite mehaničke karakteristike.

Čvrstoća i krutost poboljšane gline ne ovise samo o mješavini i količini veziva, već i o faktorima poput stupnja saturacije, stanja napreznja i uvjeta dreniranja u tlu. S obzirom na sve navedeno, postoji potreba za provođenjem opsežnog istraživanja krutosti i čvrstoće zagrebačke gline poboljšane različitim vezivima.

## **1.2. CILJ ISTRAŽIVANJA**

Glavni cilj predloženog istraživanja je bolje razumijevanje mehaničkog ponašanja zagrebačke gline poboljšane različitim vezivima u različitim uvjetima u tlu. Osim glavnog cilja predviđa se uspostava veze između prirasta i konačne vrijednosti vlažnosti, krutosti i čvrstoće poboljšane zagrebačke gline te vrste i količine korištenog veziva. To će omogućiti određivanje mehaničkih parametara potrebnih za projektiranje održivog poboljšanja zagrebačke gline na temelju rezultata standardnih laboratorijskih pokusa u tlu.

## **1.3. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA**

Osnovna hipoteza rada je da se krutost i čvrstoća zagrebačke gline mogu značajno povećati miješanjem s različitim sintetskim vezivima koji će emisiju štetnih plinova smanjiti na najmanju moguću mjeru. Uvođenjem sintetskih veziva moguće je smanjiti udio cementa i vapna u postupku poboljšanja zagrebačke gline korištenjem otpadnih materijala iz drugih industrijskih procesa kao što su zgura i leteći pepeo.

## 1.4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Metodologija znanstvenog istraživanja uključuje metode analize i sinteze, metode mjerenja, eksperimentalne metode, metode uzoraka i statističke metode.

Znanstveno istraživanje je podijeljeno u 5 faza:

### *Faza 1: Teorijska istraživanja.*

U prvoj fazi istraživanja obavljen je sustavni pregled literature u cilju prikupljanja raspoloživih saznanja određivanja čvrstoće i krutosti gline pomješanje raznim vezivima kao što su cement, leteći pepeo i zgura. Napravljen je literaturni pregled dosadašnjih spoznaja o krutosti i čvrstoći različitih vrsta glina poboljšanih različitim vrstama veziva, s posebnim osvrtom na primjenu industrijskih otpadnih materijala kao što su zgura i leteći pepeo. Prikupljanje i analiza dostupnih rezultata ispitivanja mehaničkih karakteristika zagrebačke gline. Analiza parametara tla, parametara veziva i uvjeta u tlu koji utječu na krutost i čvrstoću poboljšane gline.

### *Faza 2: Laboratorijska istraživanja.*

Na velikom broju uzoraka zagrebačke gline izvađenih iz bušotina na različitim lokacijama u središnjem dijelu Zagreba provedeno je ispitivanje različitih svojstava gline prije poboljšanja kao što su: mineraloški sastav, sadržaj karbonata, gustoća, prirodna vlažnost, granice konzistencije, nedrenirana posmična čvrstoća, krutost i čvrstoća pri jednoosnom i troosnom smicanju. Nakon miješanja sa vezivima u različitim vremenskim intervalima provedena su laboratorijska ispitivanja kompozita, odnosno mješavine gline i veziva, koja će dovesti do kvalitetnijeg razumijevanja ponašanja poboljšane zagrebačke gline. Pokusi jednoosnog smicanja, kao brzi i jednostavni pokusi korišteni su za usporedbu utjecaja različitih količina i mješavina veziva na prirast krutosti i čvrstoće poboljšane zagrebačke gline. Za kvalitetnije razumijevanja utjecaja različitih veziva obavljeno je ispitivanje vlažnosti kompozitnog uzorka i mješavina pri slomu. Ukupno je provedeno više od 400 različitih laboratorijskih pokusa.

*Faza 3: Sređivanje i obrada podataka.*

Izrada strukturirane baze podataka o provedenim laboratorijskim ispitivanjima prije i poslije poboljšanja zagrebačke gline različitim vezivima.

*Faza 4: Primjena metoda statističke analize.*

Uspostava metodologije između prirasta i konačne vrijednosti mehaničkih svojstava poboljšane zagrebačke gline (vlažnost, krutost i čvrstoća pri jednoosnom smicanju) i vrste i količine korištenog veziva.

*Faza 5: Sinteza i analiza rezultata istraživanja.*

Prikaz novih spoznaja o ponašanju zagrebačke gline poboljšane različitim vrstama veziva kao što su cement, leteći pepeo i zgura, te utjecaju niza faktora kao što su vlažnost, količina veziva, starost kompozitnog uzorka, stanje naprezanja, uvjeti dreniranja.



## 1.5. STRUKTURA RADA

Rad se sastoji iz 10 poglavlja uključujući Uvod. Sadržaj ostalih poglavlja prikazan je u nastavku.

### *Poglavlje 2. Zagrebačka glina kao prirodni materijal*

U ovom poglavlju prikazani su geološki aspekti nastanka gline kao prirodnog materijala u zemljinoj kori. Na poseban način je opisana morfologija tla uz tri ležišta gline u okolici grada Zagreba. Urbanizacijom grada Zagreba glinokopi su se našli gotovo u središtu grada Zagreba, pa su eksploatacijska polja danas zatvorena. Međutim glina nije nestala, već je i dalje prisutna u savskoj potolini podno Sljemena ispod grada Zagreba iz čega i proizilazi sam naziv zagrebačka glina

### *Poglavlje 3. Cement kao vezivo*

U ovom poglavlju prikazane su osnovne karakteristike cementa kao veziva koji se primjenjuje u građevinarstvu. Opisan je postupak dobivanja cementa u industriji, te je navedena osnovna podjela na silikatne i aluminatne cimente. Prikazan je kemijski sastav cementa uz ostale fizikalne karakteristike i navedene su norme u RH kojima se klasificira proizvodnja cementa i puštanje na tržište. Prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće cementa koji se koristi u građevinarstvu. Navedeno je da se za potrebe ove disertacije u istraživanjima koristio “komercijalni” cement koji je u sebi sadržavao određeni postotak zgure i letećeg pepela. Nije se koristi tzv. “čisti” cement iz razloga što se isti vrlo rijetko koristi u svakodnevnoj građevinskoj praksi.

### *Poglavlje 4. Leteći pepeo kao vezivo*

U ovom poglavlju prikazane su osnovne karakteristike dobivanja letećeg pepela kao veziva i nusprodukta izgaranja ugljena u termoelektranama. Opisana je mineralogija i kemijski sastav letećeg pepela, a detaljno su navedene njegove geotehničke karakteristike te primjena u geotehničkim građevinama. Leteći pepeo je klasificiran kao materijal niske čvrstoće (CLSM) koji se koristi u ojačanju tla i stijena, primjeni mlaznog betona, injektiranju bušotina i izgradnji hidrotehničkih nasipa. U istraživanju provedenom za potrebe ove disertacije korišten je leteći pepeo iz tvrtke HOLCIM (Hrvatska) d.o.o., koja u proizvodnom procesu koristi pepeo iz termoelektrane TE

Plomin u Istri – jedine aktivne termoelektreane na ugljen u Republici Hrvatskoj. Ovaj leteći pepeo pripada klasi F prema normi ASTM C618-94a i ima pucolanska svojstva, s udjelom vapna manjim od 15%. Silikati i aluminij silikati u letećem pepelu klase F zahtijevaju prisutnost cementnog agensa (poput Portland cementa, vapna ili hidratiziranog vapna) kako bi, u prisutnosti vode, reagirali i formirali cementni spoj.

#### *Poglavlje 5. Zgura kao vezivo*

U ovom poglavlju prikazane su osnovne karakteristike dobivanja zgure kao veziva i nusprodukta nastalog u procesu proizvodnje željeza u visokim pećima. Opisani su mineralogija i kemijski sastav zgure, te su detaljno navedene njene geotehničke karakteristike i primjena u geotehničkim građevinama. Prikazana su dva oblika zgure – bazična i kisela. Kao vezivo koristi se isključivo bazična zgura, koja sama po sebi nema vezivna svojstva, pa joj se za aktivaciju dodaju cement, vapno ili gips kao katalizatori. Na taj način stvara se „belit,“ glavni mineral zgure s hidratacijskim svojstvima. Za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji korištena je zgura iz tvrtke HOLCIM (Hrvatska) d.o.o., koja u svom proizvodnom procesu koristi zguru iz čeličane ILVA u Tarantu, Italija (Gruppo Rieve).

#### *Poglavlje 6. Laboratorijsko ispitivanje krutosti i čvrstoće gline*

U ovom poglavlju prikazana su istraživanja koja su dovela do određivanja krutosti i čvrstoće gline. Prikazano je definiranje određenih konstanti u mehanici općenito te definiranje čvrstoće gline prema Mohr-Coulombovom zakonu sloma. Prikazana je posmična krutost gline određena pri malim deformacijama, kao i metode određivanja u laboratorijima koristeći suvremenu opremu dostupnu znanosti. Opisana su istraživanja koja dokazuju da je u području malih deformacija ponašanje tla, uključujući krute gline i pijesak, izrazito nelinearno. Posmična krutost tla u području malih posmičnih deformacija značajno je veća nego pri većim deformacijama, a ona opada s povećanjem deformacija. Ranije se smatralo da postoji značajna razlika između rezultata dobivenih dinamičkim opterećenjem u odnosu na statičko opterećenje. Međutim, nova tehnologija mjerenja malih deformacija u laboratoriju, uz lokalno mjerenje deformacija na uzorku pomoću Bender elemenata, potvrdila je da je razlika između dinamičke i statičke krutosti tla zanemariva.

*Poglavlje 7. Izrada i priprema kompozitnih uzoraka u laboratoriju*

U ovom poglavlju opisana je laboratorijska procedura izrade i pripreme kompozitnog uzorka gline i veziva. Slikovito je opisan postupak izrade kompozitnog uzorka kao mješavine gline i veziva u određenom omjeru, te kasnije čuvanje tih uzoraka u laboratoriju i priprema za ispitivanje.

*Poglavlje 8. Rezultati ispitivanja kompozitnih uzoraka gline i veziva*

U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja kompozitnih uzoraka gline i veziva u laboratoriju. Za ispitivanje je korištena zagrebačka glina s dva lokaliteta, jedan s tržnice Dolac i drugi s okolice Krematorija u Zagrebu. Prikazani su rezultati jednoosne čvrstoće, sekantni modul elastičnosti i vlažnosti pojedinog kompozitnog uzorka. Kompozitni uzorak je mješavina gline i veziva cementa, leptećeg pepela i zguure u određenom masenom omjeru (5%, 10% i 20%) uz sazrijevanje od 7,14 i 28 dana u laboratorijskim uvjetima.

*Poglavlje 9. Analize rezultata i nove spoznaje ponašanja zagrebačke gline poboljšane raznim vezivima*

U ovom poglavlju prikazana je analiza i sinteza rezultata ispitivanja jednoosne čvrstoće, modula elastičnosti i vlažnosti kompozitnog uzorka gline poboljšane vezivima kao što su cement, leteći pepeo i zgura. Dobiveni rezultati pokazuju da se primjenom ovih veziva mogu poboljšati fizikalna i mehanička svojstva zagrebačke gline, ovisno o količini veziva i vremenu sazrijevanja kompozita. Usporedne analize i normalizirane krivulje omogućuju dublje razumijevanje ponašanja krutosti i čvrstoće zagrebačke gline poboljšane cementom, kao tradicionalnim vezivom za poboljšanje tla, te letećim pepelom i zgurom, industrijskim nusproduktima čija je primjena u istraživanjima poboljšanja tla na globalnoj razini u porastu. Značaj ovih ispitivanja leži i u analizi utjecaja industrijskih nusprodukata na poboljšanje zagrebačke gline, čime se otvara mogućnost smanjenja količina industrijskog otpada u Hrvatskoj i regiji.

*Poglavlje 10. Zaključci i preporuke*

U ovom poglavlju dati su zaključci rada i preporuke za buduća istraživanja.

## **1.6. PRIMJENA ISTRAŽIVANJA**

Nove spoznaje mehaničkog ponašanja krutosti i čvrstoće zagrebačke gline poboljšane vezivima kao što su cement, zgura i leteći pepeo primjenjive su za projektiranje geotehničkih zahvata u tlu.

Ova istraživanja su na tragu rezultata drugih istraživanja u svijetu koja pokazuju da različite vrste glina, poboljšane istom vrstom veziva u istim uvjetima, pokazuju različito ponašanje, odnosno različite mehaničke karakteristike. Stoga je primjena ovih rezultata ograničena na lokalitet zagrebačke gline.

## 2. ZAGREBAČKA GLINA KAO PRIRODNI MATERIJAL

### 2.1. UVOD

U ovom poglavlju prikazuju se geološki aspekti gline kao prirodnog materijala. Glinu je teško precizno definirati jer se sastoji od kombinacija različitih minerala, pri čemu granulacija često varira. Stoga se pojam "glina" može definirati na nekoliko načina: kao skupinu minerala fine granulacije, kao stijenu, ili kao pojam za sitne čestice.

Glina se općenito odnosi na kombinacije jednog ili više glinenih minerala uz tragove metalnih oksida i organskih tvari. To su primarno hidratizirani silikati aluminijski, odnosno minerali gline koji osiguravaju viskozno-plastične karakteristike materijala (Kogel, 2006).

Glina i glinci su široko rasprostranjene sedimentne stijene koje se sastoje od minerala gline i različitih primjesa. Među najvažnijim glinenim mineralima su kaolinit, hidroliskuni, montmorilonit i drugi aluminijski silikati. U mineralima gline često su prisutni i drugi elementi u manjim postocima, kao što su magnezij, željezo, alkalni i zemnoalkalni metali. Među alkalne i zemnoalkalne metale spadaju litij, natrij, kalij, rubidij, cezij, francij, berilij, magnezij, kalcij, stroncij, barij i radij.

Glina je fini, zrnati, prirodni i zemljani materijal. Mnoge definicije opisuju glinu kao materijal koji u prisutnosti vode postaje plastičan, iako postoji iznimka u slučaju halozita (Zlatunić, 2006). Najčešći kriterij za klasifikaciju materijala kao gline je veličina čestica. Često dolazi do nesuglasica između geologa i geotehničara u vezi s točnom veličinom čestica, koja može biti 2  $\mu\text{m}$  ili 4  $\mu\text{m}$ . Međutim, prema USCS (eng. Unified Soil Classification System) geomehaničkoj klasifikaciji, čestice gline su definirane kao one veličine jednake ili manje od 2  $\mu\text{m}$ .

Glina nastaje u prirodi kroz dug vremenski period polaganim kemijskim trošenjem stijena pri niskim koncentracijama ugljične kiseline i drugih razrijeđenih otapala. Osim kemijskog trošenja, glina može nastati i tijekom hidrotermalnih aktivnosti. Glina je osnovni materijal za proizvodnju kompozitnih pečenih proizvoda.

Gline mogu biti monomineralne, kada preovlađuje jedan mineral gline, ili polimineralne, kada su prisutni različiti minerali u približno jednakim omjerima. Prema mineralnom sastavu razlikujemo nekoliko vrsta glina:

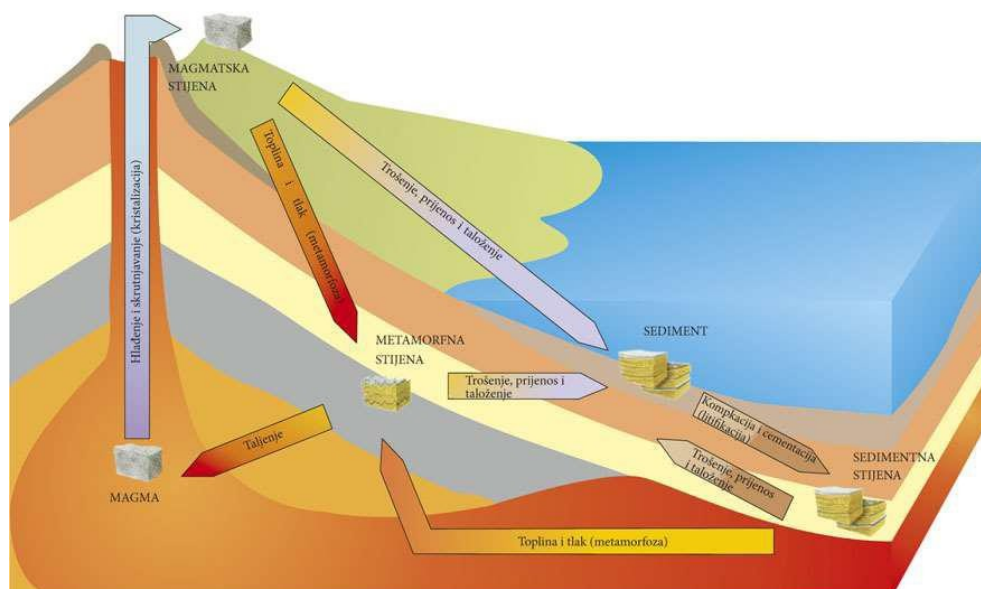
- **Kaolinitske ili vatrostalne gline** – Pretežno izgrađene od kaolinita, ove gline često nastaju raspadanjem matične stijene, obično granita, na mjestu. Koriste se u industriji porculana i elektroporculana te u ljevačkoj industriji, gdje je potreban nizak sadržaj željeza i visoka vatrootpornost.
- **Montmorilonitske gline** – Sastavljene uglavnom od montmorilonita, imaju izraženu sposobnost bubrenja i apsorpcije organskih tvari. Koriste se u industriji fine keramike, tekstilnoj, ljevačkoj industriji, industriji šećera itd. Bentonitske gline, nastale promjenama vulkanskog pepela, također su montmorilonitske i moraju sadržavati najmanje 80% montmorilonita za industrijske svrhe. Uma, poznata i kao suknarska glina, je vrsta montmorilonitske gline s visokom sposobnošću apsorpcije masti i nekad je korištena u tekstilnoj industriji. Sadrži povišene količine magnezija i kalcija.
- **Ilovače** – Nečiste gline koje sadrže pijesak i kalcij-karbonat, koriste se pretežno u proizvodnji cigli. Pješčana ilovača je vrsta ilovače s visokim udjelom pijeska kao klastične komponente.
- **Laporovita glina** – Sadrži kalcij-karbonat, obično u rasponu od 5 do 15%.

Kroz povijest civilizacije glina je korištena od najranijih vremena, najprije kao vezivo i materijal za izradu posuđa. Prvi mortovi nastajali su miješanjem gline s vodom, a kasnije su dodavani slama, drvo i slični materijali kako bi se povećala otpornost i trajnost proizvoda. U suvremenom dobu glina ima najveću važnost kao kompozitni pečeni materijal za proizvodnju građevinskih elemenata poput opeke i crijepa. Mineralne sirovine, uključujući glinu, ključne su za civilizacijski napredak, a njihovo racionalno iskorištavanje od presudne je važnosti za budućnost. Koncept održivog razvoja uvelike se primjenjuje u korištenju gline kao mineralne sirovine danas.

## 2.2. GEOLOŠKI NASTANAK GLINENOG TLA

Kopneni dio planeta Zemlje sastoji se od tri glavna sloja i nekoliko podslojeva. Prvi, odnosno vanjski sloj, nalazi se na dubini od 10 do 70 km i sastoji se od dva podsloja. Prvi podsloj čine stijene u kojima prevladavaju metali poput silicija i aluminijska, dok je drugi podsloj bogat rudama magnezija. Drugi sloj Zemljine kore, srednji sloj, sastoji se uglavnom od tekućeg oksida željeza i kroma. Treći sloj, središnji dio Zemlje, je jezgra koja se sastoji od mješavine željeza i nikla.

Tijekom geoloških razdoblja Zemlja prolazi kroz stalne promjene, uslijed kojih nastaju različiti minerali kao rezultat trošenja ovih slojeva. Na Slici 2.1. prikazan je shematski prikaz kružnog toka trošenja slojeva i minerala (Grgić i dr., 2007).



Slika 2.1. Shema stijenskog kružnog toka (Grgić i dr., 2007)

Nastanak gline usko je povezan s procesom trošenja Zemljine kore, koja se kroz razne procese transformira djelomično u glinu. Glina je mineraloški sediment koji je nastao trošenjem magmatskih ili silikatnih stijena u prošlosti. Trošenje se odvija pod utjecajem različitih čimbenika, koje možemo podijeliti u nekoliko kategorija: mehaničko, kemijsko i organsko trošenje. Mehaničko trošenje uzrokuju atmosferske promjene poput padalina, mraza i vjetra, dok kemijsko trošenje nastaje djelovanjem vanjskih čimbenika, primjerice ugljičnog monoksida, koji u kombinaciji s padalinama izaziva kemijske reakcije sa stijenama i dovodi do njihova raspadanja. Organsko trošenje nastaje

djelovanjem mikroorganizama i bakterija koje svojom aktivnošću pridonose trošenju stijena.

Kolokvijalno, glina se može opisati kao plastični poluvezani sediment nastao dijagenozom, odnosno vezivanjem mulja ili pelitskog materijala koji je transportiran vodom i taložen u vodenoj sredini. Ovaj pelitski materijal može postati vezan isušivanjem ili istiskivanjem vode pod pritiskom gornjih slojeva. Glina predstavlja srednji stadij u dijagenezi muljevitog materijala. Pod utjecajem geološkog tlaka ili intenzivnim isušivanjem, ovaj materijal gubi plastičnost i prelazi u čvrstu stijenu poznatu kao glinac.

U svojoj disertaciji, Ilijanić (2014) navodi da se velik dio paleookolišnih informacija može dobiti proučavanjem mineralnog sastava jezerskih sedimentata. Detritični minerali odražavaju interakciju nekoliko faktora: tektonike bazena, izvora sedimentata, intenziteta trošenja u slivu te procesa koji transportiraju sediment u jezero. Iz alogenih komponenti u jezerskim sedimentima često se može kvantitativno govoriti o promjenama u veličini i morfologiji jezera te o fluktuacijama klimatskih uvjeta u slivu.

Detritični minerali glina čine dominantne alogene minerale u jezerskim sedimentima, a interpretacije okoliša temelje se na određivanju porijekla prisutnih minerala gline. Određivanje porijekla minerala gline složen je i zahtjevan zadatak jer se minerali gline različitog porijekla mogu izmiješati i koegzistirati u istom okolišu. Ipak, minerali gline nose važne informacije o svom porijeklu, uključujući izvore, rasprostranjenost, okoliš taloženja i klimatske uvjete.

Minerali gline nastaju tijekom procesa trošenja i pedogeneze na površini Zemlje. Mineralni sastav ishodišne stijene i klimatski uvjeti predstavljaju glavne faktore koji određuju sastav minerala gline.

Prema postanku, gline možemo podijeliti na primarne i sekundarne. Ova podjela temelji se na mjestu pronalaska sirovine, odnosno ovisi o tome je li došlo do naknadnog transporta nakon procesa trošenja.

Primarne gline nalazimo na samom mjestu trošenja ili u neposrednoj blizini mjesta nastanka. Sekundarne gline, s druge strane, transportirane su na određenu udaljenost, a prema vrsti transporta razlikujemo nekoliko tipova: mogu biti riječnog, potočnog, jezerskog, morskog, glacijalnog, spiljskog i eolskog podrijetla.



Gline se mogu definirati prema postanku kao sekundarni minerali nastali trošenjem ili hidrotermalnom izmjenom primarnih (uglavnom silikatnih) minerala. Osnovni mineralni sastojci glina pripadaju skupini filosilikata, a osim njih, gline sadrže i različite primjese (Zlatunić, 2006).

Gline se mogu podijeliti na sedentarne i transportirane. Sedentarne gline nalaze se na mjestu raspadanja minerala i obično nisu slojevite, dok su transportirane gline, koje su nastale premještanjem, slojevite. Kompaktnost gline raste s manjim postotkom vode; suhe gline su škrljave i nazivaju se škrljave gline ili glineni škrljevci, odnosno argiliti. Transportirane gline mogu biti morskog, riječnog, jezerskog, potočnog, špiljskog, eolskog i glacijalnog podrijetla. Procjenjuje se da gline, uključujući glinena tla i glinene stijene, čine oko 70% svih sedimentnih stijena.

Škrljave gline su morski sedimenti različitih boja koje potječu od prisutnih primjesa. Potpunu škrljavost pokazuju glineni škrljevci i brusilovci. Uljne škrljave gline sadrže ugljikohidrate nastale razgradnjom bjelančevina i masti planktona. Abisalne gline nastaju taloženjem glinenih čestica u dubokom moru i nazivaju se prema boji: modri, sivi i crni mulj (boja od organskih tvari i pirita), crveni mulj (boja od hematita), zeleni mulj (boja od glaukonita), te koraljni i vulkanski mulj.

U gline se ubraja i crljenica, koja predstavlja neotopljeni ostatak vapnenca i sastoji se od željeznih i aluminijskih oksida te gline. U genetskoj je vezi s boksitom, koji se smatra fosilnom crljenicom.

Glina ima vrlo široku tehničku primjenu i koristi se za izradu porculanske i lončarske robe, običnih i vatrostalnih opeka, olovaka, modela u kiparstvu i drugih proizvoda. Najvažnije vrste gline uključuju: kaolin, porculansku glinuu, lončarsku glinu, ciglarsku glinu, vatrostalnu glinu te Umu ili suknarsku glinu.

### 2.3. VRSTE GLINA

Glina je sediment vrlo sitnih koloidnih čestica, sastavljenih od različitih minerala, među kojima prevladava kaolin. Nastaje kao proizvod sporog mehaničkog i složenog kemijskog raspadanja stijena vulkanskog podrijetla, pri čemu ključnu ulogu imaju voda, zrak i karbonatna kiselina. Osnovni sastojak gline je mineral glinenac (aluminijev hidrosilikat).

Glina se u prirodi nalazi u primarnim i sekundarnim nalazištima. Primarna nalazišta nalaze se u dubini Zemljine kore, gdje se može naći čista, nezagađena glina, poznata kao porculanska glina ili kaolin (bijela zemlja). Sekundarna nalazišta sadrže glinu s mnogo primjesa, poput zemlje, šljunka i drugih materijala. Čestice gline su vrlo male, veličine oko 1.000. dijela milimetra (jedan mikron). Zbog ovako sitnih čestica koje stvaraju kapilare između sebe, glina ima sposobnost bubrenja.

Kada glina upije vodu, razlikujemo masne i posne gline. Masne gline sadrže veći udio minerala kaolina, čišće su, upijaju više vode i lakše se oblikuju. Pomiješana s vodom, glina stvara plastičnu masu koja se lako oblikuje i sušenjem zadržava svoj oblik. Osušena glina može se ponovnim miješanjem s vodom vratiti u plastično stanje. Procesom pečenja glina trajno zadržava svoj oblik. Prilikom zagrijavanja glina se suši i skuplja, mijenja boju na određenoj temperaturi i gubi plastičnost gubitkom vode. Daljnje zagrijavanje vodi do razmekšanja i taljenja taljivih sastojaka, čime pečena glina postaje vrlo zbijena i ima visoku tlačnu čvrstoću.

Prema temperaturi taljenja, gline se dijele na lako taljive i teško taljive. Lako taljive gline imaju temperaturu taljenja ispod 1350 °C, dok je za teško taljive gline ta temperatura između 1350 i 1380 °C. Postoje i netaljive gline, čija je točka taljenja 1580 °C. Glineno tlo nije pogodno za poljoprivrednu obradu (oranje) i ima slabe agronomske kvalitete, ali čovjek već od davnina koristi glinu za izradu lončarske galanterije, poput amfora i drugog posuđa.

Glina je osnovna sirovina za dobivanje pečenih glinenih kompozitnih materijala. Kao netopljivi hidroaluminosilikat, glina ima sposobnost miješanja s vodom, čime postaje oblikovana, što ukazuje na njeno plastično svojstvo, te se skuplja i stvrdnjava prilikom sušenja. U usporedbi s drugim fino-zrnatim tlima, glina se izdvaja po veličini čestica i

mineralnom sastavu. Glineno tlo pojavljuje se u ležištima koja mogu biti formirana na samom mjestu kao i druge naslage u tlu.

Glinena ležišta obično su povezana s taložnim okolišima poput velikih jezera i morskih bazena. Glina pripada klastičnim sedimentnim stijenama, a prema podjeli po veličini sastojaka ubraja se u pelite ili sitnozrnaste stijene čiji sastojci imaju veličinu manju od 0,063 mm. Peliti sadrže najveći udio čestica praha (silt) dimenzija 0,063 mm – 0,002 mm i gline (< 0,002 mm). Mineralni sastav siltnih čestica sličan je sastavu pijeska, najčešće s kvarcom, feldspatima i fragmentima stijena, uz prisutnost minerala gline. Postoji više tipova pelitnih stijena, ovisno o udjelu praha i gline, kao i stupnju litifikacije.

Nevezani peliti su prah ili silt, mulj i glina, dok su vezani peliti prahovnjak ili siltit, muljnjak i glinjak. Prahovnjaci (siltiti) su litificirane pelitne sedimentne stijene s više od 2/3 čestica veličine praha i manje od 1/3 čestica gline. Muljnjaci (madstoni) su litificirane pelitne stijene koje sadrže između 1/3 i 2/3 siltoznih i glinovitih komponenti, što znači približno podjednake količine siltnog i glinovitog detritusa. Glinjaci sadrže više od 2/3 čestica dimenzija gline i manje od 1/3 čestica praha (Vrkljan, 2001).

Prema mineraloškom sastavu, glina se obično dijeli na...:

- Kaolin
- Bentonit
- Fulerova zemlja
- Paligorskit-sepiolit
- Vatrostalne gline

### **Kaolin**

Stijene bogate mineralom kaolinitom nazivaju se kaolin ili bijela glina. U sastavu kaolina, osim kaolinita, mogu se naći i drugi minerali iz kaolinske podgrupe, poput dikita, nakrita i haloazita, ali u manjim količinama. Kaolinit, glavni mineral gline u kaolinu, pripada skupini industrijskih minerala s kemijskom formulom  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ . Kaolin također sadrži različite omjere kaolinita, ilitnog tinjca i kvarca, uz male količine organske tvari i drugih minerala poput smektita.

Kaolin je visoko cijenjena glina na tržištu jer značajno poboljšava vrijednost i kvalitetu keramičkih proizvoda te omogućava lakšu izradu. Osim u keramici, kaolin ima široku primjenu u medicini, proizvodnji presvučenih papira, kao dodatak hrani, u zubnim pastama, kao svjetlosno difuzijski materijal u bijelim žaruljama te u kozmetičkim proizvodima (Kogel, 2006). Ujedno je kaolin osnovna komponenta porculana, gdje doprinosi njegovoj kvaliteti i izdržljivosti.

Glavne nečistoće koje utječu na vrijednost kaolinitnog ležišta su mineralne primjese poput željeza, titana i kvarca, kao i organska tvar. Željezo i titan mogu promijeniti boju kaolina i smanjiti njegovu čistoću, što smanjuje vrijednost sirovine za primjene gdje je potreban visok stupanj bjeline, poput keramike i papira. Kvarc kao primjesa može utjecati na teksturu i obradu kaolina.

Godine 2012. cijena kaolina na tržištu varirala je između 95 i 270 dolara po toni, ovisno o njegovoj namjeni i čistoći ([www.indmin.com](http://www.indmin.com)). Najveći svjetski proizvođač kaolina bile su Sjedinjene Američke Države, a slijedile su ih Njemačka, Kina, Brazil i Velika Britanija po važnosti u proizvodnji.

### **Bentonit**

Pojam "bentonit" prvi je put uveo Knight 1893. godine, kada je ovu glinu izvorno nazvao "taylorit" prema rudniku na Taylor ranču u saveznoj državi Wyoming, SAD. Naziv "bentonit" dolazi od utvrde Fort Benton u Wyomingu, gdje je bentonit prvi put otkriven. Bentonit ima mastan opip i bijelu do blijedozelenu boju, koja može postati žuta, crvena ili smeđa nakon duljeg izlaganja površinskim uvjetima.

Bentonit je alumosilikatna glina, sastavljena pretežno od minerala montmorilonita, koji joj daje koloidalna i plastična svojstva. Osim montmorilonita, bentonit može sadržavati i minerale poput feldspata, biotita, kaolinita, ilita, piroksena, cirkona i kristalnog kvarca. Nastaje in situ alteracijom piroklastičnih stijena, najčešće vitroklastičnih tufova ili kristalo-vitroklastičnih lapilnih tufova. Transformacija vulkanskog pepela u bentonit najčešće se događa u vodi, bilo morskoj ili alkalnoj jezerskoj, a ponekad i u svježoj vodi, što ga čini proizvodom hidrotermalnih procesa. Većina bentonitnih ležišta nastala je alteracijom vulkanskog materijala u meteoritskoj vodi zagrijanoj na 40-70 °C, pri čemu se odvija egzotermalna reakcija, a čestice piroklasta se potpuno mijenjaju (Kogel, 2006).

Najveći svjetski proizvođač bentonita su Sjedinjene Američke Države, a slijedi ih Kina. U kolovozu 2011. godine cijena bentonita na tržištu, ovisno o namjeni i čistoći, varirala je od 34 USD po toni (bentonit za isplaku) do 115 USD po toni (bentonit za ljevački pijesak) ([www.indmin.com](http://www.indmin.com)). Prosječna cijena bentonita na tržištu u 2021. godini iznosila je 94 USD po toni ([www.statista.com](http://www.statista.com)).

Najveća ležišta bentonitne gline različite starosti u Hrvatskoj nalaze se u Hrvatskom zagorju, na Moslavačkoj gori, u Lici te na području Dinare i Svilaje. U Hrvatskom zagorju, ležište Bednja eksploatiralo se od 1926. godine, a istraživanja širega područja ležišta provodila su se u razdoblju od 1959. do 1990. na lokalitetima poput Vrbna, Šaše, Šepruna i Purga-Medveda. Na području od Luke Poljanske do Pregrade i istočnije, u okolici Radoboja, bentonitne gline pojavljuju se u badenskim naslagama. Jedino veće ležište u ovoj regiji otkriveno je u Luci Poljanskoj, gdje su prva istraživanja započela 1952. godine.

Na Moslavačkoj gori bentonitne gline nalaze se u okolici Gornje Jelenske, istočno od Jelenskoga potoka, na lokacijama Draga, Krč i Široki jarak unutar donjomiocenskih naslaga. Slično, zapadno od Jelenskoga potoka u predjelu Murinskoga jarka i Ognjila, javljaju se bentonitne gline vjerojatno badenske starosti.

U Lici su bentonitne gline otkrivene u predjelu Donjega Pazarišta unutar srednjotrijaske (gornjoladiničke) vulkanogeno-sedimentne serije stijena, te u Divoselu, na istočnom dijelu zaselka Vedro Polje.

Na području Dinare otkrivena je siva, žutosiva i sivozelena glina unutar gornjoladiničkih klastičnih naslaga nedaleko od sela Potočilo. Bentonitne gline pronađene su i na Svilaji, na dvjema lokacijama nazvanima prema obližnjim selima Štikovu i Maovicama.

### **Fulerova zemlja**

Fulerova zemlja je opći naziv za industrijsku upotrebu smektita i paligorskita, karakteriziranih velikom adsorptivnom površinom. Njena glavna prednost je sposobnost obezbojenja ulja i drugih tekućina bez kemijske obrade. Upotreba ove vrste gline datira još iz biblijskih vremena, kao i iz srednjeg vijeka, kada je korištena za čišćenje sirove vune. Termin "Fulerova zemlja" obuhvaća širok raspon gline koje nemaju specifičan sastav ili mineralnu konotaciju na tržištu. Sastav Fulerove zemlje obično uključuje

razne glinene minerale, poput montmorilonita, kaolinita i atapulgita, te hidrokside i aluminijske silikate različitih sastava.

Često sadrži i male količine minerala poput kalcita, dolomita i kvarca. Na nekim mjestima izraz "Fulerova zemlja" odnosi se na kalcijev bentonit, izmijenjeni vulkanski pepeo sastavljen većinom od montmorilonita. Sjedinjene Američke Države su najveći svjetski proizvođač, s oko 70% globalne proizvodnje, a slijede Japan i Meksiko. U SAD-u, Fulerova zemlja često potječe iz krednih naslaga vulkanskog pepela. Brda i padine koje sadrže Fulerovu zemlju mogu biti nestabilne jer materijal postaje tiksotropičan kada je zasićen obilnim kišama (Kogel, 2006).

### **Paligorskit-Sepiolit**

Paligorskit i sepiolit kao skupine minerala glina nastali su u tri okruženja različitih karaktera:

- epikontinentalnim i unutarnjim jezerima i morima,
- u otvorenim oceanima,
- u karbonatnim tlima.

Najčešći minerali u ležištima paligorskita-sepiolita su hidratizirani silikati magnezija, željeza i aluminija. Dominantni minerali gline prisutni u tim ležištima, uz navedene minerale, uključuju Mg-smektite poput saponita i stivensita. Paligorskit i sepiolit imaju široku industrijsku primjenu zbog svojih jedinstvenih svojstava (Durn, 2013).

### **Vatrostalne gline**

Prirodne stijene i gline korištene su kao vatrostalni materijali još od početaka civilizacije. S razvojem tehnike i tehnologije, posebno nakon industrijske revolucije, javila se potreba za novim i boljim materijalima, osobito u proizvodnji čelika, gdje su zahtjevi za vatrostalnim materijalima naglo porasli. Vatrostalne sirovine, koje mogu biti prirodne ili sintetičke, koriste se za izradu različitih vatrostalnih proizvoda. Osnovna sirovina je vatrostalna glina, čija je točka taljenja iznad 1580 °C.

Vatrostalne gline služe prvenstveno za proizvodnju briketa, blokova različitih oblika, opeke i lijevanih materijala. Glavni vatrostalni materijal je šamotno brašno, koje se dobiva pečenjem vatrostalne gline na visokim temperaturama i mljevenjem pečenih komada, često i recikliranjem otpadnog vatrostalnog keramičkog materijala. Šamotne opeke i ostali oblikovani šamotni proizvodi izrađuju se od plastične vatrostalne gline s

dodatkom šamotnog brašna. Ograničenja sirove vatrostralne gline uglavnom se odnose na prisutnost nečistoća i alkalija. Glavni mineral u vatrostralnim glinama najčešće varira, ali najzastupljeniji je kaolinit (Kogel, 2006).

Vatrostalne gline u Republici Hrvatskoj pronađene su na svega nekoliko ležišta, uključujući Dubravu kraj Zaboka, Bedekovčinu, Grahovljane kraj Pakraca te područja na Baniji kao što su Kokirevo, Blatuša i Pedalj. Ova ležišta poznata su i kao nalazišta keramičke gline.

## 2.4. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ZAGREBAČKE GLINE

Grad Zagreb leži na dvije glavne geološke jedinice: sjevernoj jedinici koju čini masiv planine Medvednice i južnoj jedinici koja obuhvaća Savsku potolinu. Te dvije strukture razdvaja reverzni rasjed, pružajući se u smjeru sjeveroistok-jugozapad kroz središte grada. Južno od rasjeda, u površinskom dijelu, prisutne su aluvijalne naslage kvartara prve i druge savske terase, koje se sastoje od slojeva šljunka i pijeska do dubine od oko deset metara, prekrivenih tanjim slojevima pjeskovitih i prahovitih glina. Ispod tih naslaga nalaze se slojevi prekonsolidirane, krute gline koja doseže veće dubine i ima slična mehanička svojstva.

Prema Osnovnoj geološkoj karti (list Zagreb, Šikić i dr., 1979) i karti Ivanić Grada, podsljemensko područje Zagreba sastavljeno je od različitih tipova tala, među kojima prevladava zagrebačka glina, geološki definirana kao glina neogenske i kvartarne starosti (Lebo i dr., 2021). Ova glina se ističe specifičnom pločastom morfologijom i velikom specifičnom površinom svojih mineralnih čestica, što snažno utječe na fizička i mehanička svojstva tla u širem području grada Zagreba.

Inženjerskogeološke uvjete u podsljemenskoj zoni Zagreba najviše određuju sitnozrnata tla gornjomiocenske i pleistocenske starosti, koja pokrivaju oko 70% ukupne površine ovog područja. Ova tla se međusobno razlikuju prema svom porijeklu, što posljedično utječe na njihove litološke i mineralne sastave (Kovačić i Grizelj, 2007; Grizelj i dr., 2017).

U inženjerskoj geologiji, sitnozrnata tla predstavljaju izazov zbog svojih karakterističnih mehaničkih svojstava poput visoke kompresibilnosti, dugotrajnog slijeganja, niske hidrauličke vodljivosti i niske čvrstoće na smicanje. Mehanička svojstva tla prvenstveno ovise o osnovnim fizikalno-kemijskim svojstvima i čimbenicima koji na njih utječu (Mitchell i Soga, 2005). Jedan od ključnih faktora koji značajno utječe na svojstva sitnozrnatih tala jest udio glinaste frakcije u tlu te prisutnost minerala gline unutar te frakcije. Zbog svoje jedinstvene kristalne strukture, pločaste morfologije i velike specifične površine, minerali gline imaju izrazito snažan utjecaj na fizikalna, a samim time i na mehanička svojstva tla. Taj utjecaj se posebno očituje kroz interakciju vode i tla, što se izražava preko Atterbergovih granica. Mnogi su autori istraživali minerale gline u sitnozrnatim tlima i njihov utjecaj na fizikalna i mehanička svojstva tla, među kojima se ističu Farrar i Coleman (1967), Locat i dr. (1985), Cerato



(2001), Schmitz i dr. (2004), Tiwari i Marui (2005), Polidori (2007) te Olchawa i Goraczko (2012).

U svom radu, Martinčević Lazar, Urumović i Mihalić Arbanas (2017) navode pretpostavku da količina glinovite frakcije i vrsta minerala gline koje ona sadrži predstavljaju jedan od glavnih faktora koji kontroliraju mehanička svojstva sitnozrnatih tala u podsljemenskoj zoni. Uspoređena su osnovna fizičko-mehanička svojstva tala s njihovim mineralnim sastavom, s posebnim naglaskom na vrstu minerala gline prisutnih u sitnozrnatim ili koherentnim tlima. Time su dobiveni uvidi u vrste inženjerskih tala rasprostranjenih u podsljemenskoj zoni, s posebnim naglaskom na sitnozrnate vrste te njihove sličnosti i razlike ovisno o litostratigrafskoj pripadnosti, osnovnim fizičkim svojstvima i mineralnom sastavu.

Na temelju rezultata istraživanja, autori zaključuju da:

- gornjomiocenske i pleistocenske naslage u podsljemenskoj zoni sastavljene su pretežno od sitnozrnatih vrsta tala,
- u gornjomiocenskim naslagama prevladavaju elastični prahovi (MH), dok su unutar pleistocenskih naslaga dominantne masne (CH) i posne gline (CL),
- osnovna inženjerskogeološka svojstva različitih grupa tala razlikuju se s obzirom na njihovu litostratigrafsku pripadnost, pri čemu su najveće razlike primjetne u grupi sitnozrnatih tala, posebno u pogledu granica tečenja i indeksa plastičnosti,
- te razlike proizlaze iz različitih uvjeta koji su prevladavali tijekom i nakon taloženja tih litoloških vrsta. Rezultati mineraloških analiza potvrđuju ovu pretpostavku, pokazujući da u gornjomiocenskim glinama i prahovima dominiraju smektit i klorit, dok su u pleistocenskim naslagama prisutni kaolinit i vermikulit,
- s obzirom na veliki broj ispitanih uzoraka sitnozrnatih tala i gustoću mreže uzorkovanja, rezultati analize fizičkih svojstava mogu se smatrati reprezentativnima za sve sitnozrnate vrste tala gornjomiocenske i pleistocenske starosti,
- iako rezultati mineraloških analiza pokazuju jasnu razliku između dviju stratigrafski različitih vrsta materijala, ne mogu se smatrati reprezentativnima zbog vrlo malog broja analiziranih uzoraka.

Eksploatacija gline u okolini grada Zagreba odvija se već dugi niz godina. Ležišta ciglarske gline uglavnom se nalaze u podsljemenskoj zoni Medvednice ili južno od linije Hrvatski Leskovac–Lomnica. Na području Zagreba nalaze se tri eksploatacijska polja ciglarske gline koja su trenutno zatvorena.

Glinokop Grmoščica, koji je bio sirovinaska baza za donedavno najveću hrvatsku ciglanu (Ciglanu Zagreb d.o.o.), s vremenom se našao unutar urbanog područja Zagreba zbog širenja grada. Zbog toga je daljnja eksploatacija gline postala praktički nemoguća, a kao jedino rješenje ostala je sanacija ležišta.

Novačica je drugo eksploatacijsko polje u Zagrebu s utvrđenim rezervama od 6,3 milijuna m<sup>3</sup> gline. Međutim, eksploatacija je obustavljena nakon 2010. godine jer tvrtka koja je do tada imala koncesiju za to polje nije zatražila njezino produženje.

Glinokop Soblinec predstavlja treće ležište u okolini Zagreba, koje je zatvoreno 2000. godine. Glina iz ovog ležišta korištena je za sanaciju odlagališta Jakuševac. Satelitske snimke ovih polja pokazuju formiranje jezera na području glinokopa, što ukazuje na potpuni prestanak eksploatacijskih aktivnosti (HGI, 2013).



Slika 2.2. Satelitski prikaz eksploatacijskih polja zagrebačke gline, Grmoščica, Novačica i Soblinec (HGI, 2013)

## 2.5. KARAKTERISTIKE ZAGREBAČKE GLINE UPOTREBLJENE ZA ISPITIVANJE U LABORATORIJU

U istraživanjima ove disertacije korištena je zagrebačka glina s dvaju lokaliteta. Prvi lokalitet je podsljemenska zona u blizini gradskog groblja i Krematorija, a drugi je gradska tržnica Dolac u centru Zagreba. Mineralni sastav tih glina uključuje kvarc, muskovit i montmorilonit, koji je poznat po svojoj laganoj strukturi. Prema USCS standardu, materijal s ovih lokaliteta klasificira se kao glina niske (CL) do visoke (CH) plastičnosti, s blagim potencijalom bujanja.



Slika 2.3. Lokaliteti uzorkovanja gline, Krematorij i Dolac u gradu Zagrebu (Lebo i dr., 2021)

Na slici 2.3. prikazani su lokaliteti Krematorij i Dolac, s kojih su uzeti uzorci zagrebačke gline. Na lokalitetu Krematorij izvedeno je sondažno bušenje, pri čemu je uzorkovana glinena jezgra s dubine od 5,5 m do 8,0 m, dok su uzorci s lokaliteta Dolac uzeti s dubine od 15,0 m do 18,5 m, također metodom rotacionog bušenja. Uzorci su propisno zaštićeni parafinom i dopremljeni u laboratorij Zavoda za geotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje su obavljena ispitivanja.

Svi uzorci gline s lokaliteta Dolac klasificirani su kao visokoplastična glina, dok je s lokaliteta Krematorij samo jedan uzorak klasificiran kao glina visoke plastičnosti, a ostali su klasificirani kao gline niske plastičnosti (CL). U tablicama 2.1. i 2.2. prikazani

Poglavlje 2  
Zagrebačka glina kao prirodni materijal

---

su rezultati laboratorijskih analiza uzoraka zagrebačke gline korištenih u istraživanjima ove disertacije.

	<b>DOLAC</b>	B1	B3	B1	B3
Glina		CH	CH	CH	CH
Dubina	m	17.0-18.0	15.0-17.0	15.0-16.0	17.0-18.25
w <sub>o</sub>	%	27,29	22,71	28,25	29,11
w <sub>L</sub>	%	69,66	52,88	67,59	66,54
w <sub>p</sub>	%	27,58	25,79	26,68	26,78
I <sub>p</sub>	%	42,08	27,09	39,29	39,76
I <sub>c</sub>		1,01	1,11	1,01	0,94
ρ	Mg/m <sup>3</sup>	1,86	1,75	1,88	1,79
ρ <sub>d</sub>	Mg/m <sup>3</sup>	1,44	1,42	1,43	1,42
ρ <sub>s</sub>	Mg/m <sup>3</sup>	2,66	2,66	2,66	2,66
c	kPa	80	40	55	42
φ	°	20	31	25	28
lab.oznaka		Do_1	Do_2	Do_3	Do_4
w	%	27,82	27,51	28,34	29,98
q	kPa	148,16	136,42	209,93	126,23
E	MPa	6,8	7,2	6,9	7,2

Tablica 2.1. Laboratorijska analiza uzorka gline s lokaliteta Dolac

	<b>KREMATORIJ</b>	B7	B12	B1	B3
Glina		CL	CH	CL	CL
Dubina	m	6.0-6.5	5.5-6.0	7.5-8.0	5.5-6.0
w <sub>o</sub>	%	29,4	30,1	42,32	38,54
w <sub>L</sub>	%	45,85	65,44	47,35	48,49
w <sub>p</sub>	%	22,56	25,74	19,19	23,82
I <sub>p</sub>	%	23,29	39,7	28,16	24,67
I <sub>c</sub>		0,71	0,89	0,18	0,4
ρ	Mg/m <sup>3</sup>	1,78	1,73	1,79	1,92
ρ <sub>d</sub>	Mg/m <sup>3</sup>	1,37	1,33	1,17	1,35
ρ <sub>s</sub>	Mg/m <sup>3</sup>	2,6	2,6	2,6	2,6
c	kPa	15	25	20	11
φ	°	30	28	26	27
lab.oznaka		Kr_1	Kr_2	Kr_3	Kr_4
w	%	29,8	30,07	40,03	38,6
q	kPa	141,26	135,18	113,76	111,74
E	MPa	6,2	6,2	4,2	5,4

Tablica 2.2. Laboratorijska analiza uzorka gline s lokaliteta Krematorij

## **2.6. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI**

U ovom poglavlju prikazana su istraživanja koja obuhvaćaju geološke aspekte gline kao prirodnog materijala, uključujući osnovne minerale, klasifikacijske kriterije prema veličini čestica, te uvođenje naziva "zagrebačka glina" kao novog geološkog i geotehničkog pojma koji predstavlja tipično tlo područja grada Zagreba. Također su iznesene informacije o obustavi eksploatacije zagrebačke gline, što ne znači da je ona nestala; zagrebačka glina i dalje se nalazi ispod urbanog i okolnog područja Zagreba. S obzirom na brojna geološka istraživanja u bližoj i široj okolini grada, te uvažavajući specifične karakteristike i geološke osobitosti zagrebačkog područja, glineno tlo ovdje može se objediniti pod nazivom "zagrebačka glina."

### 3. CEMENT KAO VEZIVO

#### 3.1. UVOD

U ovom poglavlju prikazane su osnovne karakteristike cementa kao građevinskog veziva. Opisan je industrijski postupak proizvodnje cementa, uz osnovnu podjelu cementa i prikaz kemijskog sastava te ostalih fizikalnih svojstava. Također su navedeni normativi koji reguliraju klasifikaciju cementa. Za potrebe ove disertacije korišten je „komercijalni“ cement koji sadrži određeni postotak zgure i letećeg pepela.

Cement je praškasti materijal koji, kada se pomiješa s vodom, kroz kemijske reakcije i prateće fizikalne procese prelazi u očvrnuti cementni kamen ili cementnu pastu. Ovim procesom postupno razvija kohezijska i adhezijska svojstva koja omogućuju povezivanje čestica materijala u čvrstu, kontinuiranu masu betona (Ukrainczyk, 1994). Povijest cementa odražava čovjekovu stalnu težnju za gradnjom snažnijih, izdržljivijih i impozantnijih građevina, od egipatskih piramida do modernih nebodera, što se proteže kroz tisućljeća i brojne civilizacije. Naziv cement potječe od latinskih riječi *caedere* = lomiti i *lapidem* = kamen. U nastavku će biti sažeto prikazan razvoj cementa kroz povijest.

Varas i dr. (2007) navodi da najranija poznata upotreba materijala sličnih cementu datira iz starog Egipta, gdje su Egipćani koristili vapnene žbuke za gradnju piramida, kombinirajući vapno (kalcijev oksid) i gips. U Mezopotamiji, oko 3000 pr. Kr., bitumen je služio kao vezivo, što su kasnije usvojili Babilonci i Asirci za gradnju građevina poput Ištarinih vrata. Grci su oko 500. pr. Kr. poboljšali tehnike korištenjem prirodnih pucolanskih materijala poput vulkanskog pepela, koji pomiješan s vapnom tvori hidrauličko vezivo.

Rimljani su između 300. pr. Kr. i 476. po. Kr. razvili rimski beton – mješavinu vapna, vode, pijeska i pucolana (vulkanskog pepela) – koji su koristili za trajne građevine poput Panteona i Koloseuma. Taj rani oblik betona nazivali su \*Opus caementicium\*.

Iako je upotreba betona opala tijekom srednjeg vijeka, renesansa je donijela ponovno zanimanje za rimske tehnike, što je dovelo do ponovnog otkrivanja i prilagodbe ovih metoda.

Prema Kozłowskiom i dr. (2010), krajem 18. stoljeća James Parker patentirao je prirodni hidraulički cement nazvan "rimski cement," proizveden spaljivanjem određenih vrsta glinenog vapnenca. Hewlett i Liska (2019) ističu da je ključni razvoj uslijedio 1824. godine kada je Joseph Aspdin, engleski zidar, patentirao Portland cement, nazvan prema kvalitetnom građevinskom kamenu s otoka Portland. Aspdin je postigao ovaj materijal spaljivanjem fino mljevene krede i gline u peći, uklanjajući ugljični dioksid. Isaac Charles Johnson kasnije je poboljšao postupak sinteriranjem vapnenca i gline na višim temperaturama, čime je proizveo snažniji i postojaniji cement, bliži današnjem Portland cementu.

U 20. stoljeću uvedeni su standardi za proizvodnju cementa, čime je osigurana dosljedna kvaliteta proizvoda. Razvoj kemijskih dodataka, armiranog betona i tehnologija peći značajno su unaprijedili učinkovitost i održivost cementa, pridonoseći modernizaciji građevinske industrije.

S ekološkog aspekta, današnja industrija sve više nastoji smanjiti utjecaj proizvodnje cementa na okoliš, s obzirom na to da cementna industrija pridonosi značajnom udjelu globalnih emisija CO<sub>2</sub>. Fokus je na razvoju alternativnih materijala, poboljšanju energetske učinkovitosti te korištenju otpadnih proizvoda u proizvodnim procesima kako bi se smanjio ekološki otisak cementa.

## 3.2. OPĆENITO O CEMENTU

Cement je opći naziv za mineralna veziva s izraženim hidrauličnim svojstvima, koja se uglavnom koriste u građevinarstvu kao vezivo za prirodne ili umjetne agregate u proizvodnji betona i mortova.

Prema Nevilleu (2011), cement je građevinski vezivni materijal dobiven mljevenjem i pečenjem vapnenca i lapora u fini prah. Vapnenac je sedimentna stijena sastavljena uglavnom od minerala kalcita, no može sadržavati i manje količine drugih minerala, poput gline, sporogelita, dijaspora, hidrargilita, limonita, hematita, kremenca, cirkona, turmalina i granita. Lapor je mehanička sedimentna stijena sive do žućkaste boje, nastala čvrstim povezivanjem glina vapnenom otopinom; možemo ga smatrati mješavinom gline i vapnenca.

Veziva su materijali koji služe za spajanje različitih građevinskih elemenata i posjeduju sposobnost očvršćivanja pod utjecajem vanjskih uvjeta kroz određene kemijske procese. U suvremenom građevinarstvu funkcija veziva, njihova sposobnost spajanja i povezivanja u različitim uvjetima, ima ključnu važnost, zbog čega se od njih zahtijeva niz specifičnih svojstava. Današnja napredna tehnologija proizvodnje cementa omogućuje stvaranje različitih vrsta i tipova cementa koji su standardizirani te pružaju stabilnost i trajnost građevinskih objekata.

Zbog značaja veziva u građevinskoj praksi, posebno su važna anorganska mineralna veziva. Samarakoon i suradnici (2019) ističu da se veziva mogu klasificirati na različite načine, ovisno o pristupu podjeli, koja se može temeljiti na:

- prema načinu proizvodnje i temperaturi termičke obrade sirovine
- prema mineralološkom sastavu
- prema kemijskom sastavu
- prema načinu očvršćivanja

Proizvodnja cementa obuhvaća niz preciznih i kontroliranih faza koje pretvaraju sirovinu u prah, uz pažljivo praćenje različitih procesa kako bi se osigurala visoka kvaliteta konačnog proizvoda.

Tipični proces proizvodnje cementa uključuje sljedeće faze:

- Eksploatacija mineralnih sirovina
- Priprema (oplemenjivanje i homogenizacija) mineralnih sirovina za proizvodnju klinkera



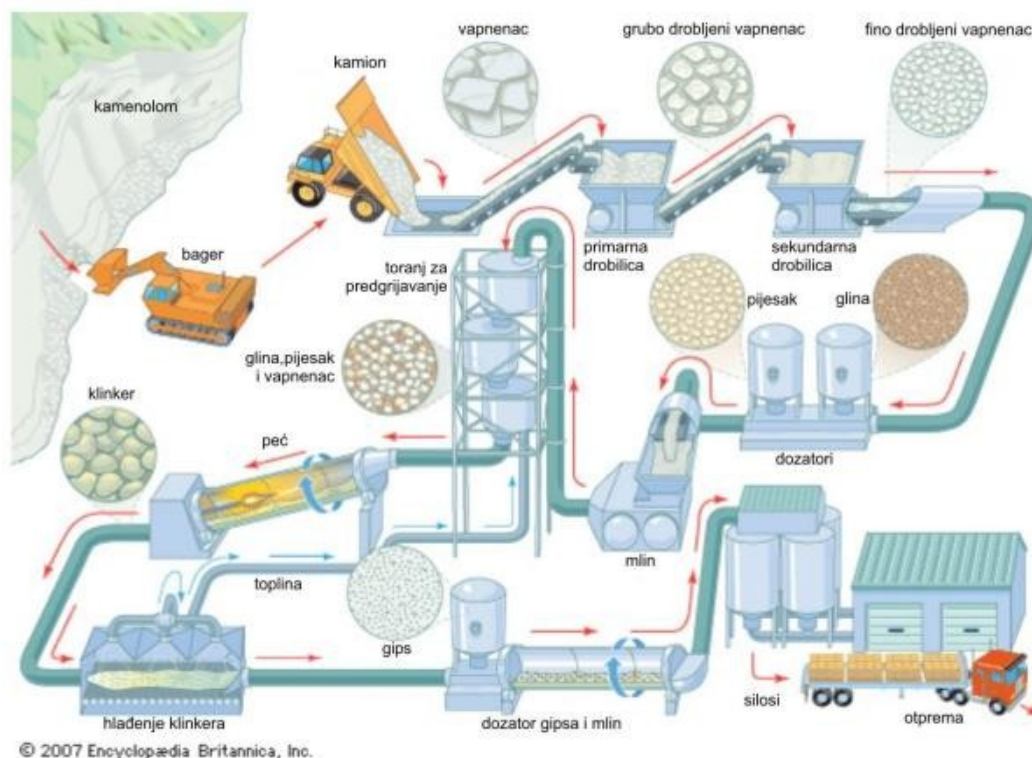
- Miješanje mineralnih sirovina i proizvodnja klinkera
- Mljevenje klinkera i dodavanje aditiva te pakiranje cementa

Prema Vrkljan i Klanfar (2010), osnovne sirovine za proizvodnju cementa su vapnenac (kalcijev karbonat) i lapor (silicijev dioksid i glinica). Ovi materijali se eksploatiraju bušenjem i miniranjem ili strojnim iskopom te dobiveni materijal varira u veličini, od nekoliko milimetara do 1,5 metara ili više, kao i u kemijskom sastavu, ovisno o lokaciji iskopa.

Nakon eksploatacije, mineralna sirovina prolazi proces predhomogenizacije kako bi se postigao ujednačen kemijski sastav, što je ključno za kvalitetu cementa. Uzorci se uzimaju iz minskih bušotina radi kemijske analize, a homogenizacija se može obaviti tijekom utovara i transporta ili vertikalnim slaganjem i horizontalnim iskorištavanjem slojeva na deponijama. Tako predhomogenizirani i obrađeni materijal postaje ulazna sirovina za cementna postrojenja.

Dalje, sirovina se melje na veličinu zrna ispod 90  $\mu\text{m}$  i miješa u omjerima koji odgovaraju željenom sastavu i vrsti cementa. U rotacijskoj peći, na temperaturi od 1400–1500 °C, nastaje klinker – rezultat niza reakcija, uključujući isparavanje, taljenje, raspadanje minerala i formiranje novih spojeva. Rotacijska peć je čelični cilindar obložen visokotemperaturnim ciglama, nagnut prema donjem kraju opremljenom plamenikom. Rotacija omogućuje postupno kretanje materijala s hladnijeg gornjeg kraja prema donjem, gdje se klinker ispušta i hladi.

Dobiveni klinker, tamnosmeđe boje i veličine 1–25 mm, zatim se melje u fini prah uz dodatak gipsa i, po potrebi, drugih dodataka, čime nastaje konačni cement.



Slika 3.1. Proces proizvodnje cementa (Vrkljan i Klanfar, 2010.)

Ovaj proces odnosi se na suhi postupak proizvodnje cementa u rotacijskoj peći, opremljenoj predgrijačem i predkalcinatorom. Sitne čestice suhe, mljevene i miješane sirovine prolaze kroz toranj za predgrijavanje, sastavljen od 4 do 5 aerociklona. U predgrijaču sirovinsko brašno prolazi kroz protustruju vrućeg zraka, koji koristi toplinu iz peći i iz procesa hlađenja klinkera. Ovaj efikasan prijenos topline omogućuje djelomičnu kalcinaciju sirovine i uklanjanje vlage prije nego što uđe u rotacijsku peć. Nakon što klinker izađe iz peći, hladi se u uređaju za hlađenje, pri čemu se toplina dobivena hlađenjem vraća u toranj za predgrijavanje. Najnovije dostignuće u ovom postupku je predkalcinator, koji funkcionira na sličan način kao predgrijač, a smješten je između predgrijača i peći. U predkalcinatoru se, uz dodatak goriva, postižu više temperature, omogućujući da se 80–90 % sirovine kalcinira prije ulaska u peć.

Postoje i drugi postupci proizvodnje cementa, koji se razlikuju upravo u spomenutim segmentima: vrsti peći, postojanju predgrijača i predkalcinatora, vrsti hladnjaka te u korištenju suhog ili mokrog stanja suspenzije. Prvi postupak proizvodnje cementa bio je mokri postupak, gdje suspenzija sirovine i vode ulazi izravno u peć bez predgrijavanja.

Prednost ovog postupka bila je tehnološka jednostavnost miješanja sirovina u obliku vodene suspenzije. Međutim, mokri postupak se napušta zbog niske energetske učinkovitosti; znatna količina energije troši se na isparavanje vode iz suspenzije, a toplina iz peći i hlađenja klinkera ne reciklira se kroz predgrijač.

### 3.3. MINERALOŠKI I KEMIJSKI SASTAV

Udio pojedinih sirovina u mješavini određuje formiranje klinker minerala (silikatnih, aluminatnih), a sastav klinkera i dodataka u cementu utječe na svojstva betona tijekom ugradnje. Cementi se, prema mineralnom sastavu, dijele na:

- Silikatne cemente
- Aluminatne cemente

Silikatni cement, često nazivan i alkalno-silikatni cement, prema Hewlettu i sur. (2019) predstavlja vrstu anorganskog cementa koji nastaje od alkalnih silikata, prvenstveno natrijevog ili kalijevog silikata. Ovaj cement poznat je po jedinstvenim svojstvima, poput otpornosti na visoke temperature i kemijske postojanosti, što ga čini pogodnim za specijalizirane primjene. Silikatni cementi su oni kod kojih su glavni minerali klinkera silikati, a prema sastavu mogu se podijeliti na:

- čisti Portland cement,
- Portland cement s dodacima,
- pucolanski cement,
- metalurški cement,
- miješani cement,
- bijeli cement.

Aluminatni cement, poznat i kao kalcijev aluminatni cement (KAC), specijalizirana je vrsta cementa koja se proizvodi mljevenjem klinkera dobivenog procesima taljenja ili sinteriranja.

Prema namjeni, cementi se dijele na: cemente opće namjene u koje spada većina silikatnih cementa i cemente posebne namjene ili specijalne cemente, među koje spadaju:

- cementi niske topline hidratacije,
- sulfatno otporni cementi,
- bijeli cement,
- aluminatni cement.

Prema Mandić i dr. (2023), za proizvodnju cementa koristi se više vrsta mineralnih sirovina, među kojima su osnovni vapnenac i lapor, a slijede glina, pijesak, tufovi,

boksit, rude željeza, gips i drugi. U procesu se također upotrebljava industrijski otpad, poput talioničke zgure i letećeg pepela. Važno je da sirovine sadrže minerale potrebne za formiranje klinkera ili da služe kao izvor aditiva koji se dodaju tijekom mljevenja klinkera. Izbor sirovina ovisi o njihovoj dostupnosti na određenom području te o vrsti i svojstvima cementa koji se proizvodi. Osnovni kemijski spojevi u klinkeru su kalcijevi silikati, kalcijevi aluminati i kalcijevi aluminoferiti, koji tvore četiri najzastupljenija minerala u klinkeru (tablica 3.1).

Naziv minerala	Kemijska formula	Opis
<b>C<sub>3</sub>S</b> Alit	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Najzastupljeniji mineral silikatnog klinkera Kada reagira s vodom oslobađa velike količine gašenog vapna ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) i topline Razvija potpunu čvrstoću nakon 7 dana.
<b>C<sub>2</sub>S</b> Belit	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Drugi po redu najzastupljeniji mineral silikatnog sastava Karakteristike i očvršćivanje su slabije izražene u odnosu na alit Nakon 28 dana razvija potpunu čvrstoću.
<b>C<sub>3</sub>A</b> Trikalcij aluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	U kontaktu s vodom brzo hidratizira, što dovodi do smanjanja obradivosti betona - potrebno dodati gips kako bi se usporila hidratacija Velika količina nije poželjna u cementu jer se oslobađa velika količina vode koje onda ostavljaju šupljine u betonu. Aluminat dovodi do razvoja čvrstoće unutar 24 sata.
<b>C<sub>4</sub>AF</b> Ferit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Nije bitan za konačnu čvrstoću. Ako je potrebno smanjiti udio trikalcij aluminata dodaje se željezna ruda u sirovinsko brašno

Tablica 3.1. Spojevi minerala cementa i najznačajnije karakteristike (Mandić i dr., 2023)

Iz kemijskog sastava ovih minerala može se vidjeti da su najzastupljeniji oksidi u klinkeru kalcijev oksid ( $\text{CaO}$ ), silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ), aluminijski oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i željezov oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Važno je napomenuti da ovi oksidi u klinkeru nisu prisutni kao slobodni oksidi, već se međusobno vežu i tvore navedene minerale. Ipak, u cementu

može postojati mali udio slobodnog kalcijevog oksida (živo vapno - CaO). Notacija u obliku oksida koristi se jer kemijska analiza daje rezultate u postocima pojedinih oksida, omogućujući da se sastav i vrsta cementa izraze udjelom oksida.

Primarni mineral potreban za proizvodnju klinkera je kalcijev karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), koji je visoko zastupljen u vapnencima i nekim vrstama lapora, što čini ove sirovine ključnima za proizvodnju cementa. Osnovna reakcija u proizvodnji klinkera je kalcinacija kalcijevog karbonata, pri kojoj se, na temperaturi iznad  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{CaCO}_3$  razlaže na ugljični dioksid i kalcijev oksid (živo vapno, CaO), prema reakcijskoj jednadžbi. Kalcijev oksid tada reagira s drugim oksidima stvarajući minerale klinkera.

Ostali potrebni oksidi potječu iz različitih sirovina. Lapori, kao sedimentne stijene, sadrže 20–80 % glinovitih minerala i 20–80 % kalcita, čime osiguravaju izvor  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  i ostalih oksida. Neka ležišta kvalitetnog lapora prirodno sadrže optimalan omjer kalcita i drugih minerala, što omogućuje proizvodnju portland cementa (silikatnog cementa) bez dodavanja drugih sirovina. Kada primarne sirovine nemaju dovoljan udio ključnih komponenti ili su potrebna specifična svojstva cementa (poput miješanih portland ili aluminatnih cementa), kombiniraju se različite sirovine kako bi se postigao željeni sastav. Gline i pijesak pružaju visok udio  $\text{SiO}_2$ , boksit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a rude željeza  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

U tablici 3.2. prikazan je primjer kemijskog sastava triju sirovina koje se miješanjem u određenim omjerima koriste za dobivanje tipičnog sastava sirovine za klinker portland cementa. Gips je također važna sirovina u proizvodnji cementa, ali ne sudjeluje u reakcijama tvorbe klinkera unutar peći. Dodaje se pri mljevenju klinkera kako bi regulirao vrijeme vezivanja cementa, tj. usporio ga (djeluje kao retardant). U tipičnom portland cementu, njegov udio je 2-4 %. Gips se dobiva rudarenjem iz prirodnih ležišta ili kao nusproizvod čišćenja dimnih plinova iz termoelektrana (proces odsumporavanja). Uz gips, u procesu mljevenja klinkera često se dodaju pucolani (poput industrijskog letećeg pepela i silicijske prašine, ili prirodnih tufa), talionička zgura i vapnenac. Ovi dodaci poboljšavaju svojstva cementa, povećavajući otpornost na vodu, agresivne uvjete, sulfate i alkalije, te smanjujući toplinu hidratacije i povećavajući ranu čvrstoću betona. Talionička zgura, leteći pepeo i silicijska prašina, koji su industrijski otpadni materijali, također imaju važnu ekološku ulogu. Budući da svjetska proizvodnja cementa raste, pri proizvodnji klinkera troši se velika količina energije, a  $\text{CO}_2$  otpušta u

atmosferu tijekom kalcinacije. Korištenje ovih zamjenskih materijala omogućuje smanjenje udjela klinkera u cementu na ispod 40 %, čime se štedi energija i smanjuju emisije štetnih plinova.

Komponenta	Udio u sirovini ( % )			Udio u miješanoj sirovini ( % )
	Vapnenac	Lapor	Boksit	
SiO <sub>2</sub>	0,77	30,51	14,61	13,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26	3,6	50,81	3,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	2,24	20,04	1,83
CaO	54,09	32	0,35	42,45
MgO	0,91	1,08	-	1,27
TiO <sub>2</sub>	-	-	2,1	0,18

Tablica 3.2. Primjer kemijskog sastava sirovina za portlandski klinker (Mandić i dr. 2023)

Cementne sirovine, osim glavnih oksida (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sadrže i druge primjese u obliku minerala ili oksida. Među njima se nalaze magnezijev oksid, slobodni kalcijev oksid, alkalije, te oksidi P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> i BaO, ali u vrlo malim količinama (Mandić i dr., 2023).

Uzimajući u obzir kemijska svojstva cementa, Mandić i dr. (2023) dijele sastojke cementa na one koji daju hidraulično vezivo i na one koji se nazivaju primjesama. Sastojci koji omogućuju hidraulično vezivanje uključuju CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, koji tijekom procesa pečenja stvaraju:

- 3 CaO x SiO<sub>2</sub>
- 3 CaO x Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- 2 CaO x SiO<sub>2</sub>
- 4 CaO x Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

dok u primjese spadaju:

- Netopivi ostatak
- Gubitak žarenjem

- Slobodni CaO
- CaO vezan i CaCO<sub>3</sub>
- CaSO<sub>4</sub>
- CaS
- MgO
- FeO
- Alkalije

CaO kao hidraulični sastojak cementa potječe iz kalcijevog karbonata (CaCO<sub>3</sub>). Budući da se cement proizvodi od smjese s omjerom tri dijela vapnenca i jednog dijela gline, CaO je kvantitativno najzastupljeniji sastojak cementa. Ostali oksidi, poput Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, potječu iz gline, lapora, laporastih glina, kvarca i drugih sirovina kiselog karaktera, pri čemu netopivi ostatak čine uglavnom teško topivi silikati.

Gubitak žarenjem tijekom pečenja sirovine obuhvaća tri sastojka koji napuštaju masu u ovom redosljedu: vlaga, kristalna voda i CO<sub>2</sub>. Vlaga i kristalna voda ostaju u minimalnim količinama u cementu, dok CO<sub>2</sub> može biti prisutan u značajnijim količinama ako je tehnološki proces loše vođen, što dovodi do stvaranja vapna koje hidrolizira i veže CO<sub>2</sub> iz atmosfere, tvoreći karbonat. Iako ovaj proces nema ozbiljne posljedice za beton, karbonat kao inertan materijal smanjuje hidrauličnu vrijednost cementa.

Slobodni CaO je najnepoželjniji sastojak cementa i pojavljuje se kao rezultat lošeg vođenja tehnološkog procesa:

- ako omjer kiselih oksida nije pravilno određen, ostaje višak vapna koji se nije vezao,
- ako proces pečenja nije postigao temperaturu sinteriranja, pa dio vapna nije reagirao s kiselim oksidima. Prisutnost slobodnog vapna u cementu uzrokuje nestabilnost volumena cementa zbog naknadne hidratacije slobodnog vapna. Ove neželjene posljedice slobodnog vapna u cementu mogu se ublažiti duljim odležavanjem klinkera, pri čemu se slobodno vapno najprije hidratizira, a potom prelazi u karbonat.

CaO vezan u CaCO<sub>3</sub> predstavlja posljednju fazu transformacije slobodnog CaO u CaCO<sub>3</sub> i kao takav je bezopasan. CaSO<sub>4</sub> potječe iz sadrenca (CaSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O), koji se dodaje klinkeru za regulaciju vremena vezivanja cementa. Međutim, višak CaSO<sub>4</sub>



također je nepoželjan jer može dovesti do destrukcije očvrsnule cementne mase stvaranjem  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ .

MgO dolazi iz vapnenca, koji može biti čisti  $\text{CaCO}_3$  ili dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ). MgO je još štetniji od CaO, jer njegova hidratacija može trajati godinama uz značajne promjene volumena. FeO potječe iz gline, a nastaje zbog redukcijskih zona u peći tijekom pečenja, kada dolazi do manjka kisika za formiranje  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Alkalije dolaze iz glinenih sirovina, smanjuju stupanj zasićenja vapna jer ometaju reakciju vapna s kiselim oksidima. Njihova interakcija s nekim silikatima može dovesti do alkalnih reakcija koje razaraju očvrsnulu cementnu masu.

Određivanje CaO u cementu provodi se standardnim kemijskim postupcima koji se koriste za analizu silikata. Dobivena vrijednost CaO predstavlja ukupni sadržaj CaO u cementu, ali izračunavanje hidrauličnog modula na temelju tih podataka nije precizno, jer se CaO u klinkeru veže na različite kemijske sastojke, stvarajući razne spojeve. Osim hidrauličnog CaO vezanog u obliku silikata, aluminata i aluminoferita, postoji i nehidraulični CaO vezan u obliku sljedećih spojeva:

- CaO vezan na  $\text{CO}_2$  u  $\text{CaCO}_3$
- CaO vezan na  $\text{SO}_3$  u  $\text{CaSO}_4$
- CaO vezan na S u CaS
- CaO kao slobodno vapno.

Kako bi se dobila točna vrijednost hidrauličnog CaO, koji je vezan u spojevima poput dikalcij-aluminata, trikalcij-silikata, trikalcij-aluminata i trikalcij-aluminoferita, potrebno je od analitički dobivene vrijednosti CaO oduzeti CaO vezan u oblicima  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ , CaS, kao i slobodni CaO. Tek tada dobiva se stvarna vrijednost hidrauličnog CaO, što omogućuje točan izračun hidrauličnog modula.

Prema načinu otvrdnjavanja veziva se dijele na:

- nehidraulična ili zračna veziva
- hidraulična veziva

Zračna veziva su materijali koji, pomiješani s vodom, stvrdnjavaju na zraku, no nisu otporni na djelovanje vode. U ovu skupinu spadaju ilovača, nekarbonatizirano vapno, sadra (gips), vodeno staklo i slična veziva.

Hidraulična veziva, s druge strane, stvrđavaju i na zraku i u vodi, te nakon otvrđivanja postaju otporna na djelovanje vode. U ovu skupinu spadaju hidraulična vapna, aluminatni cement, portland cement (PC), portland cement s dodacima i drugi slični materijali. Neka važnija mineralna veziva prikazana su u tablici 3.3.

Vrsta veziva	Naziv materijala
Zračna veziva	Gašeno vapno, sadra/gips, glina
Hidraulična veziva	Cementi (PC, PC s dodacima), hidraulično vapno
Vatrostalna veziva	Glina (vatrostalna glina)

Tablica 3.3. Podjela veziva prema načinu otvrđivanja (Mandić i dr., 2023)

Cementi koji su predmet ovog rada spadaju u hidraulična veziva, pa će u nastavku biti objašnjeno svojstvo njihove hidratacije.

Prema Mandić i dr. (2023), kada hidraulično vezivo dođe u dodir s vodom, prolazi kroz nekoliko faza koje utječu na njegovo ponašanje. U početku zadržava stabilnost neko vrijeme, a zatim slijedi naglo povećanje viskoznosti, što označava početak vezivanja. U ovoj fazi često dolazi do oslobađanja topline. Na kraju dolazi do stabilizacije oblika mase, pri čemu se formira čvrsta struktura. Stabilizacija oblika nije trenutna, a čvrstoća materijala nastavlja rasti s vremenom. Proces vezivanja može se objasniti različitim teorijama, a poznato je da portland cement (PC) pri kontaktu s vodom prolazi kroz faze hidrolize, stvaranja gela i kristalizacije.

Međutim, detalji tih procesa još uvijek nisu u potpunosti razjašnjeni. Reakcija cementa s vodom uključuje reakciju svake komponente zasebno, pa je važno promatrati hidrataciju svake komponente pojedinačno.  $C_3A$  reagira s vodom odmah, stvarajući kristalne hidrate poput  $C_3H_6$ ,  $C_4AH_{18}$  i  $C_2AH_8$ , uz oslobađanje velike količine topline. Ako se brza reakcija hidratacije  $C_3A$  ne uspori dodacima, portland cement bi zbog svoje visoke brzine vezanja postao neupotrebljiv kao građevinski materijal. Zbog toga se klinkeru prilikom mljevenja dodaje gips (sadra), koji je ključan za regulaciju reakcije hidratacije  $C_3A$  u procesu vezivanja cementa.

Sa stajališta reakcija u portland cementu, korisno je promatrati hidrataciju  $C_3A$  i  $C_4AF$  zajedno, budući da njihov produkt hidratacije u prisutnosti sulfata ima sličnu strukturu kao produkt koji nastaje iz samog  $C_3A$ . Ovisno o koncentraciji sulfata, hidratacija  $C_4AF$  može stvoriti spojeve  $C_6A(F)S_3H_{32}$  ili  $C_4A(F)SH_{18}$  (gdje je  $S=SO_3$ , a  $H=H_2O$ ), koji imaju različite kemijske sastave, ali strukturu sličnu etringitu i monosulfatu. Iako je reaktivnost  $C_4AF$  slabija od  $C_3A$ , ona raste s povećanjem sadržaja  $C_3A$ , kao i s nižim temperaturama tijekom proizvodnje cementa.

Radi jednostavnosti, obično se razmatra samo reakcija hidratacije  $C_3A$ , a ta se razmatranja mogu primijeniti i na  $C_4AF$ . Nekoliko teorija pokušava objasniti mehanizam usporavanja reakcije hidratacije  $C_3A$  uz dodatak gipsa (sadre). Jedna teorija kaže da prisutnost hidroksilnih iona, alkalija i sulfatnih iona smanjuje topivost  $C_3A$ . Ovisno o koncentraciji aluminata i sulfata, precipitirani kristalni produkt može biti kalcij-aluminat-trisulfat-hidrat (etringit) ili kalcij-aluminat-monosulfat-hidrat (monosulfat). U otopini zasićenoj kalcijem i hidroksilnim ionima, trisulfat kristalizira u obliku prizmatičnih iglica i naziva se etringit, dok monosulfat kristalizira u tankim heksagonalnim pločicama. Etringit nastaje prvi, a njegova precipitacija u portland cementu s dodatkom sadre doprinosi smanjenju konzistencije, stvrdnjavanju paste i ranom razvoju čvrstoće.

Kasnije, nakon što se sulfat istroši iz otopine i koncentracija aluminata poraste zbog obnovljene hidratacije  $C_3A$  i  $C_4AF$ , etringit postaje nestabilan i postupno prelazi u monosulfat, koji predstavlja konačan produkt hidratacije portland cementa.

Uz spomenute reakcije, dolazi i do stvaranja kalcij-silikat-hidrata (CSH), koji je ključni produkt hidratacije cementa. U prisutnosti vode, dikalcij-silikat ( $C_2S$ ) i trikalcij-silikat ( $C_3S$ ) hidratiziraju, pri čemu nastaje monokalcij-silikat i oslobađa se hidratizirano vapno ( $Ca(OH)_2$ ).

Možemo očekivati da će konačna čvrstoća cementa s visokim udjelom  $C_3S$  biti niža od one kod cementa s visokim udjelom  $C_2S$ , što su potvrdila mnoga istraživanja. S obzirom na to da tijekom ovih reakcija hidratacije nastaju različite količine  $Ca(OH)_2$ , očekuje se i da će trajnost cementnih pasti pri izloženosti kiselinama i sulfatnim vodama biti značajno veća kod cementa s višim sadržajem  $C_2S$ , što je također potvrđeno laboratorijskim i terenskim istraživanjima.

### 3.4. GEOTEHNIČKE KARAKTERISTIKE CEMENTA

Geotehničke karakteristike cementa razlikuju se ovisno o vrsti i svojstvima cementa, stoga će u daljnjem tekstu biti prikazane karakteristike dviju vrsta cementa: silikatnog i aluminatnog.

#### Vrste i svojstva silikatnog cementa

Prema Radić (2013), upotreba cementa u određenoj svrsi postavlja specifične zahtjeve na njegova svojstva, koja ovise o različitim čimbenicima. Među najvažnijima su sirovine korištene u proizvodnji klinkera i dodaci cementu. Na svojstva cementa utječe i proizvodni proces, uključujući vrstu i sastav goriva, temperaturu u peći, brzinu hlađenja klinkera itd. S obzirom na to da je ovdje naglasak na mineralnim sirovinama, analizirat će se njihov utjecaj na svojstva cementa.

- Udio različitih sirovina u mješavini određuje formiranje klinker minerala, čime se utječu na svojstva betona tijekom ugradnje, vezivanja te u očvrslulom stanju. Razlikujemo sljedeće vrste cementa:
- Čisti portland cement – sastoji se od minerala klinkera i dodatka gipsa. Njegova svojstva ovise o međusobnom odnosu glavnih minerala u klinkeru, omogućujući proizvodnju cementa s izraženom ranom čvrstoćom, niskom toplinom hidratacije ili otpornošću na sulfate i kiseline.
- Portland cement s dodacima – proizvodi se mljevenjem običnog portland klinkera s gipsom i do 35 % zgure ili vapnenca. Dodaci poput zgure ili pucolana smanjuju toplinu hidratacije i povećavaju otpornost na sulfate, dok dodatak vapnenca smanjuje propusnost betona. Ovaj cement je povoljan za gradnju zbog otpornosti na sulfate.
- Metalurški cement, pucolanski cement i miješani cement – proizvode se mljevenjem portlandskog klinkera uz dodatak više od 35 % zgure, pucolana ili njihove mješavine, pokazujući visoku otpornost na kemijske utjecaje.
- Bijeli cement – sastavom čisti portland cement, čiji se klinker proizvodi iz visokočistih vapnenaca i bijele gline (kaolina). Osim velike čvrstoće, bijeli cement je karakterističan po svojoj bjeloj boji, što ga čini pogodnim za dekorativne svrhe.

Svojstva silikatnog cementa prikazana su u tablici 3.4.

Svojstvo	Opis
Poboljšana tlačna čvrstoća	-
Razvoj rane čvrstoće	Silicij dioksid poboljšava ranu tlačnu čvrstoću betona. Ovo je osobito korisno za projekte koji zahtijevaju brzo stvrdnjavanje i ranu nosivost.
Konačna čvrstoća	Tlačna čvrstoća betona značajno je povećana zbog zgušnjavanja cementne matrice i pucolanske reakcije između pare silicijevog dioksida i kalcijevog hidroksida.
Poboljšana izdržljivost	-
Smanjena propusnost	Fine čestice silicij dioksida ispunjavaju praznine između čestica cementa, smanjujući propusnost betona i povećavajući njegovu otpornost na prodor vode i klorida.
Otpornost na kemikalije	Beton koji sadrži silicij dioksid pokazuje povećanu otpornost sulfata, kiseline i lužine.
Povećana vlačna i čvrstoća na savijanje	-
Poboljšana veza s armaturom	Upotreba silicij dioksida poboljšava vezu između betona i armaturnog čelika, poboljšavajući ukupni strukturni integritet.
Poboljšana obradivost	-

Tablica 3.4. Svojstva silikatnog cementa (Ukrainczyk, 1994)

### Vrste i svojstva aluminatnog cementa

Aluminatni cement se kemijski i mineraloški značajno razlikuje od silikatnog cementa. Njegov glavni mineral je monokalcijev aluminat (CA), koji čini više od 45 % ukupne mase. Aluminatni cement se klasificira i označava prema udjelu aluminata, koristeći oznaku KAC (kalcij aluminatni cement), uz broj koji označava postotak kalcijevog aluminata. Postoji nekoliko vrsta aluminatnih cemenata, od kojih svaki posjeduje specifična svojstva prilagođena određenim primjenama. Tri osnovne skupine aluminatnog cementa su:

- Cement sa niskim udjelom aluminata (npr. KAC 40),
- Cement sa srednjim udjelom aluminata (npr. KAC 50),
- Cement sa visokim udjelom aluminata (npr. KAC 70).

Cement s niskim i srednjim udjelom aluminata proizvodi se iz vapnenca visoke čistoće i boksita, koji može imati različit sadržaj željezova oksida. Zbog toga se često klasificira kao cement s niskim ili visokim udjelom željeza. Cement s visokim udjelom aluminata dobiva se iz vapnenca visoke čistoće i aluminijeva oksida (glinice). Korištenje glinice umjesto boksita osigurava visok udio aluminijeva oksida i nizak sadržaj nečistoća, poput željeza i silicija, te se ne klasificira prema udjelu željeza, jer je on zanemariv.

Za aluminatni cement, kvaliteta sirovina ovisi o kemijskom sastavu, tj. omjerima oksida u smjesi. U procesu taljenja važan je ne samo kemijski sastav nego i granulometrijski sastav, vlažnost i mineraloški sastav, budući da u vertikalnim pećima, gdje se sirovina ne melje, koristi se granulat veličine 50–100 mm (Mandić i dr., 2023).

Svojstva aluminatnog cementa su:

- Brzo stvrdnjavanje (2-4 h)
- Brzo postizanje čvrstoće (unutar 24 h)
- Dobra vatrostalna svojstva
- Velika otpornost na sulfate
- Otpornost na kiseline
- Velika otpornost na abraziju
- Niske temperature primjene do  $-10^{\circ}\text{C}$

### 3.5. PRIMJENA CEMENTA U GEOTEHNICI

Primjena cementa u geotehnici je široko rasprostranjena zbog njegovih izvanrednih svojstava vezivanja i stabilizacije tla. Cement se koristi u različitim geotehničkim projektima za poboljšanje nosivosti tla, smanjenje propusnosti i stabilizaciju terena. U nastavku će biti kratko objašnjene najvažnije geotehničke primjene cementa iako ima vrlo široku primjenu u svim granama građevinarstva.

Upotreba cementa u stabilizaciji tla (Sherwood, 1993) je ključan proces u geotehničkim projektima koji omogućava poboljšanje svojstava tla kako bi se postigla veća čvrstoća, stabilnost i smanjena propusnost. Ovaj proces je široko primjenjivan u građevinarstvu, posebice u izgradnji cesta, zgrada, mostova i drugih infrastrukturnih objekata, gdje se zahtijeva stabilna podloga. Proces se provodi obzirom da tla u prirodnom stanju često nemaju dovoljnu nosivost ili su previše propusna, što ih čini neadekvatnima za izgradnju. Dodavanjem cementa u tlo, dolazi do kemijske reakcije poznate kao pucolanska reakcija, pri kojoj se tlo i cement vežu i formiraju cementne spojeve. To rezultira poboljšanjem fizičkih i mehaničkih svojstava tla, uključujući:

- Povećanu tlačnu čvrstoću: Stabilizirano tlo postaje čvršće i otpornije na opterećenja, što je važno za temelje građevina.
- Smanjenu propusnost: Cement zatvara pore u tlu, čime se smanjuje količina vode koja može prolaziti kroz tlo.
- Poboljšanu otpornost na deformacije: Stabilizirano tlo ima manju sklonost deformacijama pri opterećenju, što je ključno za cestogradnju

Sljedeća korisna upotreba cementa u geotehnici je tehnika injektiranja. Koristi se u građevinskim i geotehničkim projektima za ispunjavanje praznina, pukotina ili šupljina u tlu, stijenama ili građevinskim elementima cementnim suspenzijama. Prema Lombardi i dr. (1993) injektiranje se koristi za stabilizaciju temelja postojećih ili novih građevina koje se nalaze na slabo nosivom tlu, u izgradnji tunela i podzemnih objekata za ojačanje stijena i sprječavanje prodiranja podzemnih voda, za popunjavanje pukotina u betonskim konstrukcijama. Na taj način se poboljšava strukturalna cjelovitost i otpornost na vodu i koroziju. Glavne vrste injektiranja cementom prema Karol (2003) su:

- Injektiranje cementnom suspenzijom: Ova metoda uključuje ubrizgavanje tekuće cementne suspenzije (cement + voda) u pukotine ili porozne materijale. Cementne čestice ispunjavaju praznine i nakon stvrdnjavanja formiraju čvrstu masu koja povezuje strukturu i povećava stabilnost.
- Injektiranje mikrocementom: Mikrocement je fini cement koji omogućava bolje prodiranje u sitne pukotine i šupljine koje običan cement ne može ispuniti. Mikrocement se koristi za injektiranje u fine strukture tla, poput pješčanih ili muljevitih naslaga, te u pukotine stijena.
- Injektiranje s dodatkom kemijskih aditiva: Ova metoda koristi cementnu smjesu s dodacima kao što su superplastifikatori, retarderi i ubrzivači kako bi se kontrolirala brzina vezivanja cementa i poboljšala njegova fluidnost, a time i prodiranje u porozni materijal.

Upotreba cementa za izradu nosivih slojeva u građevinarstvu je ključna za postizanje stabilnih, trajnih i nosivih podloga u infrastrukturnim projektima, kao što su ceste, zračne piste, parkirališta i druge površine s visokom frekvencijom opterećenja. Ovaj proces uključuje stabilizaciju tla ili agregata cementom kako bi se dobio sloj visoke nosivosti i otpornosti na vremenske uvjete i opterećenja. Prednosti primjene cementa u izradi nosivih slojeva su:

- Povećanje čvrstoće i nosivosti: Kada se cement koristi za stabilizaciju tla ili agregata, poboljšava se nosivost materijala. Cement se veže s česticama tla, formirajući čvrstu masu koja može podnijeti veće opterećenje od prirodnog, nestabilnog tla.
- Smanjenje deformacija: Stabilizirani nosivi slojevi imaju veću otpornost na deformacije pod opterećenjem

Cement se također koristi za stabilizaciju nasipa i podloga za željeznicu kako bi se smanjile deformacije i poboljšala nosivost pruge (O'Flaherty, 2002).

Upotreba cementa u izradi podzemnih konstrukcija igra ključnu ulogu u osiguravanju stabilnosti, trajnosti i otpornosti na vlagu, pritisak tla i prodiranje vode. Podzemne konstrukcije, poput tunela, podruma, podzemnih garaža i rudnika, suočavaju se s izazovnim uvjetima tla i vode, zbog čega je (cementni) beton nezaobilazan materijal u



ovakvim projektima. Prednost korištenja prema Mindess i dr. (2003) betona u podzemnim konstrukcijama očituje se kroz:

- Povećanje nosivosti i čvrstoće gdje cementom stabilizirane podzemne građevine osiguravaju dugotrajnu stabilnost i otpornost na velike pritiske tla, podzemne vode i opterećenja iznad zemlje. Beton stvara čvrste i kompaktne podloge koje mogu podnijeti intenzivna opterećenja.
- Otpornost na prodiranje vode gdje se cementne mješavine koriste za hidroizolaciju podzemnih konstrukcija, sprječavajući prodiranje podzemnih voda i vlage u građevinu. Time se povećava trajnost objekata i smanjuje rizik od korozije i oštećenja betonskih elemenata.
- Fleksibilnost i prilagodljivost: Cement se može modificirati dodavanjem različitih aditiva kako bi se poboljšala njegova otpornost na kemijske reakcije i osigurala bolja dugotrajnost u svim uvjetima.

### 3.6. KARAKTERISTIKE CEMENTA UPOTREBLJENOG U LABORATORIJSKIM ISPITIVANJIMA

Za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji korišten je cement tvrtke HOLCIM d.o.o., koji se proizvodi u tvornici Koromačno pod komercijalnim nazivom Holcim Expert® cement, pakiran u vrećama od 25 kg. Ova vrsta cementa često se koristi u građevinarstvu, posebno za temelje i konstrukcije gdje je potrebna niska toplina hidratacije, kao i za nosive betonske konstrukcije te betonske radove s višim zahtjevima za završnu čvrstoću. Osnovna fizikalno-kemijska svojstva ovog cementa prikazana su u tablici 3.5.

Fizikalna svojstva	Holcim Expert® cement CEM II/B-M (S-V) 42,5 N	Uvjet normi HRN EN 197-1; BAS EN 197:1
Postojanost volumena (Le Chatelier)	0 mm	≤ 10 mm
Početak vezivanja	180 min	≥ 60 min
Tlačna čvrstoća na 2 dana	23,0 MPa	≥ 10 MPa
Tlačna čvrstoća na 28 dana	50,0 MPa	≥ 42,5 ≤ 62,5 MPa
Kemijska svojstva		
SO <sub>3</sub>	2,5 %	≤ 3,5 %
Cl	0,02 %	≤ 0,1 %

Tablica 3.5. Fizikalna i kemijska svojstva Holcim Expert® cementa i usporedba s normom HRN EN 197-1 i BAS EN 197:1

Cement CEM II/B-M (S-V) 42,5 N prema normi HRN EN 197-1 ima 65-79% klinkera i 21-35% dodatka karbonatnog pepela, a ostala svojstva su:

- umjerena potreba za vodom
- mali gubitak početne konzistencije
- optimalno vrijeme vezanja cementa, prilagođeno za mnoge konstrukcije
- srednji razvoj čvrstoće
- vrlo umjeren razvoj topline hidratacije
- dobra otpornost na umjereno agresivne utjecaje zbog dodatka granulirane zgure i silicijskog letećeg pepela

### 3.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI

U ovom poglavlju prikazane su osnovne mehaničko-fizikalne i kemijske karakteristike cementa kao najčešće korištenog veziva u građevinarstvu.

Cement (lat. *\*caementum\**) općeniti je naziv za razne vrste hidrauličnih veziva, pri čemu se u praksi najčešće odnosi na tzv. portland cement. Osnovni sastojak portland cementa je klinker, dobiven pečenjem sirovine koja sadrži kalcijeve, silicijeve, aluminijske i željezne okside u odgovarajućim omjerima. Najčešće su to smjese vapnenca i gline, a mogu biti prirodne poput lapora ili tvornički pripravljene. Kvaliteta cementa izražava se prvenstveno klasom, odnosno tlačnom čvrstoćom standardnog morta nakon 28 dana, s osnovnim klasama cementa od 25, 35, 45 i 55 N/mm<sup>2</sup>.

Portland cement, uz klinker i gips, može sadržavati dodatke bez hidrauličnih svojstava, poput zgure visoke peći, pucolana ili letećeg pepela. Ovi fino mljeveni dodaci reagiraju s kalcijevim hidroksidom iz cementa, očvršćujući u prisutnosti vode. Osim što smanjuju količinu čistog cementa u betonskoj ili mortnoj smjesi, ovi dodaci poboljšavaju određena svojstva cementa, poput smanjenja topline hidratacije ili povećanja otpornosti prema sulfatima. Ako dodatni udio ovih tvari prelazi 35%, cement se naziva metalurškim ili pucolanskim cementom.

Postoje cementi za posebnu namjenu, poput cementa visokih ranih čvrstoća, cementa niske topline hidratacije za masivne betonske blokove ili sulfatno otpornih cementa za betone koji su izloženi kemijskoj agresiji sulfatnog tla ili vode.

## 4. LETEĆI PEPEO KAO VEZIVO

### 4.1. UVOD

U ovom poglavlju će se prikazati proces nastajanja letećeg pepela, kao i metode rukovođenja letećim pepelom nakon njegove proizvodnje, s naglaskom na odlaganje letećeg pepela na odlagališta kao na najčešću metodu njegovog zbrinjavanja. Osim toga, spomenut će se i određeni propisi i regulative vezane za leteći pepeo.

#### Proces nastajanja letećeg pepela

Leteći pepeo (eng. *fly ash*) je nusprodukt, tj. sekundarni proizvod, nastao izgaranjem ugljena u termoelektranama, te čiji je izgled letećeg pepela prikazan je na slici 4.1.. Različite boje su posljedica različitog kemijskog sastava (o čemu će kasnije biti više riječi). Leteći pepeo nastao kao produkt u termoelektranama je postao dostupan 1930-tih. U isto vrijeme su počela istraživanja koja su se temeljila na upotrebi letećeg pepela u betonima s hidrauličkim cementom, te se 1937. godine objavljeni i prvi radovi (Davis i dr., 1937.) koji su razmatrali mogućnost djelomične zamjene hidrauličkog cementa letećim pepelom, s obzirom da je hidraulički cement najskuplji sastavni dio betona. Upravo je u istoj literaturi prvi put upotrijebljen naziv „leteći pepeo“. Nedugo nakon toga, svoj uspon je počela industrija koja se „temelji na pepelu“, je već 1940-tih godina U.S. Bureau of Reclamation, za izgradnju brana, koristio beton čiji je sastavni dio bio leteći pepeo.

Termoelektrane, kao energetska postrojenja, energiju dobivaju sagorijevanjem goriva gdje je krajni cilj proizvodnja pare koja će pokretati turbinu, a zatim i generator električne energije. Postoje dvije tehnologije generiranja električne energije izgaranjem ugljena:

1. izgaranje u fluidiziranom sloju (eng. Fluidized Bed Combustion – FBC)
2. izgaranje smljevenog ugljena (eng. Pulverized Coal – PC)

Od navedenih, tehnologija češće se koristi tehnologija koja se temelji na izgaranju prethodno smljevenog ugljena.



Slika 4.1. Izgled letećeg pepela, s većim udjelom kalcija (a), s većim udjelom organskih tvari (b), (Kumar i dr., 2011)

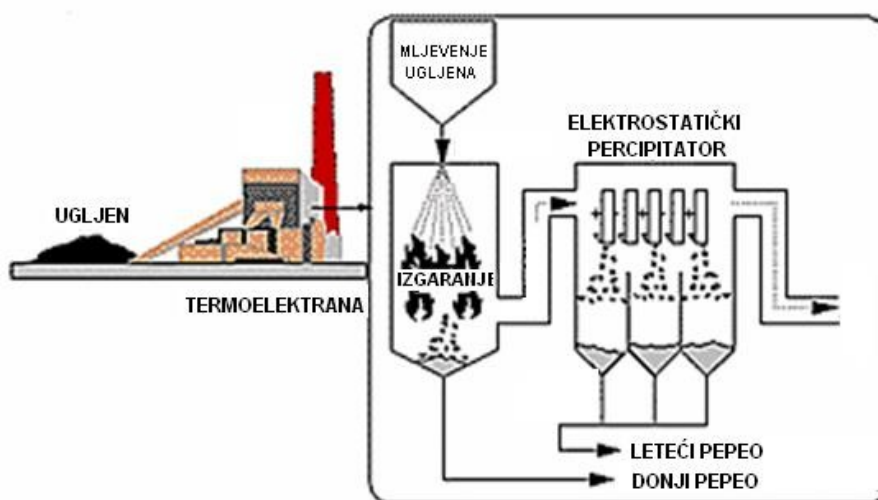
Tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju (Stonebridge, 1989, te Tavoulareas i dr. 1991) se primjenjuje kada ugljen ima visoki postotak sumpora, kojega je u svrhu smanjenja emisije, potrebno regulirati. Kod ove tehnologije se izgaranje ugljena ostvaruje miješanjem ugljena s vapnencom, dolomitom ili nekim drugim materijalom. Takva mješavina tijekom procesa izgaranja prelazi u tekuće stanje te se tako omogućuje potpuno izgaranje ugljena i uklanjanje sumpornih plinova. Ostvarene reakcije se mogu prikazati sljedećim jednadžbama (Anthony i dr., 2003):



Vidljivo je da se u ovom procesu sumpor iz ugljena veže u sumpor dioksid ( $\text{SO}_2$ ), a zatim se dalje veže u kalcijev sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ). Miješanje plinova i krutih tvari, omogućuje efektivnije kemijske reakcije i prijenos topline. Ovim se omogućuju manja emisija  $\text{SO}_2$ , prema Botha (2004) i do 12 puta. Temperatura izgaranja ovim postupkom su također manje u odnosu na tehnologiju izgaranja smljevenog ugljena i iznose oko 800-900°C. Manje temperature izgaranja rezultiraju i s manjim emisijama dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) od tehnologije izgaranja smljevenog ugljena, prema Botha (2004.) i do 4 puta. Međutim, niske temperature izgaranja rezultiraju s većom emisijom aromatskih hidrokarbona (Mastral i dr., 1995).

Kao što je već navedeno, tehnologija koja se češće koristi pri izgaranju ugljena je izgaranje prethodno smljevenog ugljena koji se zatim miješa sa zrakom i izgara na temperaturama 1300-1700 °C. Visoke temperature izgaranja ugljena pretvara mineralne nečistoće (glina, feldspati, kvarc i škrljavec) u fine čestice većinom sastavljene od

aluminij silikata, koje zatim odlaze iz komore za sagorijevanje pomoću ispušnih plinova. Kako se plinovi koji sadržavaju takve fine čestice izdižu, oni se hlade i stvrdnjavaju u sferične čestice koje čine leteći pepeo. Čine ga neorganske čestice sferičnog oblika promjera manjeg od 50 mikrona. Mnoge varijable utječu na karakteristike ovih čestica. Počevši od sastava ugljena, sve do efikasnosti uređaja kojim se vrši mljevenje ugljena, sustava izgaranja (temperatura i snabdjevanje kisikom), konfiguracijom samog bojlera u kojem dolazi do izgaranja, kao i o brzini hlađenja plinova. Prilikom izgaranja ugljena, leteći pepeo biva ‘zarobljen’ elektrostatskim ili mehaničkim uređajima za taloženje ili nekim drugim filtracijskim uređajem. Osim letećeg pepela, dolazi i do stvaranja ‘donjeg’ pepela (eng. bottom ash). Taj tip pepela se skuplja na dnu bojlera pri izgaranju gdje pada radi svoje težine. Sagorijevanjem ugljena u svrhu dobijanja topline, ostaci su sadržani od 80% letećeg pepela i 20 % donjeg pepela. Navedena tehnologija je prikazana na slici 4.2



Slika 4.2. Shema industrijskog procesa nastajanja pepela (Turuallo i dr., 2018)

Osim letećeg podnog pepela, pod nusprodukte nastale izgaranjem ugljena (eng. CCP – Coal Combustion Products), ubrajamo kotlovsku zguru i FGD gips. CCP nusprodukti imaju, veću ili manju, primjenu u graditeljstvu, sanaciji okoliša ili proizvodnji određenih materijala kao što su metalne legure ili plastike gdje povećavaju čvrstoću bez dodavanja dodatne težine.

Kako većina termoeletrana u SAD-u koristi bitumenski ugljen koji ima sadržaj sumpora od 2.0 do 3.5 %, u svrhu smanjenja emisija sumpor oksida u atmosferu, donešeni su amandmani koji su postrožili restrikcije emisije. Stoga su brojne termoelektrane morale ugraditi opremu za desumporizaciju plinova (flue gas desulfurization – FGD), čime je kao nusprodukt nastao FGD gips. Takav trend, ugradnje opreme da desumporizaciju, se proširio globalno.

Maseni sadržaj pepela u ugljenu može varirati u ovisnosti u ugljenu koji je korišten u procesu izgaranja. Tako subbitumenski i antricitni ugljeni imaju oko 4-5 % pepela, dok pak neki lignitni ugljeni imaju i do 35-40 % pepela. Važan parametar kod izgaranja letećeg pepela je postotak neizgorenog ugljena, koji uvelike ovisi o tehnologiji izgaranja. Bojleri modernih termoeletrana, svojom efikasnošću, omogućuju da leteći pepeo danas u sebi sadrže oko 1 % ugljena. Navedena količina je neznatna u odnosu na gornju dopuštenu granicu po standardima diljem svijeta. Pod ‘dopuštenom’ granicom se smatra količina koja je prihvatljiva u okvirima daljnje primjene letećeg pepela u aplikacijama navedenim u sljedećim poglavljima. Tako američki standard ASTM C-618 ima gornju granicu ugljena od 6 %, dok je prema indijskom propisu Indian IS: 3812 code gornja granica visokih 12 % ugljena. Upravo ovo je jedan od razloga zašto se većina letećeg pepela nastavlja gomilati na odlagalištima. Uz starija postrojenja, takvi leteći pepeli imaju razinu neizgorenog ugljena veću nego što je dopušteno. Na primjer, pri korištenju letećeg pepela u portland-cement betonskim mješavinama, veće količine neizgorenog ugljena podrazumijevaju veću količinu vode, i mogu značajno povećati potrebu za kemijskim dodacima.

Također, velike brzine plinova u zoni izgaranja, kod modernijih termoeletrana, rezultiraju s letećim pepeo veće finoće od letećeg pepela nastalog u starijim termoelektranama. Takve visoke brzine plinova veće frakcije pretvaraju u sitnije frakcije kod kojih 40% čestica ima frakcije veličinu manju od 10 mikrona (1 mm). Za usporedbu veličine sastavnih čestica cementa iznose oko 25 mikrona. Upravo ove čestice najviše pridonose 7-dnevnoj i 28-dnevnoj čvrstoći betonskih mješavina, još uvijek najvećoj primjeni letećeg pepela na svjetskoj razini. Čestice između 10 i 45 mikrona reagiraju sporije i najviše utječu na 28-dnevnu do jednogodišnju čvrstoću, dok

čestice letećeg pepela veće od 50 mikrona se ponašaju slično kao i čestice pijeska i mogu služiti jedino kao filer betonskim mješavinama.

Važno je spomenuti činjenicu da moderne termoelektrane, koje koriste ugljen za dobijanje energije, u pravilu proizvode vrlo konzistentan, ujednačen, leteći pepeo. Čestice letećeg pepela, dobivene iz iste elektrane i nastale izgaranje mistog ugljena, imaju vrlo male varijacije u veličini, kemijskom sastavu, mineraloškom sastavu i gustoći.

### **Odlaganje letećeg pepela**

Proces urbanizacije i industrijalizacije su neizbježni procesi koji sa sobom donose niz negativnih efekata kako po okoliš tako i po socijalni život. Jedan od takvih problema je proizvodnja velikih količina industrijskih otpada koje je potrebno odlagati na pravilan način, te njima rukovoditi na način da su primarno zadovoljeni svi sigurnosni aspekti, a potom i ostali, finansijski, vremenski... Sam proces upravljanja industrijskim otpadom je vrlo kompleksan. Odlaganje industrijskog otpada bez rukovođenja može rezultirati sa negativnim posljedicama po ekološku ravnotežu.

U radu Swan i dr. (2007.) je industrijski proces predstavljen kao ekosistem te je navedeno da je najefikasniji ekosistem onaj koji minimalizira ulazne, limitirane, resurse, kao i izlaz u obliku otpadnih materijala. Minimalizacija se ostvaruje optimalizacijom interakcije različitih komponenti koje sudjeluju u procesu, kao što su resursi, tj. sirovi materijal, proizvodnja, potrebe potrošača, i rukovođenje otpadom. Rukovođenje otpadom ima iznimno važnu ulogu u očuvanju efikasnosti takvog ekosistema.

Postoje različiti načini rukovođenja letećim pepelom nakon procesa izgaranja. Naime, nakon što su čestice letećeg pepela pokupljene elektrostatskim ili mehaničkim uređajima potrebno je daljnje rukovođenje takvim otpadom. Najprihvatljiviji način je korištenje letećeg pepela kao materijala koji će se moći koristiti u daljnjim aplikacijama. Najčešće takav leteći pepeo nije potrebno odlagati, već se može dalje transportirati.

Osim cementne industrije koja je najveći svjetski 'potrošač' letećeg pepela, moguća je njegova primjena u ostalim granama građevinarstva kao što je geotehnika. Primjeri primjene letećeg pepela u geotehničkim aplikacijama će se dati u poglavlju 4. Međutim, ako takav način rukovođenja letećim pepelom nije moguć, potrebno je njegovo odlaganje. Često je odlaganje potrebno i u slučajevima kada postoji plan za daljnje



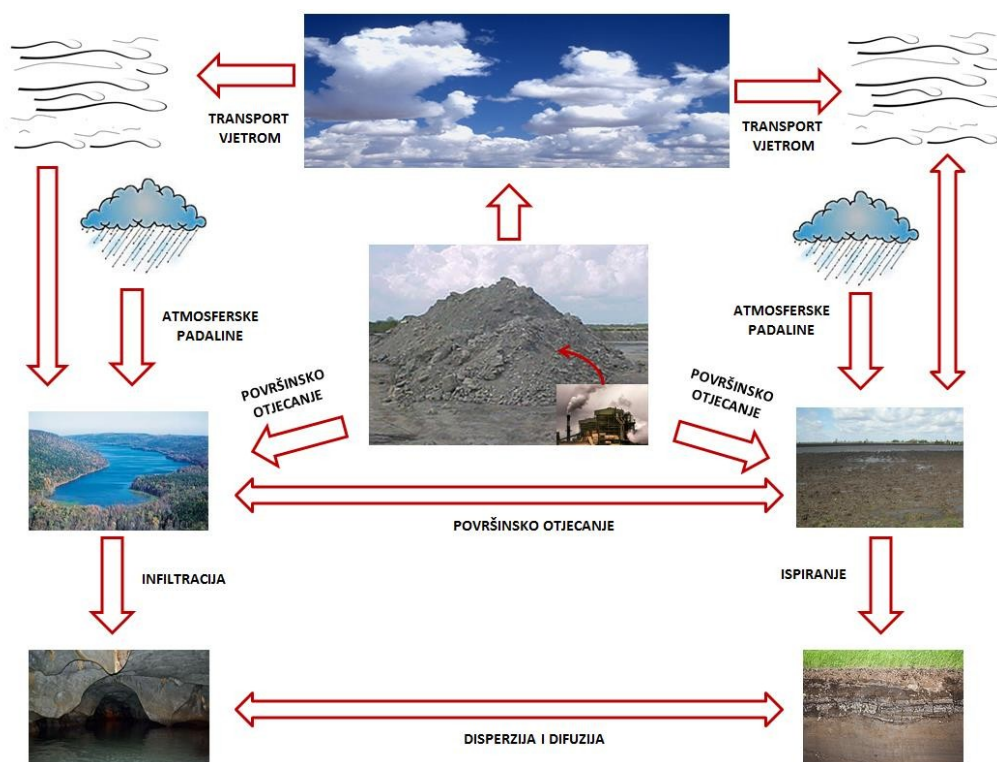
korištenje letećeg pepela, ali vrijeme proizvodnje letećeg pepela se ne podudara s trenutnim vremenom tržišnih zahtjeva za letećim pepelom.

Odlaganje se može vršiti na dva načina, pa se stoga razlikuju „mokro” i „suho” odlaganje letećeg pepela.

Suho odlaganje je metoda kod koje se leteći pepeo odlaže na odlagališta pri suhim ili blago vlažnim uvjetima. Nakon prikupljanja letećeg pepela, on se puni na kamione koji ga zatim transportiraju do predviđenog odlagališta. Odlagalište ekspandira daljnjim nagomilavanjem otpada. Problem se dalje produbljuje kada se odlagalište ispuni letećim pepelom do te mjere kada više ne može primiti daljnje količine pepela. Ovo rezultira s potrebom za pronalaženjem novih odlagališnih površina. Osim toga, ako se letećim pepelom ne manipulira na pravilan način, radi svoje male težine može postati nošen zrakom. Ovo može izazvati brojne nepovoljne posljedice. Osim što izloženost ovakvim lebdećim česticama može imati direktan utjecaj na ljudsko zdravlje, njihovim udisanjem, također ima značajan utjecaj na onečišćenje tla i voda, površinskih i podzemnih. Shema transporta lebdećih čestica koje nisu pravilno skladištene može se prikazati shemom na slici 4.3.

Nagomilani leteći pepeo, radi svoje male težine, se lako transportira vjetrom do određene lokacije, bilo da se radi o površinskim tlima ili površinskom vodama. Leteći pepeo do njih može dospjeti i preko atmosferskih padalina. Ako su čestice letećeg pepela dospjele do površinskih voda postoji velika opasnost od njihove infiltracije u podzemne vode. Ako su pak čestice vjetrom ili padalinama dospjele na površinska tla, moguće je njihov daljnji transport vjetrom, ali i ispiranje u dublje dijelove tla.

Procesima disperzije i difuzije čestice letećeg pepela mogu prelaziti iz dubljih tala u podzemne vode, i obratno. Ovakav 'tok' letećeg pepela može imati značajan negativan utjecaj po ekologiju područja, te je stoga potrebno pravilno rukovođenje da bi se ovakvi scenariji spriječili. Upravo je vlaženje ovakvog letećeg pepela jedna od mjera kojom se sprječava opisan 'tok' letećeg pepela. Osim suhog odlaganja letećeg pepela na deponije, moguće je i suho odlaganje letećeg pepela u predviđene silose, čime se sprečava njegovo raznošenje vjetrom.



Slika 4.3. Potencijalni „tok“ letećeg pepela pri suhom odlaganju

Mokra metoda je metoda odlaganja letećeg pepela koja, osim što zahtjeva velike površine za odlaganje, zahtjeva i velike količine vode i energije. Velike količine vode su potrebne iz razoga da se od letećeg pepela napravi emulzija koja ima određene karakteristike. Naime, već u samoj termoelektrani, nakon što je leteći pepeo prikupljen, on se miješa s vodom te hidraulički transportira cjevovodima do odlagališta, tzv. laguna. Ovisno o udaljenosti transporta kao i o mogućim razlikama u nadmorskim visinama, kod ovog odlaganja je potrebna izrazito velika količina energije.

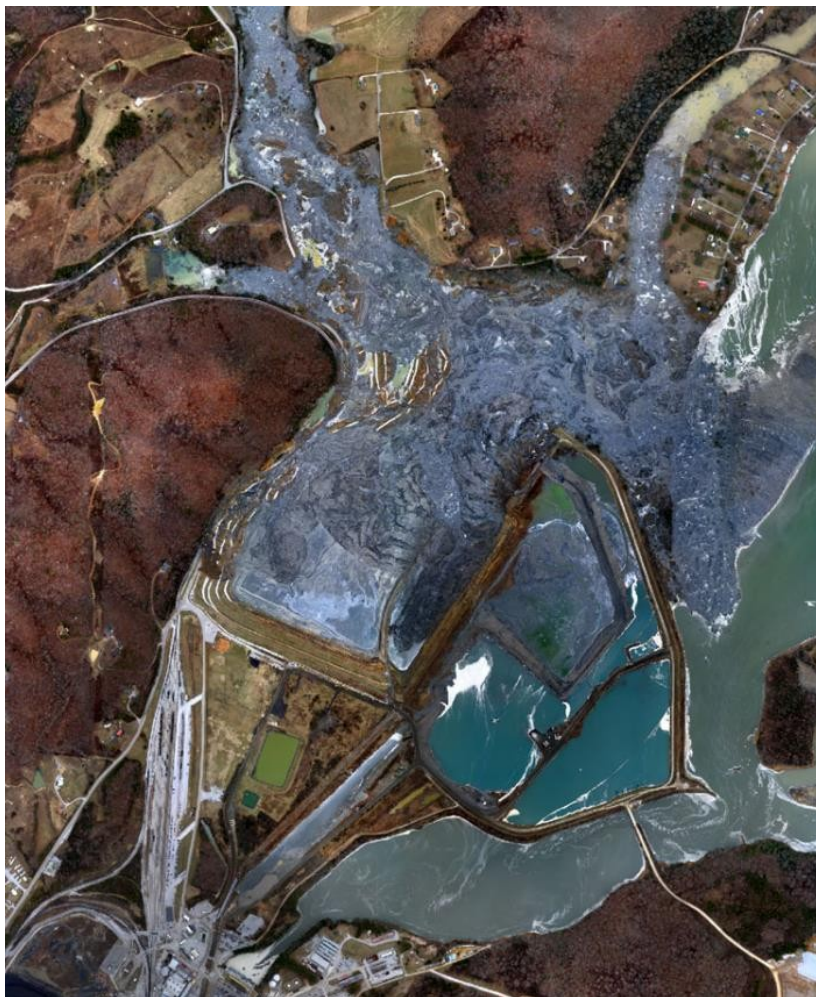
Miješanje većih količina vode s letećim pepelom će spriječiti transport letećeg pepela na način na koji je prikazano na slici 4.3. Međutim, potencijalna opasnost kod ovog odlaganja je drugačije naravi. Kako smjesa letećeg pepela i vode sadrži različite metale i soli, curenje vode može rezultirati s većim ekološki neprihvatljivim posljedicama (Kessler, 1981). Većina laguna danas nije zaštićena nikakvim mjerama koje bi reducirale potencijalnu opasnost prilikom curenja opasnih tvari u tlo i podzemne vode. Takve mjere uključuju postavljanje geomembrana na kontaktu s tлом ili neke druge sisteme za sklupljanje procjednih tvari. Novije termoelektrane posjeduju takve sustave

za monitoring, ali nije poznat broj nezaštićenih odlagališta starijih termoelektrana. Upravo je ovo razlog zašto mokra metoda, iako ekonomski prihvatljivija, ima trend smanjene primjene u odnosu na suhu metodu odlaganja. Ovakva odlagališta se najčešće formiraju na način da se oko odlagališta napravi prsten u obliku nasipa koji ima sastavne dijelove jednake kao i standardni nasipi u geotehničkoj praksi, gdje je posebna pažnja usmjerena na procjeđivanja kroz nasip i kroz kontrolu njegove stabilnosti. Detaljne upute i metode za formiranje ovakvih laguna okruženih zaštitnim nasipima se može pronaći u literaturi Gandhi (2005) dok je na slici 4.4. prikazana laguna za odlaganje mokrim postupkom na kojoj se u pozadini vidi zaštitni nasip.



Slika 4.4. Lagune za odlaganje letećeg pepela mokrim postupkom ([www.hindu.com](http://www.hindu.com))

Kod ovakvog odlaganja, osim dominantnog problema procjeđivanja u podzemlje, postoji i problem procjeđivanja kroz tijelo nasipa kao i slom nasipa radi gubitka mehaničke otpornosti. Stoga je od iznimne važnosti pravilno dimenzionirati okolni nasip, da bi se izbjegle katastrofalne posljedice kakve su poznate u svjetskoj literaturi među kojima je i što je slučaj puknuća nasipa na lokaciji Kingston, Tennessee, SAD, gdje se posljedice mogu vidjeti na slici 4.5.



Slika 4.5. Puknuće nasipa na lokaciji Kingston, Tennessee, SAD i posljedično onečišćenje letećim pepelom (www.tva.com)

### **Propisi i regulative vezane za leteći pepeo**

Prema literaturi Kumar i dr. (2011) danas se u svijetu 41% električne energije proizvede termoelektranama koje se baziraju na izgaranju ugljena. Da bi se proizvele tolike količine energije potrebne su količine ugljena od čak 6.74 milijardi tona. Kao rezultat izgaranja tolikih količina ugljena, nastaju posljedično i velike količine letećeg pepela, koje prema literaturi Dikshit i dr. (2011), iznose oko 700 milijuna tona.

S obzirom na tolike količine, potrebno je iznimno kvalitetno rukovođenje letećim pepelom na svjetskoj razini, što nije slučaj. Brojne se polemike vode oko svrstavanja letećeg pepela među potencijalno opasne materijale, te su stoga doneseni brojni propisi i regulative. Također, brojni propisi i regulative su donešeni i u okvirima iskorištenja

letećeg pepela u daljnjim aplikacijama, kao što je cementna industrija, industrija proizvodnje građevinskih materijala, geotehničke aplikacije.

Kako je navedeno, već dulje vrijeme se na svjetskoj razini vodi polemika oko pepela kao opasnog proizvoda. ‘Američka agencija za zaštitu životne sredine’ je izbacila pepeo iz regulative o štetnim materijama, gdje kao objašnjene za talav postupak navode da ljudska populacija nije direktno izložena djelovanju pepela bilo prenošenjem pepela zrakom bilo putem zagađenih podzemnih voda, kako je prikazano na slici 1.3. i da je potencijal za izazivanje štete određen lokalnim faktorima, a ne samim letećim pepelom. S druge strane ‘Američki institut za istraživanje električne energije’ navodi da pepeo nastao kao nusprodukt u termoelektranama na ugljen, kontaminira površinske i podzemne vode sa nekoliko neorganskih sastojaka koji štetno djeluju na floru i faunu, a posebno na zdravlje ljudi. Detaljno o toksičnim sastojcima i potencijalnoj radioaktivnosti letećeg pepela dati će se u poglavlju o kemijskom sastavu i kemijskim karakteristikama letećeg pepela, kao i usporedba granica koncentracija toksičnih sastojaka u letećem pepelu s granicama koje su dopuštene od strane ‘Američke agencije za zaštitu životne sredine’.

Unatoč prisutstvu toksičnih sastojaka, nesvrstavanje CCP (Coal Combustion Products) produkata u potencijalno opasne rezultiralo je s njihovim odlaganjem na velika odlagališta u blizini termoelektrana. U pravilu, leteći pepeli ne sadrže visoke količine toksičnih sastojaka, međutim određeni leteći pepeli mogu sadržati značajne količine toksina. 2007. godine je EPA (Agencija za zaštitu okoliša, SAD) provela opsežno istraživanje u kojem su ispitali dugotrajni utjecaj odlagališta CCP produkata na okoliš i ljudsko zdravlje, navodeći da po najgorem scenariju, stanovnici koji žive u blizini odlagališta imaju šansu 1 naprema 50 za oboljenje od karcinoma, primarno radi utjecaja arsena. Tada su, međutim, odbili dati podatke o potencijalno nestabilnim lokacijama. Ipak, 2009., objavili su da planiraju revidirati pravila koja bi uključivala nove granice dopuštenih vrijednosti otpuštanja toksina.

U Europskoj uniji se pak, s aspekta primjenjivosti letećeg pepela u odnosu na utjecaj na okoliš primjenjuju primjenjuju norme - Environmental Code of Practice for the Sale and Use of Pulverised Fuel Ash (PFA) kojima se regulira proizvodnja pepela, razvoj zakonodavstva, kao i procjena rizika na okliš uslijed primjene letećeg pepela.

Donošenje jasnih propisa i regulativa ključno je u nadolazećem razdoblju, s obzirom na očekivano povećanje proizvodnje letećeg pepela. Iako metoda izgaranja ugljena nije ekološki najprihvatljivija, zbog različitih čimbenika ostaje ekonomski isplativ način proizvodnje električne energije, posebno u Europi. Zbog porasta cijena i nesigurnosti u opskrbi plinom, koji se najvećim dijelom uvozi iz Rusije, investicije u termoelektrane na ugljen u Europi bilježe rast, posebno u Njemačkoj, Poljskoj, Češkoj i zemljama istočne Europe, kao i u susjednim zemljama poput Slovenije i Italije. Primjerice, samo u Njemačkoj, uglavnom zbog planiranog zatvaranja nuklearnih elektrana, do 2020. godine planirana je izgradnja 26 novih termoelektrana na ugljen, uz ulaganja od oko 30 milijardi eura.

## 4.2. MINERALOGIJA I KEMIJSKI SASTAV LETEĆEG PEPELA

U sljedećim poglavljima će biti riječi o mineralogiji letećih pepela, kao i o njihovom kemijskom sastavu i kemijskim karakteristikama. S obzirom da se na svjetskoj razini podjela letećih pepela vrši upravo na temelju njihovog kemijskog sastava, također će biti riječi i o podjeli letećeg pepela. S obzirom da je fokus ovog rada na primjeni letećeg pepela u geotehničkom inženjerstvu.

### Mineralogija letećeg pepela

Glavni faktori koji utječu na mineralogiju letećeg pepela su kemijski sastav ugljena, proces mljevenja ugljena (pulverizacije), proces izgaranja pulveriziranog ugljena, tehnologija 'prikupljanja' letećeg pepela i aditivi koji se koriste prilikom procesa izgaranja (Bin – Shafique i dr., 2003).

Neorganski oksidi u letećem pepelu mogu biti u kristalastoj ili staklastoj fazi. Relativne količine kristalastih i staklastih materijala u letećem pepelu ovise ponajviše o tehnologiji izgaranja i procesu 'ostakljavanja'. U slučaju da je najviša temperatura izgaranja veća od 1200°C, a vrijeme hlađenja je relativno kratko, materijal će se dominantno sastojati od materijala u staklastoj fazi. Kada je postupak hlađenja postupan, leteći pepeo će dominantno tvoriti čestice kristalaste faze. U najvećem broju slučajeva, prema Izvještaju Američkog Instituta za Beton, leteći pepeo se sastoji od staklastih sferičnih čestica koje su ili čvrste ili šupljikave. Staklaste čestice čine od 60 do 90 % ukupne mase letećeg pepela, dok je ostatak građen od kristalaste faze. Sadržaj stakla značajno utječe na reaktivnost letećeg pepela. Leteći pepeo nastao od ugljena koji sadrže manje količine kalcija (antricitni i bitumenski ugljeni) ima aluminosilikatne staklene čestice, dok leteći pepeo nastao izgaranjem ugljena s većim sadržajem kalcija (lignitni i subitumenski ugljeni) ima kalcij aluminosilikatne staklene čestice. Leteći pepeli s niskim sadržajem kalcija sadrže kemijski neaktivne kristalaste faze kao što su kvarc, mulit, hematit, prema Diamond et al (1981.), dok prema McCharty i dr. (1984.) leteći pepeli s visokim sadržajem kalcija uz navedene imaju i dodatne kristalaste faze kao što su anhidrit, dikalcij silikat, trikalcij aluminat, vapno... Upravo ove dodatne faze se mogu pronaći u letećem pepelu klase C (samocementirajući leteći pepeo, detaljnije

opisan u sljedećem poglavlju) i njima se mogu njegova objasniti poculanska i cementirajuća svojstva.

Ove dvije faze, staklasta i kristalasta, nisu u potpunosti neovisne jedna o drugoj. Kristalasta faza može biti prisutna unutar staklaste matrice ili spojena na staklaste čestice.

### **Kemijski sastav i kemijske karakteristike letećeg pepela**

Kao što je već navedeno, sastav letećih pepela je vrlo varijabilan. Varijabilnost je posljedica lokacije s koje je vađen ugljen za izgaranje, te njegovog tretmana prije spaljivanja, kao i o samoj tehnologiji izgaranja. Tako da leteći pepeli nastali izgaranjem ugljena vađenog s jedne lokacije mogu imati različite kemijske sastave ako je primjenjena različita tehnologija njihovog izgaranja.

Kako je već ranije spomenuto, leteći pepeo se u osnovi sastoji od tri osnovne komponente: ne-kristalasto aluminosilikatno staklo, kristalasti minerali (kvarc, mulit...) i neizgorene čestice ugljika.

Osnovni kemijski elementi u letećem pepelu su redom (od najvećeg do najmanjeg prisutstva): silicij (Si), aluminij (Al), kalcij (Ca), ugljik (C), magnezij (Mg), kalij (K), natrij (Na), sumpor (S), titan (Ti), fosfor (P) i mangan (Mn). Većina ovih elemenata se nalazi u samoj jezgri letećeg pepela koja je relativno stabilna (Dikshit i dr. (2011.))

Leteći pepeo također sadrži veće količine oksida, hidroksida, te sulfata željeza i kalcija.

Osnovni spojevi letećih pepela su silicij dioksid ( $\text{SiO}_2$ ), željezo oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) i aluminij oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) s manjim količinama kalcij oksida (vapna -  $\text{CaO}$ ), kalij oksida ( $\text{K}_2\text{O}$ ), natrij oksida ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), magnezij oksida ( $\text{MgO}$ ), titanskog dioksida ( $\text{TiO}_2$ ), fosfor pentoksida ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) i sumporov (VI) oksid ( $\text{SO}_3$ ). U pepelu nastalom izgaranjem bitumenskog ugljena, na tri glavne komponente  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  otpada preko 90 %, dok pepeo subbitumenskog i lignitnog ugljena sadrži visoke postotke  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  i  $\text{SO}_3$ . Silicij dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) u letećem pepelu je primarno rezultat glinenih minerala i kvarca u ugljenu.

Prema Izvještaju Američkog Instituta za Beton postotak silicij dioksida u letećem pepelu može varirati u granicama od 35 do 60%. Antricitni i bitumenski ugljeni sadrže veće postotke glinenih minerala u svojim neizgorenim dijelima od subbitumenskih i lignitnih ugljena, te stoga leteći pepeli nastali izgaranjem antricitnih i bitumenskih



ugljena su bogatiji silicijevim dioksidom. Ako se leteći pepeo namjerava koristiti u betonskim mješavinama, onda ova komponenta,  $\text{SiO}_2$ , najviše doprinosi poculanskoj reakciji. Drugi spoj, željezo oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), je rezultat prisutstva željeza u ugljenu i iznosi od 4 do 20%, dok je aluminij oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) je rezultat gline u ugljenu, dok jedan dio dolazi od organskih spojeva u bitumenskim i lignitnim ugljenima. Njegov postotak varira od 10 do 30 %. Kalcij oksid ( $\text{CaO}$ ) varira u granicama od 1 do 35% i dolazi od kalcij karbonata i kalcij sulfata iz ugljena. Ove granice nisu u potpunosti primjenjive na neke leteće pepele na svjetskoj razini, s obzirom da se one odnose na leteće pepele nastale u SAD-u. Jako dobar primjer za to je leteći pepeo iz termoelektrane Gacko u Bosni i Hercegovini koji ima postotak kalcij oksida i do 70%. O kemijskom sastavu letećeg pepela ovisi i njegova boja. Boja letećeg pepela varira od krem do tamno smeđe ili sive. Krem boja je indikator visokog postotka kalcija, dok su sivije boje indikatori većeg prisutstva organskih tvari (Bin – Shafique i dr., 2003)

Sadržaj ugljika u letećem pepelu je nastao kao rezultat nepotpunog izgaranja ugljena i organskih aditiva u procesu skupljanja. Sadržaj ugljika se obično ne može odrediti direktno, ali se može pretpostaviti iz veličine nazvane 'gubitak žarenjem' (eng. LOI – Loss of ignition). LOI će međutim sadržavati i  $\text{CO}_2$  izgubljenog razgradnjom hidrata ili karbonata koji u prisutni u letećem pepelu. Stvarni sadržaj ugljika varira unutar granica od 0.3 do 0.8% manje od vrijednosti LOI-a (Izveštaj Američkog Instituta za Beton, 2010).

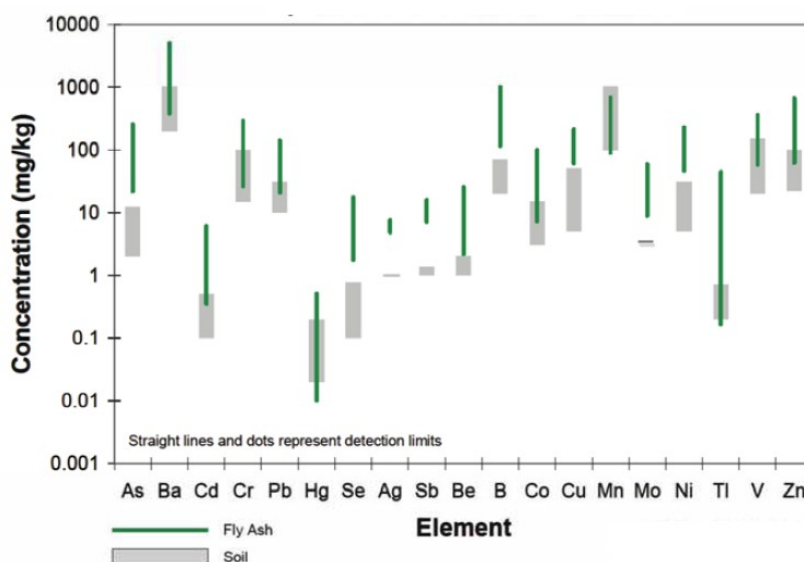
Kako je već navedeno, sadržaj pojedinih komponenti može ovisiti o većem broju faktora, a u tablici 4.1. će se dati okvirni prikaz sadržaja pojedinih oksida kao i gubitka žarenjem ovisno o vrsti ugljena koji je korišten u procesu izgaranja.

Komponenta (%)	Tip ugljena korištenog pri izgaranju		
	Bitumenski	Subbitumenski	Lignitni
$\text{SiO}_2$	20-60	40-60	15-45
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5-35	20-30	20-25
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	10-40	4-10	4-15
$\text{CaO}$	1-12	5-30	15-40
LOI	0-15	0-3	0-5

Tablica 4.1. Postotci osnovnih sastojaka letećeg pepela pri izgaranju različitih ugljena (Izveštaj Američkog Instituta za Beton, 2010).

Osim navedenih, dominantnih, sastojaka letećeg pepela, postoji još niz sastojaka koji su potencijalno toksični i radioaktivni, te će se stoga u nastavku poseban osvrt dati na ove kemijske karakteristike letećeg pepela.

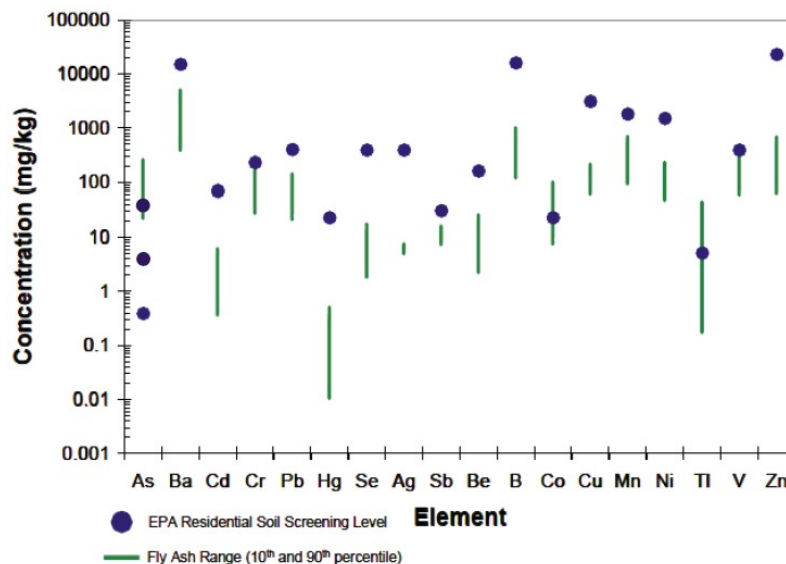
S obzirom da se na svjetskoj razini još uvijek vode prepirke o štetnosti letećeg pepela, bitno je navesti toksične sastojke koje leteći pepeo u sebi može sadržavati. Leteći pepeli sadrže niz toksičnih sastojaka kao što su arsen, bor, kadmij, krom, kobalt, olovo, živa, selen, torij i uran, kao i dioksini i poli-aromatski ugljikovodici (PAU). Iako se ovi elementi nalaze u tragovima u ugljenu, uslijed procesa izgaranja, njihova se koncentracija povećava u odnosu na količine prisutne u izvornom ugljenu. Prema istraživanju Fernandez i dr. (1994) količine arsena, selena, kadmija, kroma, nikala, antimona, olova, cinka, kositra i bora se povećavaju 4 do 10 puta u odnosu na njihove količine u izvornom ugljenu. U rezultatima istraživanja Instituta za istraživanje električne energije iz SAD-a (EPRI, 2010.) dana je slika 4.6. koja prikazuje koncentracije toksičnih sastojaka u letećem pepelu u usporedbi s tlima. Vidljivo je da se koncentracije toksičnih sastojaka u letećem dijelom poklapaju s koncentracijama u tlima, dok su u letećim pepelima granice koncentracija ipak veće.



Slika 4.6. Usporedba koncentracije toksičnih sastojaka letećeg pepela i tla (EPRI, 2010)

U istom istraživanju se međutim može pronaći usporedba graničnih koncentracija toksičnih sastojaka letećih pepela s dopuštenim granicama prema 'Američkoj agenciji za

zaštitu životne sredine'. Vidljivo je da je većina sastojaka ispod dopuštenih granica (slika 4.7.).



Slika 4.7. Usporedba koncentracije toksičnih sastojaka letećeg pepela s dopuštenim vrijednostima prema "Američkoj agenciji za zaštitu životne sredine" (EPRI, 2010)

Od svih toksičnih sastojaka, specifični su torij i uran jer su oni i potencijalno radioaktivni elementi, te će se u nastavku dati poseban osvrt na potencijalnu radioaktivnost letećeg pepela. Detaljno ispitivanje o potencijalnoj radioaktivnosti letećeg pepela dano je u literaturi Zielinski i dr. (1998) Iako se leteći pepeo većinom sastoji od organskih tvari, upravo su neorganske one koje su potencijalno opasne za okoliš i ljudsko zdravlje. Neki elementi koji se nalaze u ugljenu su po svojoj prirodi radioaktivni, a to se primarno odnosi na torij i uran kao i na brojne produkte nastale njihovim raspadanjem kao što su radon i radij. Iako su sa samog aspekta toksičnosti uran i torij manje toksični od ostalih sastojaka navedenih ranije u ovom poglavlju (arsen, kadmij, krom, kobalt, olovo), oni su za razliku od ostalih sastojaka potencijalno radioaktivni.

Međutim, ispitivanjem na velikom broju letećih pepela (preko 2000) se ustanovilo da sadržaj urana i torija u letećim pepelima pada unutar granica količine urana za većinu tala i stijena. Stoga radioaktivni elementi u letećem pepelu ne bi trebali biti uzrok čestim nagađanjima o potencijalnoj radijaciji i utjecaju radona u letećem pepelu. Također dosadašnja (doduše ograničena) ispitivanja vodom otopljenog urana i radija, do čega je

došlo uslijed kontakta odlaganog pepela i prirodne vode, pokazuju da su koncentracije radioaktivnih elemenata ispod razina koje bi mogle utjecati na ljudsko zdravlje. Slično su potvrdila i ispitivanja Saxena i dr. (2001) koja su također ustvrdila da su razine radioaktivnih tvari u letećem pepelu jednaka onima u tlima i stijenama, a Vijayan i dr. (1999) su utvrdili da su radioaktivne razine nešto manje kod letećih pepela nastalih izgaranjem lignitnih ugljena, nego što su radioaktivne razine letećih pepela nastalih izgaranjem bitumenskih i subbitumenskih ugljena.

Od kemijskih karakteristika letećeg pepela bitne su, osim toksičnosti i radioaktivnosti, su njegova kiselost (pH faktor) i topljivost.

Prema kiselosti pepeli se klasificiraju na bazične, kisele i neutralne. Bazični elektrofilterski pepeli sadrže visok postotak oksida kalcija, magnezija, željeza i aluminijski, pored  $\text{SiO}_2$ . Bazični pepeli imaju izražena hidraulična ili pucolanska svojstva. Ovakvi pepeli imaju 30-35% staklaste tvari, portlantida 15-20 %, brucita 15-20 %, anhidrita 12-15%, te ostalih minerala od 10-15 %. Kiseli elektrofilterski pepeli se također mogu upotrebiti kao hidraulično vezivo i imaju istu primjenu kao bazični pepeli. Kod njih je pak mineralni sastav takav da se sastoje od 50-60% staklaste tvari, mulita 15-20% te ostalih minerala 20-30%. Prema Botha (2004) leteći pepeli nastali kao nusprodukt tehnologije izgaranja smljevenog ugljena su neutralno-kiseli, dok su leteći pepeli nastali izgaranjem u fluidiziranom sloju pretežno bazični.

### **Podjela letećeg pepela**

Podjela letećeg pepela se vrši na temelju njihovog kemijskog sastava. Naime, još uvijek najčešća primjena letećeg pepela je i građevinskoj industriji gdje se on koristi kao poculan.

Poculani su silicijski ili silicijsko-aluminijski materijali koji posjeduju nikakva ili mala cementna svojstva, ali koji uz prisutstvo vlage kemijski reagiraju s kalcij hidroksidom ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), i tvore spojeve koji imaju cementna svojstva. Zanimljivo je da sam naziv 'poculan' dolazi od imena talijanskog grada „Pozzuoli“ gdje su, prije 2000 godina, Rimljani mješajući vulkanski pepeo s vapnom, agregatom i vodom kao produkt dobijali mort i beton. Uloga letećeg pepela u cementnim kompozitima može biti kemijska (gdje dolaze do izražaja njegova pucolanska svojstva) ili fizikalna (kada djeluje kao punilo).

Pucolanska aktivnost može značajno varirati za različite leteće pepele. Prema Sivapullaiah i dr. (1998), faktori koji utječu na pucolansku aktivnost su količina reaktivnog silicij oksida u letećem pepelu, prisutstvo vlažnosti i slobodnog vapna, te finoća letećeg pepela. Nadalje utječu i niski sadržaj ugljika i sadržaj željeza. S obzirom da za primjenu letećeg pepela u betonskim mješavinama on mora imati odgovarajući kemijski sastav, u literaturi French i dr. (2007) je dan pregled standarda brojnih zemalja s aspekta kemijskog sastava letećeg pepela pri primjeni u betonskim mješavinama.

Izrazito je značajna primjena letećeg pepela u okviru geopolimerizacijskih procesa. Naime budući da leteći pepeli spadaju u aluminosilikatne sustave, posljednjih godina su se intenzivirala istraživanja u okviru kojih se leteći pepeli koriste u sintezi nestandardnih veziva – geopolimera (gdje su se do sada dominantno koristile različite gline kao aluminosilikatni sustavi).

Postoje brojne podjele letećeg pepela, međutim naširoko prihvaćena je podjela dana američkim standardom ASTM C 618 koji dijeli leteći pepeo u dvije dominantne kategorije: leteći pepeo klase F i leteći pepeo klase C. Podjela se vrši na temelju kemijskog sastava, točnije količini vapna (CaO) kojeg leteći pepeo sadrži.

#### *Leteći pepeo klase F*

Leteći pepeo klase F nastaje izgaranjem tvrdih, starijih ugljena poput antracitnog i bitumeniziranog ugljena. Ova vrsta pepela posjeduje pucolanska svojstva i sadrži manje od 15 % vapna. Silikati i aluminij-silikati prisutni u letećem pepelu klase F zahtijevaju cementni agens (kao što je portland cement, vapno ili hidratizirano vapno) kako bi u prisutnosti vode reagirali i stvorili cementni spoj. Dodavanje kemijskog aktivatora letećem pepelu klase F omogućava formiranje tzv. geopolimera.

#### *Leteći pepeo klase C*

Leteći pepeo klase C nastaje izgaranjem mlađih lignitnih ili subbitumeniziranih ugljena. Osim pucolanskih svojstava, ima i samocementirajuće karakteristike, što znači da mu nije potreban dodatni aktivator za očvršćivanje. Ova vrsta letećeg pepela sadrži više od 20% vapna i u prisutnosti vode očvrstne, s povećanjem čvrstoće tijekom vremena.

Alkalne i sulfatne primjese kod letećeg pepela klase C su veće nego kod klase F, zbog čega ga često nazivamo "samocementirajućim letećim pepelom."

Samocementirajući leteći pepeo ima visok sadržaj kalcij oksida, koji omogućava stvrdnjavanje kroz kemijsku reakciju s vodom, slično procesu hidratacije portland cementa. Stupanj samocementiranja određuje se standardima kao što je američki ASTM D 5239, kojim se propisuje ispitivanje tlačne čvrstoće na uzorku kocke od letećeg pepela i vode (u omjeru voda/leteći pepeo od 0,35). Nakon sedam dana, uzorak se klasificira prema svojim samocementirajućim karakteristikama.

U tablici 4.2. je dana podjela letećih pepela prema samocementirajućim karakteristikama u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći. Važno je napomenuti da se ovim standardom karakteriziraju uzorci sastavljeni od mješavina samog letećeg pepela i vode, te ne mogu služiti za procjenu potencijalne čvrstoće nasatale kao rezultat interakcije letećeg pepela i tla ili agregata. Stupanj samoočvršćavanja letećeg pepela je ovisan i o gustoći letećeg pepela, starosti i temperaturi.

Vrlo samocementirajući leteći pepeo	> 3.4 MPa
Umjereno samocementirajući leteći pepeo	0.7 – 3.4 MPa
Nesamocementirajući leteći pepeo	< 0.7 MPa

Tablica 4.2. Podjela letećih pepela prema cementirajućim karakteristikama i pripadajuće jednoosne tlačne čvrstoće (ASTM D 5239)

Nadalje, definiran je i sadržaj pojedinih komponenti u kemijskom sastavu, da bi se neki leteći pepeo mogao svrstati u klasu C ili klasu F. Navedeno je prikazano u tablici 4.3.

KEMIJSKI SASTAV	KLASA C	KLASA F
Suma SiO <sub>2</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	min. 50	min. 70
Sumporov (VI) oksid (%)	max. 5.0	max. 5.0
Sadržaj vlage	max. 3.0	max. 3.0
Gubitak žarenjem - LOI	max. 6.0	max. 6.0

Tablica 4.3. Podjela letećih pepela na klase (ASTM D 5239)

Razlog radi kojega gubitak žarenjem smije iznositi najviše 6,0% je u činjenici da veće razine LOI u pravilu rezultiraju s diskoloracijom i nezadovoljavajućim djelovanjima kemijskih aditiva i plastifikatora u betonu.

Postoji značajna razlika kada govorimo o hidrataciji različitih tipova letećeg pepela (Ismaiel, 2006). Kao što je poznato, proces hidratacije podrazumijeva reakciju vapna CaO s oksidima aluminija ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicija ( $\text{SiO}_2$ ) i željeza ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) gdje se uz prisutstvo vode stvara cementni materijal. Postupak hidratacije s može predstaviti sljedećim jednadžbama:



CSH – Kalcij silikat hidrat



CAH – Kalcij aluminat hidrat

Leteći pepeo tipa C ima dovoljnu količinu vapna da reagira sa silicijskim i aluminjskim materijalima koji se nazivaju poculanskim, dok je letećem pepelu tipa F, zbog male količine, potrebno dodavanje vapna da bi se jednak proces hidratacije mogao ostvariti. Leteći pepeo se može dodatno smljeti da i se dobile sitnije čestice, čime se značajno povećava reaktivnost (koja je funkcija i brojnih drugih parametara).

Leteći pepeli nekih termoelektrane ne spadaju u navedene, najčešće, kategorije. Primjer za ovo su termoelektrane koje se temelje na prethodno spomenutom izgaranju u fluidiziranom sloju, koji se pokazao kao vrlo djelotvorna tehnologija za izgaranje goriva s visokim postotkom sumora pri čemu dolazi do manje emisije  $\text{SiO}_2$  koji biva „uhvaćen“ vapnencom koji se dodava prilikom potupka izgaranja.

### 4.3. GEOTEHNIČKE KARAKTERISTIKE LETEĆEG PEPELA

Pri primjeni letećeg pepela u geotehničkim aplikacijama, izrazito je važno poznavati njegove geotehničke karakteristike. Različite karakteristike su od ključne važnosti za pojedinu primjenu, bilo da se radi o poboljšanju fizikalno – mehaničkih karakteristika tla i stijene, o stabiliziranju stijenskih pokosa mlaznim betonom koji sadrži leteći pepeo, u formiranju nasipa gdje leteći pepeo sudjeluje kao ispuna i gdje nisu od značaja njegove poculanske karakteristike.

U nastavku će se dati prikaz najznačajnijih geotehničkih karakteristika letećeg pepela. Prikaz je rezultat brojnih ispitivanja gdje se kroz standardne geotehničke laboratorijske ili terenske pokuse nastojale odrediti veličine kao što su veličina čestica i graduiranost letećeg pepela, specifična težina letećeg pepela, Atterbergove granice (granica tečenja, plastičnosti i stezanja) letećeg pepela, koeficijenti propusnosti letećeg pepela, karakteristike pri zbijanju letećeg pepela, konsolidacijske karakteristike letećeg pepela, parametri posmične čvrstoće letećeg pepela, potencijal likvefabilnosti, te boja.

#### **Gustoća**

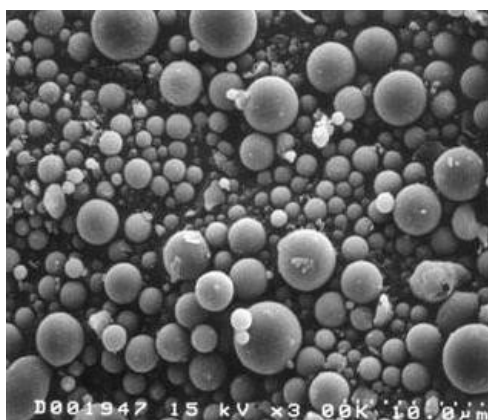
Jedna od ključnih karakteristika letećeg pepela prilikom njegove primjene u geotehnici je njegova gustoća. Ispitivanjem Pandian (2004) je ustanovljeno da je njegova gustoća oko  $2.0 \text{ g/cm}^3$ , ali može varirati u širokim granicama (od  $1,6 \text{ g/cm}^3$  do  $3,1 \text{ g/cm}^3$ ). Prema Luke (1961) ona iznosi od  $1.97 \text{ g/cm}^3$  do  $3.02 \text{ g/cm}^3$ . Vidljivo je da, uz manja odstupanja, ispitivanja pokazuju relativno manju gustoću letećeg pepela u odnosu na standardne gustoće tala. Ova varijacija u gustoći ovisi o velikom broju faktora, od vrste ugljena čijim je izgaranjem nastao pepeo, do same tehnologije izgaranja, veličine čestica, graduiranost i njihovog kemijskog sastava. U većini slučajeva je pokazano da leteći pepeo ima veću gustoću od donjeg pepela i od pepela pomiješanog s vodom i taloženog u lagune. Također, gustoća letećeg pepela raste ukoliko je udio sitnijih čestica veći. Zbog manje gustoće u odnosu na tlo, prednost korištenja letećeg pepela u geotehnici se očituje kroz niz primjera. Vrlo je česta primjena letećeg pepela u kod potpornih konstrukcija gdje se koristi kao sastavni dio materijala kojim se zamjenjuje tlo kao materijal za ispunu kod potpornih konstrukcija. S obzirom da je takav materijal lakši, pritisci koji se ostvaruju na potpurnu konstrukciju su manji. Ista prednost dolazi do izražaja kod formiranja nasipa od takvih materijala, pogotovo ako se oni nalaze na



lošem tlu, pa se uslijed manje gustoće letećeg pepela ostvaruju i manja opterećenja na temeljno tlo, a time i manja slijeganja. Razlog manje gustoće može biti prisutstvo velikog broja šupljikavih čestica iz kojih zarobljeni zrak ne može izaći, ili varijacije u kemijskom sastavu, posebno sadržaju željeza, te sprega oba navedena razloga (Dewangan i dr., 2010) U istraživanju Kim i dr. (2008) autori navode da je upravo manji sadržaj željezo oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) razlog manje gustoće ispitivanog letećeg pepela od  $2,30 \text{ g/m}^3$  u odnosu na ispitivani leteći pepelo koji ima gustoću i do  $2,80 \text{ g/m}^3$ . Navedeno je potvrđeno i u literaturi Roy i dr. (1984) gdje je navedeno da veći sadržaj željeza rezultira s većom gustoćom, ali je u istom ispitivanju zaključeno da veći sadržaj ugljika rezultira s manjom gustoćom.

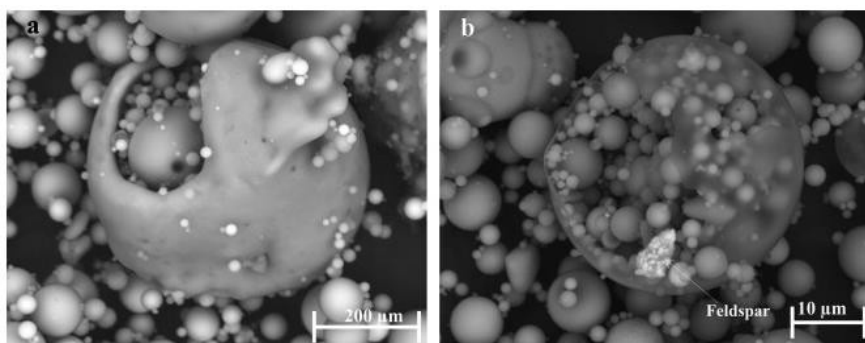
### **Veličina i oblik čestica**

Veličina i oblik čestica letećeg pepela su rezultat tipa ugljena čijim sagorijevanjem je nastao. Nadalje, veličina i oblik ovise i o stupnju smljevenosti ugljena prije procesa izgaranja, temperaturi izgaranja i snabdjevanju kiskom, te i vrsti kolektora kojim se leteći pepeo prikupi. U literaturi Lane i dr. (1982) se navodi da je oblik čestica letećeg pepela funkcija njihove veličine. Čestice letećeg pepela su oblikom sferične, a mogu biti čvrste ili šupljikave (slika 4.8.).



Slika 4.8. Izgled čestica letećeg pepela pod elektronskim mikroskopom (uvećanje 2000 puta) (Lane i dr., 1982)

Kрупniji leteći pepeli pak mogu sadržavati veće porozne čestice s otvorima, tzv. plerosfere (Goodarzi i dr., 2009), prikazane na slici 4.9.



Slika 4.9. Izgled plesosfera (Goodarzi i dr., 2009)

Ako se promatra leteći pepeo s aspekta geotehničkog materijala, onda je pogodno usporediti veličinu njegovih čestica s veličinom čestica standardnih tala. Tla u standardnoj geotehničkoj praksi se mogu podijeliti na šljunke, pijeske, prahove i gline. Granice pojedinih tala s aspekta veličine čestica su dane na slici 4.10. Leteći pepeo se dominantno sastoji od čestica veličine praha s primjesama čestica pješćanih frakcija. Stoga, u najvećem broju slučajeva, leteći pepeo se može klasificirati kao pješćani prah ili rjeđe kao prašinski pijesak.

Bitumenski leteći pepeli imaju veličinu čestica sličnu česticama prahova ili finijeg pijeska (manje od 0,075 mm), dok su subbitumenski leteći pepeli također imaju čestice veličine praha, ali nešto su krupnije od čestica bitumenskog letećeg pepela. Neka ispitivanja (Pandian, 2004) su pokazala da se leteći pepeo može sastojati od čestica praha s primjesama glinenih čestica.

vista tla	promjer zrna (mm)	oznaka	podjela	promjer zrna (mm)
šljunak	60 - 2	G	krupan	60 - 20
			srednji	20 - 6
			sitan	6 - 2
pijesak	2 - 0.06	S	krupan	2 - 0.6
			srednji	0.6 - 0.2
			sitan	0.2 - 0.06
prah	0.06 - 0.002	M	krupan	0.06 - 0.02
			srednji	0.02 - 0.006
			sitan	0.006 - 0.002
glina	< 0.002	C		

Slika 4.10. Granulometrijski sastav tipičnih tala (prema Pandian, 2004)

S obzirom na takav granulometrijski sastav, prašinih pijesaka, leteći pepeo ulazi unutar granica granulometrijskih sastava tala koji su osjetljivi na smrzavanje. Upravo je osjetljivost na smrzavanje često prepreka kod nekih inženjera da ga koriste kao punilo. Usporedbe radi donji pepeo se većinom sastoji od čestica veličine pješćanih frakcija s manjim udjelom čestica frakcija praha.

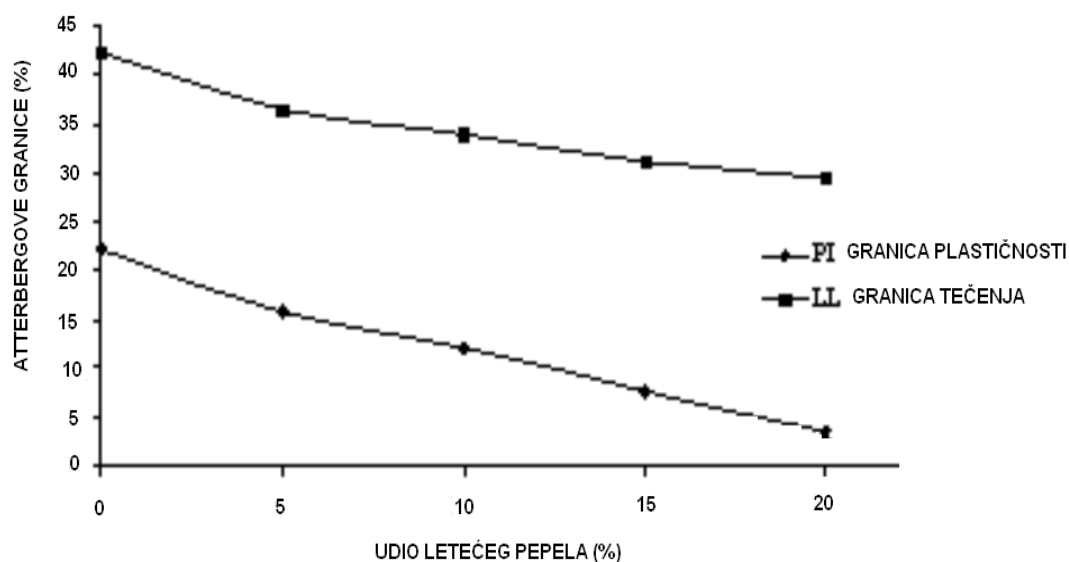
Prema Pandian (2004) koeficijent uniformnosti pepeli nastali sagorijevanjem ugljena imaju koeficijent uniformnosti od 1,59 do 14, dok im je koeficijent zakrivljenosti od 0,61 do 3,70. Iako su ovi rezultati dobiveni na temelju brojnih istraživanja u Indiji, dobar su indikator graduiranosti i veličine čestica za pepele na svjetskoj razini. Kod nekih standarda se leteći pepeli dijele u razrede ovisno o njihovoj finoći. Primjerice, australski standard predstavljen u literaturi French (2007) dijeli leteći pepeo dijeli ga u razrede na način da je fini leteći pepeo onaj kod koje najmanje 75% ukupne mase prolazi kroz sito koje ima otvor 0,045 mm. Kod letećeg pepela srednje finoće najmanje 65% ukupne mase prolazi kroz isto sito, dok je kod krupnog letećeg pepela to najmanje 55% ukupne mase.

### **Attebergove granice**

Jedna od ključnih karakteristika sitnozrnatih tala je vlažnost, koja nam ukazuje na količinu vode prisutnu u uzorku. Povećanjem vlažnosti sitnozrnata tla postaju mekša i ljepljivija te ne mogu zadržati svoj oblik. Tada kažemo da je tlo u žitkom stanju i ima malu posmičnu čvrstoću. Ako se vlažnost tla pak smanji do određene razine, tlo postaje kruće, sve dok nedostatak vlage ne uzokuje nekoherentnost kada dolazi do stvaranja pukotina. Tada kažemo da je tlo u polučvrstom stanju. Daljnjim snižavanjem vlage, tlo dolazi u fazu kada međučestične sile ne dopuštaju međusobno približavanje čestica te se takvo stanje naziva čvrstim stanjem. Granica između polučvrstog i čvrstog stanja naziva se granicom stezanja.

Za geotehničko inženjerstvo, od ključne je važnosti faza plastičnosti, tj. faza između žitkog i polučvrstog stanja. Vlažnost između žitkog i plastičnog stanja se naziva granicom tečenja, dok se vlažnost između plastičnog i polulvrstog stanja naziva granicom plastičnosti. Kao mjera kojom se određuje koliko je neko tlo plastično, određen je indeks plastičnosti koji predstavlja razliku granice tečenja i granice plastičnosti. Sam leteći pepeo nije plastičan. Međutim ako ga koristimo pri stabilizaciji glinovitih ili prahovitih materijala koji imaju plastična svojstva, takav kompozit također

ima plastična svojstva i potrebno je odrediti njegove Atterbergove granice. Prema brojnim istpitivanjima, među kojima su i Nicholson i dr. (1993), Mapfumo i dr. (1998), te Cokca (2001), povećanjem letećeg pepela u mješavini s tlom značajno se smanjuje plastičnost takvih, prašiniastih i glinovitih, materijala. Rezultati ispitivanja Amadi (2010) su pokazala da prirodna tla pomiješana s letećim pepelom progresivno gube svoju plastičnost uslijed reakcija kationskih izmjena koje su rezultirale s povećanim privlačnim silama među česticama mješavine. Na slici 4.11. je dan dijagram iz kojeg je jasno vidljivo smanjenje granica vlažnosti povećanjem udjela letećeg pepela u mješavinama, sve prema navedenom ispitivanju.

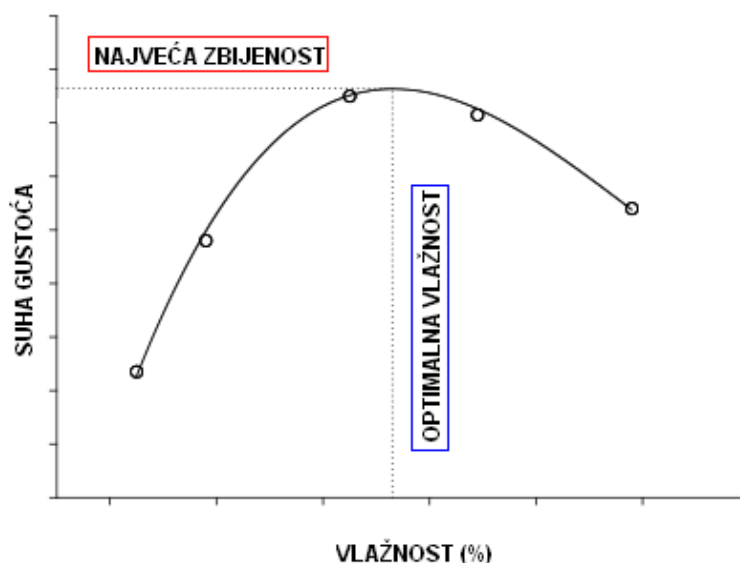


Slika 4.11. Smanjenje granica vlažnosti u mješavinama tla i letećeg pepela, a uslijed povećanja sadržaja letećeg pepela ( prema Amadi, 2010)

### Karakteristike pri zbijanju

Zbijanjem letećeg pepela povećavaju se njegove inženjerske karakteristike.

Pokus kojim se relativno pouzdano mogu odrediti karakteristike materijal pri zbijanju se naziva Proctorovim pokusom. Proctorov pokus služi za određivanje tzv. optimalne vlažnosti nekog materijala, jer je pretpostavka da materijal za određenu razinu vlažnosti prilikom zbijanja ima najveću suhu gustoću. Ako se promotri slika 4.12. vidljivo je da povećanjem vlažnosti materijala raste i njegova suha gustoća, sve do određene optimalne granice. Nakon nje, daljnjim povećanjem vlažnosti, suha se gustoća smanjuje.



Slika 4.12. Tipična krivulja odnosa gustoće i vlažnosti, rezultat Proctorovog pokusa (Duvnjak i dr., 2022.)

U geotehničkoj praksi se češće govori o „zapreminskoj težini“ nego o „suhoj gustoći“. Jedina razlika je u činjenici da je zapreminska težina produkt suhe gustoće i gravitacijskog ubrzanja. Karakteristike zbijanja letećeg pepela su značajne prilikom njegove primjene za formiranje nasipa, te u ojačanju tla, što će detaljnije biti razrađeno u narednim poglavljima.

Kod nasipa, gdje leteći pepeo služi kao ispuna, zapremisnka težina ovisi o graduiranosti letećeg pepela, vlažnosti prilikom zbijanja, tehnologiji zbijanja koja je izravno povezana s količinom energije zbijanja. Ako se pak leteći pepeo miješa s tlom, što je najčešći slučaj ojačanja tla, tada uz navedene parametre zbijenost ovisi i o karakteristikama plastičnosti mješavine leteći pepeo – tlo. Zbijenost letećeg pepela ili mješavine letećeg pepela i tla je vrlo bitna s obzirom da o njoj ovisi čvrstoća, stišljivost i propusnost. Prema preporukama američkog standarda ASTM D 698 za izgradnju nasipanih konstrukcija, tipični zahtjev je da se leteći pepeo zbjije na 95 do 100 posto najveće suhe gustoće.

### Parametri posmične čvrstoće

Posmična čvrstoća tla je veličina kojom se opisuje otpornost tla na klizanje, tj. njome je određena veličina posmičnih naprezanja. Ako se promotri formula kojom se definira posmična čvrstoća, vidljivo je da ona ovisi o dvije karakteristike tla: koheziji ( $c$ , izraženoj u  $\text{kN/m}^2$ ) i kutu trenja ( $\varphi$ , izraženom u  $^\circ$ ). Treći član formule je efektivno naprezanje u tlu koje je u najvećem broju slučajeva rezultat težine tla.

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad (4.7)$$

Dok je karakteristika nekoherentnih tala (šljunaka i pijesaka) da ne posjeduju koheziju, koja je definirana kao međučestična veza, koherentna tla (prahovi i gline) posjeduju kohezivna svojstva. Kut trenja je u pravilu nešto veći kod šljunaka i pijesaka nego što je kod glina i prahova. Prema smjernicama FHWA (2008.), kao i u literaturi Hardin (2011), većina letećih pepela ima kut trenja u granicama od  $26^\circ$  do  $42^\circ$ . Upravo je kut trenja onaj parametar koji definira posmičnu čvrstoću letećih pepela, iako je primjećeno se prividna kohezija pojavljuje u određenim bitumenoznim (poculanskim) letećim pepelima. Kada je u potpuno suhom stanju, leteći pepeo je nekohezivan materijal. Kad je potpuno saturiran, leteći pepeo je potpuno neupotrebljiv i predstavlja masu kojom je nemoguće „upravljati“. Ali određeno prisutstvo vlažnosti, omogućuje jednostavno upravljanje i zbijanje letećeg pepela koji tada posjeduje i kohezivna svojstva (FHWA, 2008)

U istraživanju Kim i dr. (2008) su provedeni pokusi direktnog posmika radi određivanja posmičnih parametara letećeg pepela tipa F. Svrha ispitivanja je bila u određivanju utjecaja sadržaja vlage i saturacije na posmične parametre zbijenog letećeg pepela, jer oni imaju značajan utjecaj. Stoga su ispitivana dva tipa uzorka istog letećeg pepela, jedan sa suhe strane optimuma određenog Proctorovim pokusom, a drugi sa vlažne strane optimuma. Uzorci zbijeni pri vlažnosti koja se nalazi sa suhe strane optimuma posjeduju neznatno veću ukupnu posmičnu čvrstoću od uzorka koji je zbijen pri vlažnosti sa vlažne strane optimuma. Kut trenja za uzorke s različitih lokacija je tek za  $1^\circ$  -  $2^\circ$  veći za uzorke sa suhe strane optimuma.

## Propusnost

Propusnost je veličina koja nam govori o mogućnosti određenog materijala da propušta fluide. Kako se s geotehničkog aspekta najčešće radi o propuštanju vode, usvojen je termin vodopropusnosti. Tipične vrijednosti koeficijenta propusnosti za pojedine vrste saturiranoga tla prikazane su u tablici 4.4.

VRSTA TLA	KOEFICIJENT PROPUSNOSTI (m/s)
Gline i prašinate gline (>20 %gline)	od $<10^{-10}$ do $2 \times 10^{-7}$
Vrlo fini pijesci i prahovi	od $2 \times 10^{-7}$ do $9 \times 10^{-5}$
Čisti pijesci i mješavine pijeska i šljunka	od $9 \times 10^{-5}$ do $6 \times 10^{-2}$
Čisti šljunci	od $6 \times 10^{-2}$ do 1

Tablica 4.4. Koeficijenti propusnosti ovisno o vrsti tla (prema Santos i dr., 2011)

Međutim, propusnost je bitna veličina i kod ostalih problema, kao što je curenje raznih polutanta kod odlagališta otpada što može izravno utjecati na onečišćenje podzemlja i podzemnih voda. Vrlo je važno poznavati veličinu koeficijenta propusnosti ako leteći pepeo predstavlja tijelo nasipa. U tom slučaju ga je potrebno i zbijati što značajno smanjuje njegovu vodopropusnost, što je bitno radi smanjenja procjeđivanja voda kroz tijelo brane. Sama propusnost ovisi o stupnju zbijenosti, veličini čestica i poculanskoj aktivnosti (Santos i dr., 2011). Prema Prashanth i dr. (2001)  $10^{-7}$  m/s je navedena kao vrijednost propusnosti koju posjeduje većina letećih pepela. Vidljivo je da i s aspekta vodopropusnosti leteći pepeo spada u grupu prahova. Važno je, međutim, promotriti koje vrijednosti propusnosti leteći pepeo poprima kada ga se zbija, s obzirom da će se upravo takve aktivnosti primjenjivati u njegovim aplikacijama u geotehničkom inženjerstvu.

Prema opsežnom istraživanju Kim i dr. (2006) propusnost zbijenog letećeg pepela se nalazi u granicama oko  $10^8$  m/s. S druge strane, prema smjernicama FHWA (2008) propusnost dobro zbijenih letećih pepela se nalazi u granicama od  $10^{-6}$  do  $10^{-8}$  m/s. Iako se na prvi pogled čini da je gornja granica od  $10^{-6}$  m/s nerealno visoka s obzirom da se radi o zbijenim letećim pepelima, treba uzeti u obzir da vodopropusnost značajno ovisi, osim o poroznosti, i o energiji zbijanja. Iako se leteći pepeo sastoji od sličnih frakcija kao prašinasta-glinovita tla kod njih se konsolidacija, tj. proces smanjenja pornih

tlakova radi procjeđivanja vode, obavlja puno brže nego kod prašinsto-glinovitih tala iz razloga jer leteći pepeo ima veći koeficijent pora i veću propusnost.

Kada je riječ o utjecaju letećeg pepela na propusnost mješavina letećeg pepela i tla, za potrebe ojačanja, brojni rezultati ispitivanja su dali oprečne rezultate. Tako kod ispitivanja Brandl (1981), Nablantoglu i dr. (2001), te Nablantoglu i dr. (2002), leteći pepeo povećava propusnost, dok ispitivanja Parker i dr. (1977), Terashi i dr. (1980), te Locate i dr. (1996), ukazuju da prisutstvo letećeg pepela u mješavinama smanjuje propusnost mješavine. Isto je definirano i u američkom standardu ASTM D 5239.

Novija ispitivanja pokazuju da se propusnost smanjuje dodatkom letećeg pepela, ali zbog ovih varijacija u rezultatima ispitivanja, potrebno je prije svake primjene letećeg pepela točno ustvrditi njegov utjecaj na propusnost mješavine.

### **Potencijal likvefakcije**

Likvefakcija je fenomen koji nastaje u nekoherentnim sedimentima zasićenim vodom. Karakterizira je prelazak u tekuće stanje, do kojeg je došlo uslijed određene dinamičke pobude. Prelaskom u tekuće stanje tlo se deformira, uslijed gubitka čvrstoće, što može dovesti do neželjenih posljedica.. Osim već spomenute zasićenosti vodom, likvefakcija se događa u nekoherentim, rahlim tlima. Iako je likvefakcija pojam koji se najčešće veže za čiste pijeske, određena istraživanja (Puri i dr., 1996, te Andrews i dr., 2000) su pokazala da i u prašinstim tlima, čija su frakcije slične frakcijama letećeg pepela, u određenim uvjetima može doći do pojave likvefakcije. Na ovom tragu su provedena istraživanja čiji je cilj bio određivanje likvefakcijskog potencijala letećeg pepela. Prema literaturi Dey i dr. (2008) leteći pepeo odlagan u lagune (pomiješan s vodom prije odlaganja) je podložan likvefakciji te je potrebno provesti mjere povećanja njegove gustoće u svrhu smanjenja likvefakcijskog potencijala.

Neka ispitivanja likvefabilnosti odlaganog letećeg pepela (Tu i dr., 2007, te Zand i dr., 2007) su pokazala da ispitivani leteći pepeli ne pokazuju likvefakcijski potencijal. Međutim, navedeno se odnosi na određene leteće pepela, te se i rezultati ne mogu povezati s letećim pepelima s ostalih lokacija radi njihovog različitog sastava, a time i ponašanja. U svrhu smanjenja likvefabilnosti letećih pepela, provedena su ispitivanja Boominathan i dr. (2002), te Kaniraj i dr. (2003) u kojima se ispitivalo poboljšanje likvefakcijske čvrstoće letećeg pepela dodavanjem geosintetičkih vlakana.



#### **4.4. PRIMJENA LETEĆEG PEPELA U GEOTEHNICI**

Osnovni problem koje se postavlja prilikom upotrebe letećeg pepela je pronalazak tržišta na kojem postoji potražnja za njime. Najveći proizvođači CCP proizvoda su udruženi u organizacije, među kojima su najveće ACAA – American Coal Ash Association, CEA-CCPIG – Coal Combustion Products Interest Group of the Canadian Electricity Association, CCUJ – Center for Coal Utilization in Japan, ECOBA – European Coal Combustion Products Association. Ove organizacije zastupaju interese proizvođača na tržištu.

Nadalje, organizacije pojedinih država ili regija su udružene u krovnu svjetsku organizaciju The Worldwide Coal Combustion Product Council (WWCCPC). Jedan od ciljeva ovih organizacije je pronalaženje tržišta koja bi mogla iskoristiti značajne količine, gdje se u domeni građevinarstva pepeo može koristiti kao sirovina za industriju građevinskog materijala ili kao materijal koji se izravno ugrađuje na gradilištu. Sami proizvođači trebaju izdvajati znatne financijske resurse, kao i osigurati značajne površine za odlaganja pepela. I dok godišnje proizvedene količine pepela rastu, propisi i zakoni za njihovo odlaganje sve su restriktivniji. Tako se u okviru vlastitih projekata i udruživanjima u ovakve organizacije nastoje riješiti problemi vezani za pepeo. Važno je napomenuti da vlade pojedinih zemalja potiču ovakve inicijative te pružaju znatne poticaje i olakšice građevinskim poduzećima i određenim projektima.

Da bi leteći pepeo bio razmatran kao alternativni materijal u geotehničkim aplikacijama postoje niz zahtjeva koje on mora zadovoljiti. Prvo, leteći pepeo mora imati određene fizikalno-mehaničke i kemijske karakteristike potrebne da bi se mogao primjeniti u specifičnoj aplikaciji, dok istovremeno ne smije imati negativan ekološki utjecaj. Tehnologija ugradnje takvog materijala mora također biti zadovoljavajuća. I na kraju, investitor mora prepoznati financijsku prednost takvog materijala. Dakle detaljnom analizom troškova pri primjeni letećeg pepela u odnosu na „standardne” materijale u geotehničkim aplikacijama, mora se utvrditi da li je njegovo korištenje prihvatljivo s financijskog aspekta.

### **Kontrolirani materijal niske čvrstoće – CLSM**

Američki institut za beton (ACI) je razvio posebnu betonsku mješavinu kojoj je osnovno vezivno sredstvo leteći pepeo. Nazvana je materijal kontrolirane niske čvrstoće, eng. *Controlled low strenght material* (CLSM). Osnovna namjena ovog materijala je ta da on služi kao materijal za zatrpavanje. U literaturi se može pronaći pod raznim imenima, a većinom se radi o američkoj terminologiji. Tako da se za ovakav materijal koriste nazivi kao flowable fill (tekuća ispuna), leanmix fill (ispuna mršavom mješavinom), unshrinkable fill (neskupljajuća ispuna), flowable mortar (tekući mort) i controlled-density fill (CDF) (ispuna kontrolirane gustoće). Službeni naziv je ipak materijal kontrolirane niske čvrstoće CLSM, prema komitetu „Committee 229“ američkog instituta za beton. Takav materijal se ne može smatrati betonom niske čvrstoće, već isključivo strukturalnom ispunom. Prema ACI-u, CLSM je samozbijajući, cementirajući materijal koji rezultira sa jednoosnom čvrstoćom od 8,3 MPa ili manjom. Većina postojećih primjena CSLM-a zahtijeva jednoosnu tlačnu čvrstoću od 2,1 MPa ili manju. Kod aplikacija gdje se očekuje naknadni iskop takvog materijala, važna je njegova čvrstoća koja u tom slučaju ne bi trebala prelaziti 1,1 MPa.

CSLM mješavine se sastoje od portland cementa, letećeg pepela, krupnog ili finijeg agregata i vode. Bitno je naglasiti da portland cement dolazi u znatno manjim količinama nego što je slučaj kod standardnih betona. Za razliku od standardnog betona u kojem nije dopuštena visoka razina neizgorenog ugljena u letećem pepelu, za CLSM se takav leteći pepeo može koristiti. Proizvođači standardnih betona su najveći proizvođači CSLM-a te za njegove proizvodnju koriste jednake sastojke kao i za standardne betone, međutim u bitno različitim omjerima. Neke mješavine se sastoje od portland cementa, letećeg pepela i vode, bez agregata. U literaturi, međutim, nisu česti slučajevi gdje su se ispitivale karakteristike takvih mješavina (Swan i dr., 2007). Izbor sastojaka koji će tvoriti mješavinu je rezultat dostupnosti, cijene, specifičnosti primjene i potrebnih karakteristika kao što su tečnost, čvrstoća, mogućnost iskopa i gustoća.

Portland cement u CSLM mješavinama ima ulogu u povećanju tlačne čvrstoće mješavine i povezivanju drugih sastojaka (Green, 1999). Međutim, znatno niže količine cementa se mogu koristiti u mješavinama u kojima se koristi visoko reaktivni leteći pepeo klase C. Velike količine vode kod ovakvih materijala su neophodne s obzirom da

one povećavaju tečnost, samoporavnavanje i samokonsolidaciju. Naravno, povećavanjem količine vode u mješavini dolazi do smanjenja njezine čvrstoće. Leteći pepeo također može povećati tečnost mješavine. Sferične čestice povećavaju tečnost pri određenom sadržaju vode. Agregati, pak, smanjuju tečnost mješavine i povećavaju njezinu gustoću. Iz ekonomskih razloga, agregati volumno zauzimaju najveći postotak u mješavini, koji seže i do 80 – 90% (Swan i dr., 2007). Kao agregat se, u slučaju da je moguće, koristi i donji pepeo ili samljeveni reciklirani beton. Prethodno je potrebno ispitati karakteristike takvog materijala da bi se provjerilo zadovoljava li potrebne kriterije.

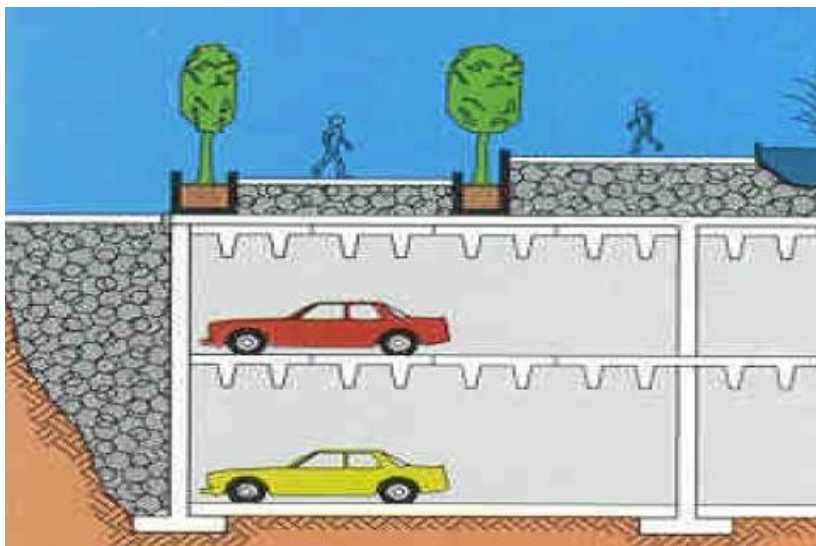
Bitno je naglasiti da se CSLM, može pripremati istom opremom, dostavljati na mjesto ugradnje te ugrađivati istom opremom kao i klasični beton. U slučaju da se mješavina CSLM-a sastoji od sitnijih čestica bez prisutstva krupnijih čestica agregata, preporuča se ugradnja injekcijskim pumpama u odnosu na klasične betonske pumpe. Ugradnja CSLM-a se može vidjeti na slici 4.13.



Slika 4.13. Ugradnja CSLM-a ([www.rockhillconcrete.com](http://www.rockhillconcrete.com))

Najveća prednost pri korištenju kao materijalu ispune je u činjenici da ga nije potrebni zbijati. Naime, u standardnoj geotehničkoj praksi, kao materijal ispune se najčešće koriste nekoherentni materijali kao što su pijesci ili šljunci koje je prilikom ugradnje potrebno zbijati čime se troše financijski ali i vremenski resursi. Razlog leži u činjenici

da se CLSM pri ugradnji nalazi u tekućem stanju. Stoga je njegoa primjena izrazito široka, od popunjavanja šupljina ispod postojećih cesta, zgrada i ostalih struktura, preko korištenja za ispunu kod potpornih konstrukcija gdje je prostor ograničen, do ispunjavanja napuštenih podzemnih struktura kao što su razni propusti, cijevi, tuneli, rudnici, bunari, itd. Osim navedene prednosti koja se odnosi na lakše ugrađivanje, CLSM ima još brojne prednosti. Najznačajnija je u tome da, zbog svoje male specifične težine, prilikom korištenja za zatrpavanje iza potpornih konstrukcija, ovakva mješavina uzrokuje manje pritiske na samu potpornu konstrukciju nego što to uzrokuju standardni materijali ispune (Smith, 1991) Na slici 4.14. je vidljiv slučaj kad se CSLM koristi kao ispuna između pokosa iskopa i zida podzemne garaže, čime su ostvareni pritisci na zid manji nego u slučaju da se koristi konvencionalna ispuna, šljunkom ili pijeskom.



Slika 4.14. CSLM kao materijal ispune uz zid konstrukcije (Smith, 1991)

Iako tečnost letećeg pepela omogućava relativno jednostavnu ugradnju, pri visokim stupnjevima tečnosti može doći do segregacije pojedinih sastojaka. Ovo je obično rezultat dodavanja velikih količina vode u svrhu postizanja tečnosti (Tikalsky i dr., 2000). Ovaj problem je rješiv na više načina.

Prvi je preventivnim djelovanjem, gdje se prethodno odrede količine svih sastojaka u mješavini u svrhu ispunjavanja zadanih kriterija, te nije potrebno naknadno dodavanje dodatnih količina vode. Drugi način je dodavanje dodatnih količina letećeg pepela.

U nekim slučajevima je moguće dodati kemijske aditive, ako se mješavina sastoji od finijih čestica. Velike količine vode mogu uzrokovati i velika naknadna slijeganja takvog materijala. Naime nakon ugradnje, višak vode će biti apsorbiran okolnim tlom ili će izaći na površinu te ishlapiti. Ovo uzorkuje dodatna slijeganja. Velik broj faktora utječe na očvršćavanja CSLM mješavina. Prema Green (1999) neki faktori su vrsta i količina cementnog materijala, propusnost i stupanj saturacije oklonog tla koji je u direktnom kontaktu sa CSLM-om, tečnost, sastav CSLM-a, temperatura i vlažnost mješavine, te dubina ispune. Gustoća ovakve mješavine je u rasponu od 1,44 do 2,32 kg/m<sup>3</sup>, a propusnost mu je slična propusnosti prašiniastih pijesaka, i kreće se u rasponu od 10<sup>-4</sup> do 10<sup>-5</sup> cm/s (Green, 1999). Iako je cijena kubnog metra CSLM-a nešto veća od metra kubnog većine materijala koji se koriste kao konvencionalne ispune, njegove ekonomske prednosti dolaze do izražaja kad dođe do njegove ugradnje. Kako je već navedeno, CSLM je samozbijajući materijal te nije potrebno vršiti složeni postupak zbijanja kao kod konvencionalnih ispuna. Za određene aplikacije, CSLM predstavlja jedinu dostupnu, razumnu, metodu ispunjavanja. Zbog same prirode materijala, nisu potrebne velike količine cementa naspram količina letećeg pepela. Ovo je ujedno značajno s ekonomskog aspekta s obzirom da je cement najskuplji materijal u mješavini CSLM-a.

### **Ojačanje tla i stijena**

Veliki problem pri urbanizaciji predstavlja i nestašica resursa u vidu površina koje bi trebale biti temelj za daljnje razvojne aktivnosti, te se posljedično pojavila potreba za iskorištavanjem prostora koji prvotno nije pogodan za gradnju. Naime, područja koja su pogodna za izgradnju s aspekta geotehničkih karakteristika je sve manje, te je potrebno iskorištavati i lokacije koje nemaju pogodne geotehničke karakteristike. Nepovoljne geotehničke karakteristike mogu rezultirati s izrazito nepovoljnim posljedicama po konstrukciju koja se namjerava graditi, od prekomjernih ukupnih slijeganja i diferencijalnih slijeganja. Takvo, „nepovoljno“ tlo ili stijenu je potrebno ojačati na način da se određenim zahvatima povećaju njegove krutosne karakteristike kao i njegovi parametri čvrstoće.

Stoga ojačanje tla i stijena predstavlja jednu od ključnih geotehničkih disciplina modernog graditeljstva. Tipični primjer stabilizaciji tla se u početku sastojao od

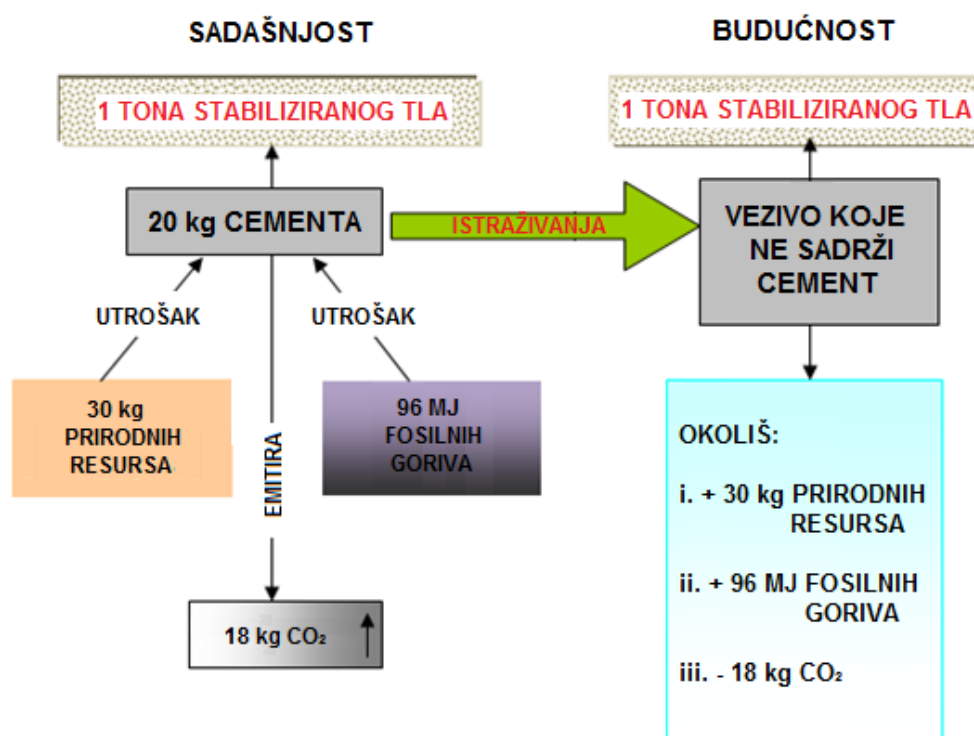
odstranjivanja mekanog tla i zamjene zbijenim šljunkom ili drobljenom stijenom u svrhu dobijanja veće krutosti. Iako se ova metoda smatra pouzdanom što je potvrđeno na velikom broju slučajeva, ona zahtjeva značajne vremenske i financijske resurse, te se javila se potreba za razvijanjem novih metoda ojačanja tla i stijene, koje se temelje na posebnim tehnologijama. Novije tehnike ojačanja tla, najčešće korištene u praksi, su navedene u nastavku.

1. Dreniranje
2. Predopterećenje
3. Lake ispune
4. Kemijske stabilizacije korištenjem mješavina
5. Duboko dinamičko zbijanje
6. Vibrozbijanje i dinamičko vibrozbijanje
7. Šljunčani piloti
8. Injektiranje (mlazno, kompakcijsko)

S aspekta primjene letećeg pepela u ojačanju tla, zanimljive su one tehnike koje, za poboljšanje fizikalno – mehaničkih karakteristika tla i stijene, koriste cement i vapno. Takva su ojačanja tla koja koriste kemijsku stabilizaciju tla korištenjem mješavina tla i smjese čiji je leteći pepeo sastavni dio. Nadalje, provedena su i ispitivanja kod kojih je leteći pepeo korišten u tehnikama injektiranja, međutim dobiveni rezultati nisu jednako zadovoljavajući kao što je to slučaj pri korištenju u stabilizaciji tla. Također leteći pepeo bi mogao poslužiti kao lagana ispuna, a kao dobar pokazatelj karakteristika letećeg pepela i njegove „lagane“ prirode može se vidjeti u njegovim primjenama u materijalima niskih čvrstoća opisanim u prethodnom poglavlju, ili kod formiranja nasipa, detaljnije opisano u sljedećem poglavlju. Nadalje, moguća je primjena letećeg pepela u isušivanju tla čime bi se poboljšale njegove fizikalno-mehaničke karakteristike. S obzirom da je dominantna primjena letećeg pepela u ojačanju tla tehnikom stabilizacije miješanjem, ona će se u nastavku detaljno prikazati.

Leteći pepeo u ojačanju tla i stijene može poslužiti kao djelomična, negdje i potpuna, zamjena za cement i vapno. U tom slučaju se postiže ušteda financijskih resursa, ali i značajan povoljan ekološki utjecaj što rezultira s smanjenjem zagađenja tla i zraka. Osim činjenice da bi se koristio leteći pepeo s odlagališta, ekološki povoljan utjecaj bi

se ostvario i kroz doprinos održivom razvoju korištenjem manjih količina cementa. Naime, prilikom proizvodnje standardnih veziva, cementa i vapna, troše se velike količine prirodnih sirovina i fosilnih goriva. Kao rezultat kemizma, dolazi do oslobađanja znatne količine ugljik dioksida u atmosferu. Svako smanjenje potrošnje cementa i vapna za dosadašnji postupak stabilizacije tla (prema dosadašnjim iskustvima od 2-5% masenog udjela cementa u stabiliziranom tlu), pridonijet će se na smanjenje potrošnje prirodne sirovine i fosilnih goriva a time i smanjenje emisije CO<sub>2</sub> što je ilustrirano na slici 4.15. za minimalnu količinu masenog udjela cementa (Kovačević i dr., 2008.).



Slika 4.15. Usporedba cementnog veziva i veziva koje ne sadrži cement (Kovačević i dr., 2008.).

Kako je i navedeno, najčešća primjena letećeg pepela je u stabilizaciji tla. Pod pojmom stabilizacije tla podrazumijevamo tehnologije kojima mijenjamo karakteristike tla. S inženjerskog stajališta, glavni cilj stabilizacije je u povećanju nosivosti tla, smanjenju likvefakcijskog potencijala, ubrzanju procesa konsolidacije, povećanju gustoće tla ili kontroli deformacija. Primarna prednost korištenja letećih pepela u stabilizaciji tla podrazumijevaju iskorištavanje većih količina industrijskog otpada čime se postiže

značajan, ekološki pozitivan, utjecaj. Nadalje, ušteda se postiže s financijskog aspekta jer standardni materijali za stabilizaciju tla kao što su cement i vapno imaju znatno veću cijenu. Međutim, postoji još niz prednosti kojima se opravdava upotreba letećih pepela u stabilizaciji tla a koje će biti navedene u nastavku.

Važno je napomenuti da ugljeni dobiveni iz različitih lokacija imaju različite karakteristike koje utječu na proces izgaranja. Karakteristike ovise o sadržaju ugljena, tvrdoći, geološkoj starosti i brojnim drugim parametrima. Takve karakteristike će utjecati na efikasnost letećeg pepela kao stabilizatora tla.

Bujanje, pritisak bujanja i posmična čvrstoća koja ovisi o vlažnosti ekspandirajućih glina su ozbiljan problem u geotehničkom inženjerstvu. Brojna ispitivanja, među kojima su i Zhang i dr. (2002), Phani i dr. (2004), Nalbantogu (2004), Kate (2005) su pokazala da leteći pepeo ima visoku razinu efikasnosti u smanjivanju ekspanzivnih karakteristika takvih tala. Kada su takva tla tretirana s letećim pepelom ne pokazuju značajna poboljšanja trenutne čvrstoće, ali sedmodnevna čvrstoća je znatno veća nego kod ekspandirajućih tala. Ekspandirajuća tla posjeduju visoku plastičnost i relativno su kruta. Ekspandirajuće karakteristike dolaze do izražaja pri površini takvih tala jer su tu najpodložnija klimatskim utjecajima čijim promjenama vlažnost tla može značajno varirati (Cetiner, 2004). Povećanje vlažnosti može nastati kao rezultat intezivnijih oborina, poplava, ali i uslijed smanjenja prirodne evapotranspiracije tla nakon što se na njemu sagradi objekt ili prometnica. Takva tla imaju također tendenciju skupljanja i stvaranja pukotina kada se vlažnost smanji ispod određene granice (slika 4.16.).



Slika 4.16. Stvaranje površinskih pukotina kao posljedica isušivanja tla (O'Neill i dr., 1980)



Prema O'Neill i dr. (1980) aktivna zona unutar koje postoje sezonske promjene u vlažnosti tla varira između 1,5 do 4 metra. U literaturi Nelson i dr. (1992) je dan detaljan pregled svih faktora, s detaljni opisima, koji utječu na ekspandirajući potencijal tla. Ti faktori uključuju glineni sadržaj i mineralogiju, strukturu tla, početnu suhu gustoću, početni sadržaj vlage, položaj podzemne vode, kemiju podzemne vode, porpusnost, granulometrijski sastav, plastičnost, klimatske uvjete, vegetaciju, temperaturu, povijest naprezanja, opterećenja. Problemi s temeljenjem na takvim tlima su evidentni – od izdizanja do pojavljivanja pukotina i potpunog konstrukcijskog sloma (slika 4.17a).



(a)



(b)

Slika 4.17. Konstrukcijski slom kao posljedica isušivanja tla, slom objekta (a), slom cestovne konstrukcije (b) ([www.civilease.com](http://www.civilease.com))

Nepovoljno mogu utjecati i na nasipane konstrukcije, prometnice (slika 4.17b), sustave navodnjavanja i odvodnje. Varijacije u vlažnosti mogu promijeniti volumen tla i do 20 %. Stoga je od izrazite važnosti da se ova bujajuća karakteristika pojedinih glina stavi pod kontrolu jer može završiti sa lošim posljedicama. Zanimljiva je činjenica da su troškovi nastali kao rezultat građenja na ekspandirajućim glinama, a time i negativnih posljedica, među najvećim troškovima većine prirodnih katastrofa (primjerice u Sjedinjenim Američkim Državama su veći troškovi nastali uslijed građenja na ekspanzivnim tlima nego što su troškovi od poplava, uragana ili potresa, prema Cetiner (2004).

Američki standard ASTM D 5239 vrši podjelu letećeg pepela prema njihovom kemijskom sastavu, te posljedično njihovom učinku na stabilizaciju tla. Podjela se zasniva na podjeli letećih pepela na klase C i F, kako je navedeno u poglavlju x. Tako je utjecaj letećeg pepela klase F na stabiliziranje ekspandirajućih tala neznatan, ako je riječ o njegovim poculanskim, vezivnim, svojstvima. Razlog je niski postotak kalcij oksida koji je osnova za proces vezanja. Međutim leteći pepeo klase F može se koristiti u loše graduiranim pjeskovitim tlima kao pogodan filer, tj. svojim granulometrijskim sastavom bi 'nadopunio' frakcije koje nedostaju u granulometrijskom sastavu loše graduiranog pijeska. Time bi se povećala mogućnost zbijanja, povećanja gustoće i smanjenja propusnosti. Ako pak letećem pepelu klase F dodamo određenu količinu cementa ili vapna, došlo bi do značajnog povećanja vezivnih svojstava. Korištenje letećeg pepela tipa C, poznatog kao i samocementirajući leteći pepeo, postiže se visoki stupanj stabilizacije ekspandirajućih tala. Razlog leži u visokom postotku kalcij oksida, čime se ostvaruje proces vezanja.

Kemijska stabilizacija podrazumijeva povećanje čvrstoće nastale kao rezultat kemijskih reakcija između tla i dodane mješavine. Kada se samocementirajući leteći pepeo pomiješa s tlom i vodom dolazi do tri odvojene kemijske reakcije. Prva kemijska reakcija je ona između trikalcijevog aluminijskog oksida ( $C_3A$ ) i vode. Ovo se može nazvati primarnom cementnom reakcijom. Trikalcijev aluminat je odgovoran za dobijanje rane čvrstoće i brzo uspostavljanje karakteristika mješavine samocementirajućeg letećeg pepela i tla. Druga reakcija je već spomenuta poculanska reakcija. Naime u svim samocementirajućim letećim pepelima i u većini tala su prisutni silicij oksid i aluminij oksid. Reakcija poculanskih oksida stvara temelj za dugotrajnu čvrstoću tala stabiliziranih letećim pepelom. Treća reakcija je u mješavini tla i letećeg pepela je karbonatna reakcija. Ova reakcija ima malu efikasnost za sam proces stabilizacije i vrlo malo pridonosi čvrstoći.

U slučaju da se kao stabilizator koristi smjesa letećeg pepela i vapna, stabilizacijske reakcije su funkcija modula hidratacije koji je definiran kao omjer postotka  $CaO$  naspram ukupne sume postotka  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , gdje Kamon i dr. (1991) zaključuju da bi hidratacijski modul morao imati vrijednost bar 1,7 da bi došlo do hidratacije.

$$\frac{CaO(\%)}{SiO_2(\%) + Al_2O_3(\%) + Fe_2O_3(\%)} \geq 1,7 \quad (4.8)$$

Nadalje, provedeno je opsežno istraživanje (White i dr., 2005) u kojem su za određene vrste ekspanzivnih tala koja variraju od ML, niskoplastičnih prahova, do CH, visokoplastičnih glina predstavljene bitne karakteristike kad ih se stabilizira letećim pepelom. Zaključeno je da povećanje čvrstoće mješavine letećeg pepela i tla ovisi o vremenu stvrdnjavanja i temperaturi, energiji zbijanja i vremenu proteklom od ugradnje do zbijanja. Sadržaj sumpora negativno djeluje na dugoročnu čvrstoću i trajnost mješavine. Potrebno je stoga prije miješanja odrediti sadržaj sumpora kako letećeg pepela, tako i tla i vode.

Važan aspekt pri stabilizaciji tla letećim pepelom je u količini vode koja će se dodati kao i u vremenu dodavanja. Voda ne bi smjela sadržavati organske materijale, ulja, kiseline koji bi mogli rezultirati s ograničavajućim učinkom prilikom stabilizacije tla (White i dr., 2005). ACAA (American Coal Ash Association) navodi da ako se miješanje obavlja u postrojenjima, postotak vode koja se dodaje treba biti između 80 i 110% optimalne vlažnosti tla koju mješavina mora imati u vrijeme ugradnje da bi se postigla optimalna zbijajuća svojstva manifestirana najvećom zapreminskom težinom. Opsežno ispitivanje vremenu ugradnje vode su proveli Ferguson i dr. (1999) u kojem navode da je najbolje vode dodavati kroz sam postupak miješanja gdje bi se količina dozirala strojem kojim se provodi miješanje. Ako se pak voda dodaje odmah nakon ugradnje letećeg pepela može doći do prerane hidratacije te nemogućnosti kvalitetnog zbijanja mješavine koja je već stekla određenu razinu čvrstoće.

Pitanje koje se najčešće postavlja je količina stabilizatora potrebna s obzirom da ona ima ključnu ulogu u konačnom stupnju poboljšanja tla. Podrazumijeva se da poboljšanje određenih parametara tla ne može ići u nedogled, te da će se najveći stupanj poboljšanja pojedinog parametra ostvariti pri nekoj optimalnoj količini stabilizatora. Uvidom u literaturu Rodriguez (2007) gdje su analizirana brojna istraživanja u kojima je leteći pepeo korišten kao dio stabilizirajuće smjese, vidljivo je da se optimalna količina letećeg pepela može očekivati u granicama od 10 do 25 %. Proveđenjem brojnih istraživanja nije se mogla dobiti jasna slika o koliki je optimalni sadržaj letećeg pepela

koji bi rezultirao s najvećom zapreminskom težinom mješavine letećeg pepela i tla. U istraživanjima se pojavljuju kontradiktorni rezultati. Ovo se može pripisati činjenici da tla koja se koriste u različitim ispitivanjima omaju različite granice plastičnosti i različit granulometrijski sastav. Dobar primjer za ovo je usporedba ispitivanja Basavanna i dr. (1990), Choudhary (1994), Pandian (2004), Prabakar (2004) kod kojih se došlo do zaključaka da dodavanjem letećeg pepela u mješavinu zapreminska težina smanjuje dok se optimalna vlažnost povećava. Granice tečenja tala u ovim ispitivanjima su varirale u granicama od 28 do 50%, dok je postotak krupnijih čestica u granulometrijskom sastavu varirao od 4 do 50%. Na drugu stranu, u literaturi Phanikumar i dr. (2004), je navedeno upravo suprotno.

Dodavanjem letećeg pepela se povećava zapreminska težina, a optimalni sadržaj vlage se smanjuje. Granica tečenja je u ovom slučaju iznosila visokih 80%, a granulometrijski sastav tla je imao 7 % krupnijih frakcija. Da bi se odredio utjecaj navedenih parametara na kompaksijske karakteristike mješavine letećeg pepela i tla, provedeno je detaljno istraživanje literaturu (Mallikarjuna Rao, 2008). Zaključeno je da dodavanje letećeg pepela u različitim omjerima povećava najveću zapreminsku težinu i smanjuje optimalnu vlažnost sve do neke razine koja je nazvana „optimalnom razinom letećeg pepela”, a svako daljnje dodavanje letećeg pepela će rezultirati suprotnim trendom. Zaključeno je i da granica tečenja ekspanzivnih tala ima dominantan utjecaj na optimalni sadržaj letećeg pepela, najveću zapreminsku težinu i optimalan sadržaj vlage. Optimalni sadržaj letećeg pepela, povećanje najveće zapreminske težine i smanjenje optimalnog sadržaja vlage poprimaju visoke vrijednosti ako je granica tečenja i postotak krupnijih frakcija visok, te manje vrijednosti kada su granica tečenja i postotak krupnijih frakcija niski. Pouzdanim se pokazao proces stabilizacije organskog tla (Tastan et al, 2011), gdje se jednoosna tlačna čvrstoća tla povećava korištenjem letećeg pepela, ali vrijednost porasta čvrstoće ovisi o vrsti tla i karakteristikama letećeg pepela. Porastom sadržaja organskih tvari u mješavini tla i letećeg pepela, čvrstoća pada eksponencijalno.

Za zaključiti je da leteći pepeo smanjuje bujajući potencijal ekspandirajućih tala, dok istodobno utječe na povećanje trajnosti na smrzavanja i otapanje. Bujajući potencijal se prema Ferguson (1993), primjenom letećeg pepela, reducira iz tri razloga. Prvo, leteći pepeo sadrži kalcijeve ione koji smanjuju površinski naboj čestica gline kao

ekspandirajućeg tla. Nadalje, leteći pepeo djeluje i kao mehanički stabilizator jer zamjenjuje određeni volumen tla, a istodobno leteći pepeo povezuje čestice ekspandirajućeg tla. Osim što smanjuje bujajući potencijal ekspandirajućih tala, leteći pepeo efektivno sudjeluje i u isušivanju vlažnih tala što rezultira s naglim porastom čvrstoće, što može biti izrazito korisno ako se planira gradnja u vlažnim, nestabilnim okolnostima. Naime, uvidom u tipičnu krivulju Proctorovog pokusa, vidljivo je da određeno tlo postiže najveću zbijenost za određenu vrijednost vlažnosti. Ako je vlažnost nekog tla manja od optimalne onda kažemo da se tlo nalazi na suhoj strani optimuma, a ako je vlažnost veća od optimuma onda kažemo da smo na mokroj strani optimuma. Kako inženjeri teže da tlo prilikom ugradnje ima najveću moguću zbijenost jer tada ima i najpovoljnije karakteristike s geotehničkog aspekta, tada je u slučaju premale ili prevelike vlažnosti potrebno poduzeti određene mjere. Dok je u slučaju tla koji ima vlažnost manju od optimalne potrebno, vrlo jednostavno, dodati još vode da bi mu vlažnost narasla, kod tla koje ima vlažnost veću od optimalne rješenje nije tako jednostavno. Postoji nekoliko rješenja za ovaj problem.

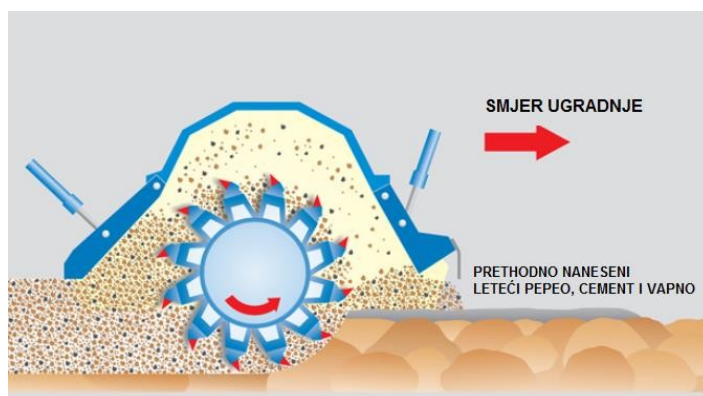
Prvo rješenje je u odstranjivanju tla i zamjeni drugim tlo, ali ova metoda je u pravilu vrlo skupa. Nadalje, može se pričekati da se tlo na predmetnoj lokaciji osuši, ali ova metoda je potencijalno nesigurna iz razloga jer može zahtijevati značajne vremenske resurse i ovisi uvelike o vremenskim prilikama. U novije vrijeme, metoda koja se sve više koristi podrazumijeva korištenje letećeg pepela. Ova tehnologija ima brojne prednosti. Stvara se stabilnija radna platforma, povećava se čvrstoća tla kojemu se dodaje leteći pepeo, a takvo tlo postaje otpornije na infiltraciju dodatne vlažnosti.

Glavna briga pri miješanju letećeg pepela i tla je način na koji će se postići što homogenija mješavina. Miješanje letećeg pepela i tla se može odviti na dva načina:

1. miješanje u postrojenjima
2. miješanjem na mjestu ugradnje

Ako se miješanje obavlja u posebnim postrojenjima, a ne na samom mjestu ugradnje, sam transport i ugradnja iziskuju značajna financijska sredstva. Međutim, takvim pripremanjem se može postići značajno bolja homogenost. Ovakva mješavina može rezultati određenim problemima ako se koristi leteći pepeo koji ima samocementirajuća svojstva. Takva mješavina može imati znatnu ranu čvrstoću i znatno reducirati utjecaj zbijanja na mjestu ugradnje. Prema literaturi White i dr. (2005)., takva čvrstoća se može

razviti kroz tek 10 minuta. Zato se prilikom pripremanja u postrojenjima češće koristi leteći pepeo klase F koji nema izražena samocementirajuća svojstva, ali mu se za ostvarivanje vezivanja dodaje vapno. Drugi način ugradnje predstavlja mješanje na mjestu ugradnje. Pripremanje tla kojeg je potrebno stabilizirati se sastoji od prekopavanja tla, da bi se u sljedećem koraku tlo i aditiv miješali, te zbijali prema specifikacijama. Ova tehnologija je efikasna iz razloga jer se tlo i aditiv miješaju i zbijaju istovremeno čime se izbjegavaju kašnjenja koja uzrokuju smanjenje čvrstoće mješavine. Shema ugradnje mješavine se može vidjeti na slici 4.18, dok se ugradnja strojem može vidjeti na slici 4.19.



Slika 4.18. Shema miješanja prethodno nanesenog stabilizatora i tla (Kuelh i dr., 2017.)



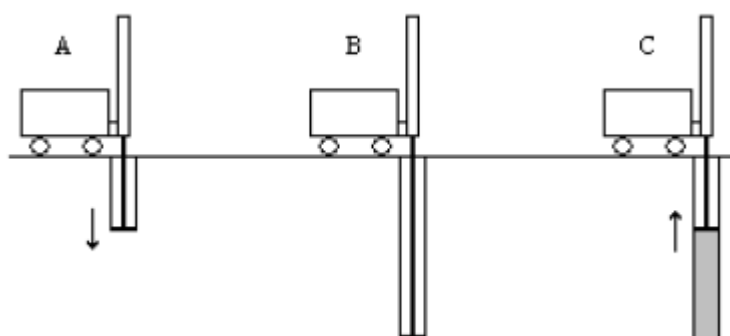
Slika 4.19. Strojna ugradnja letećeg pepela u cilju stabilizacije tla (Kuelh i dr., 2017.)

Međutim, ova tehnologija ima i nedostatak, koji se očituje kroz teško ostvarivanje homogenosti mješavine. Iako je tehnologija ugradnje letećeg pepela na projektantu, Američka Agencija za Ugljeni Pepeo (ACAA) preporuča da se koristi miješanje u

mjestu iz razloga jer je u tom slučaju moguće koristiti samocementirajući leteći pepeo koji ipak značajnije utječe na proces stabilizacije. Prema Terrel i dr. (1979) ako se stabilizacija obavlja s samocementirajućim letećim pepelom klase C, cijeli postupak ugradnje i zbijanja ne bi trebao biti veći od dva sata, dok vrijeme nakon ugradnje letećeg pepela klase F pa do početka zbijanja ne bi smjelo biti veće od 4 sata.

Za razliku od plitke stabilizacije tla, tj. miješana veziva s tlom u površinskom dijelu, duboko miješanje tla se sastoji od formiranja stupova za potrebe stabiliziranja tla. Za razliku od metode površinske miješanja tla, koja može obuhvatiti veliku površinu ali je dubina ograničena na par površinskih metara, metodom dubokog miješanja tla mogu postići velike dubine poboljšanja tla, ali je tlo ojačano samo lokalno.

Najpoznatije metode u ovoj domeni su švedska metoda i japanska metoda. Do nedavno, švedska metoda je podrazumijevala korištenje samo vapna kao stabilizatora, dok je japanska metoda koristila vapno ili cement za stabilizaciju pretežito mekih morskih depozita, gline i pijeska. Tehnologija izvedbe ovakvih stupova prikazana je na slici 4.20. Oprema za miješanje se rotiranjem spušta do planirane dubine stupa. Na svom putu prema dolje, ona rotacijom razara strukturu tla (A). Nakon dostizanja konačne dubine (B), oprema se vadi na površinu tako da istodobno rotira u smjeru suprotnom od onog pri kojem se spuštala. Pri svom povratku, vezivna tkiva se pod tlakom upuštaju u tlo, te tako formiraju konačni cilindrični stup poboljšanog tla (C).

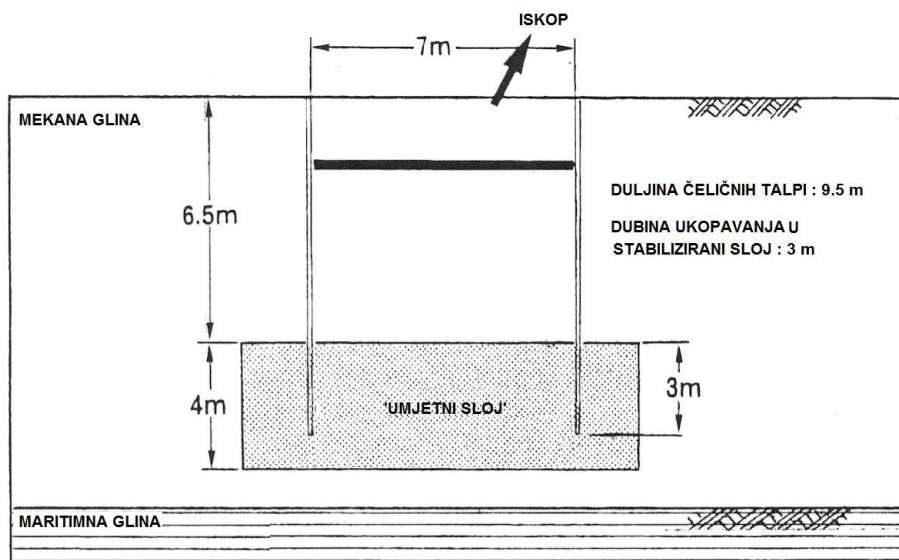


Slika 4.20. Shema ojačanja tla dubinskim miješanjem (Hansson, 2008)

U istraživanju Hansson (2008) se kao zamjena za vapno koristio leteći pepeo u procesu stabilizacije dubinskim miješanjem. Rezultati ovog istraživanja su pokazali da se

korištenjem samog letećeg pepela kao vezivnog sredstva ne dobiju zadovoljavajući rezultati, s obzirom da je ipak potrebno u mješavinu ubaciti i cement ili vapno. Međutim, više nego zadovoljavajući rezultati su se dobili kao rezultat miješanja letećeg pepela, cementa i vapna u mješavinu u kojoj je leteći pepeo sudjelovao sa čak 70%, što ukazuje na potencijalnu primjenu većih količina letećeg pepela u postupku dubinskog miješanja tla.

Sličnu mješavinu kao stabilizator, s velikim količinama letećeg pepela, razvijao je i Ohishi (1997) gdje je za EPDC (Electric Power Development Company) proveo čtavu seriju analiza i pokusa u cilju određivanja karakteristika stabilizatora. Motiv za ovo je bio u ideji da se ovakav stabilizator može koristiti u dubinskom miješanju tla za potrebe izvođenja građevne jame na sljedeći način. Iskop građevne jame, koja je razmatrana, je uključivao izvedbe dijafragme do većih dubina s obzirom da je temeljno tlo imalo izrazito nepovoljne karakteristike. Dubinskim miješanjem se nastojao stvoriti 'umjetni sloj' unutar debljeg sloja mekanog tla, te je dijafragma trebala završiti u tom 'umjetnom' sloju koji bi se sastojao najvećim dijelom od letećeg pepela kao dominantnog sastojka u stabilizatoru (slika 4.21.). Zahtjevi za takvo tlo su podrazmijevali da je ima dovoljnu čvrstoću da podupre zidove dijafragme, ali u isto vrijeme da bude dovoljno mekan da ugradnja dijafragme bude olakšana.

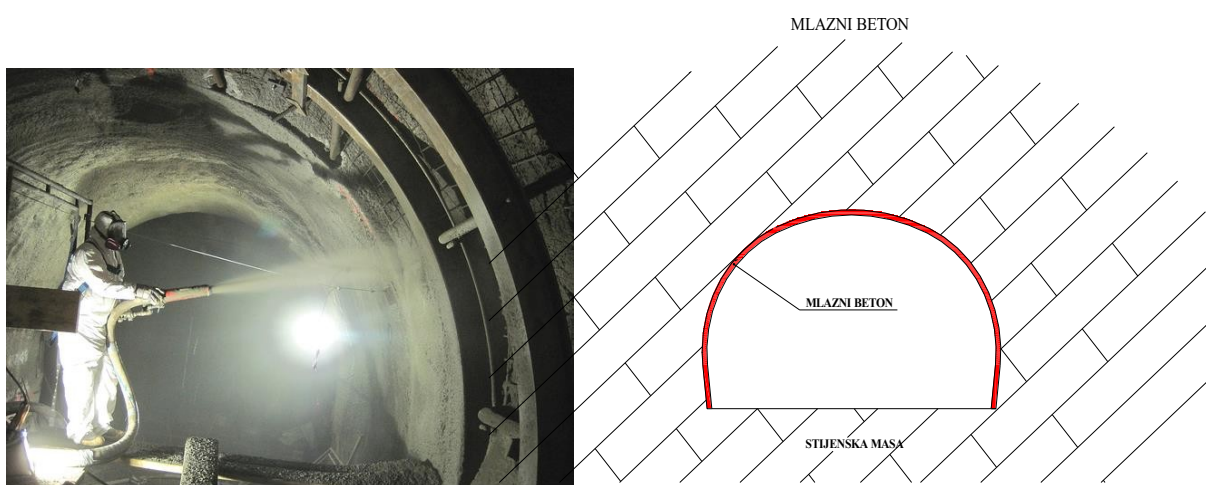


Slika 4.21. Stvaranje “umjetnog” sloja kod izvođenja dijafragme, pretežno sastavljenog od letećeg pepela

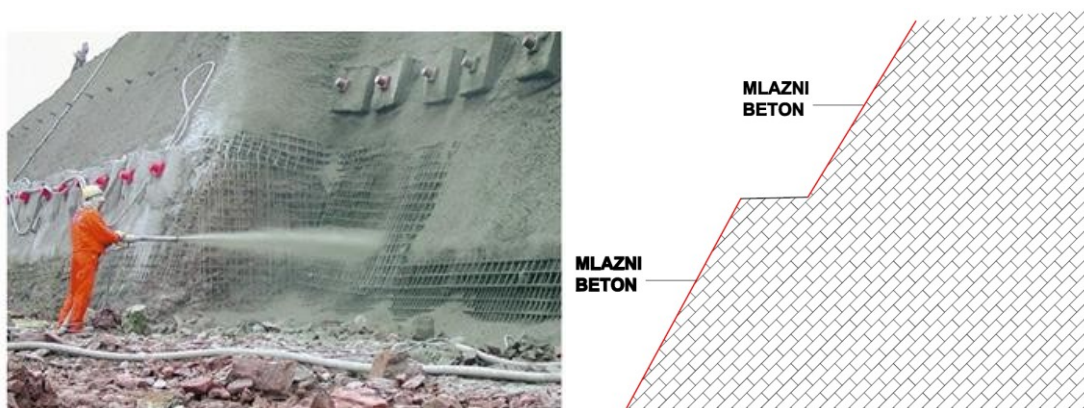


### Mlazni beton

Istraživanja su pokazala utjecaj letećeg pepela kao sastojka mlaznog betona, koji se široko koristi u podzemnom stijenskom inženjerstvu, posebno pri tunelogradnji i zaštiti stijenskih pokosa. U tunelogradnji, obloga od mlaznog betona pomaže zatvoriti pukotine u stijeni, sprječava ispadanje blokova iz kalote i bokova, čime se sprečava progresivni lom. Povezujući se sa stijenom, mlazni beton poboljšava mehaničku kvalitetu stijene i sprječava smanjenje njene čvrstoće. Na slici 4.22. prikazan je proces nanošenja mlaznog betona u tunelu, dok slika 4.23. prikazuje postupak primjene mlaznog betona na stijenskom pokosu.



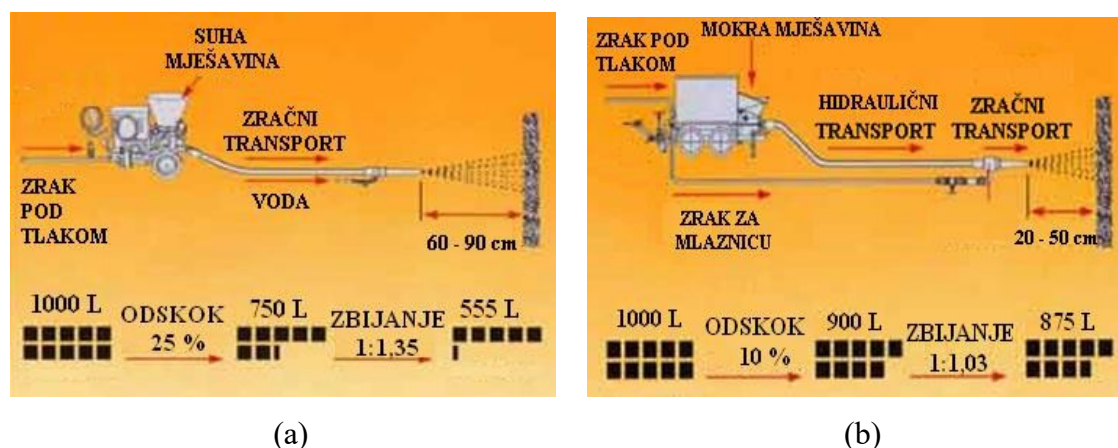
Slika 4.22. Nanošenje mlaznog betona u tunelima (GF- Tunelogradnja)



Slika 4.23. Nanošenje mlaznog betona na stijenskim pokosima (GF- Tunelogradnja)

U početku, ugrađeni mlazni beton djeluje kao popustljiva podgrada zbog niskog modula elastičnosti i početne čvrstoće. Međutim, njegova čvrstoća se postupno povećava, što doprinosi konačnoj stabilnosti podgrade. Trenutno postoji širok izbor opreme za ugradnju mlaznog betona, a koriste se dva osnovna postupka: suhi i mokri.

Kod suhog postupka, suhi materijal se pomoću komprimiranog zraka transportira kroz tanke cijevi do mjesta nanošenja, gdje se u mlaznici miješa s vodom i nanosi pod tlakom od oko 2 bara. U mokrom postupku, mort se već unaprijed miješa s vodom, formirajući gustu, plastičnu smjesu koja se cijevima prenosi do mjesta nanošenja. Na kraju cijevi, u mlaznicu se dodaje stlačeni zrak, koji osigurava potreban tlak. Shema suhe ugradnje prikazana je na slici 4.24a, dok je shema mokre ugradnje mlaznog betona prikazana na slici 4.24b.



Slika 4.24. Shema nanošenja mlaznog betona, suhim postupkom (a), mokrim postupkom (b) (GF- Tunelogradnja)

Leteći pepeo nalazi danas sve veću primjenu u mlaznim betonim koji se ugrađuju suhim ili mokrim postupkom. Primjer primjene letećeg pepela u mlaznom betonu je prikazano u istraživanju Yuno i dr. (2009) gdje je u Japanu razvijena tehnologija izrade tzv. „Finash“, razvrstavanjem i klasifikacijom pepela nastalog kao nusprodukt industrijskog procesa izgaranja ugljena. „Finash“ je visoko funkcionalni leteći pepeo nastao odstranjivanjem nepravilnih čestica, što kao rezultat ima minimizaciju varijacije kvalitete letećeg pepela. Takav leteći pepeo, nakon klasifikacije čestica, osim manje varijacije kvalitete ima okruglije čestice od pepela nakon klasifikacije, te ima veću poculansku reakciju. Kada se visoko funkcionalni leteći pepeo koristi kao zamijena za

finiji agregat, takav mlazni beton ima prednost smanjenja količine prašine i odskoka prilikom nanošenja. Takav mlazni beton karakterizira i povećana čvrstoća. Visoko funkcionalni leteći pepeo je često primjenjivan prilikom iskopa tunela NATM (Nova austrijska tunnelska metoda – najčešća metoda tunelogradnje) metodom. Osim toga, česta je njegova primjena kao dodatka u betonskim mješavinama u ostalim konstrukcijama u građevinarstvu u Japanu. U vrijeme istraživanja, 2009. godine, u Japanu je godišnja potrošnja visoko funkcionalnog letećeg pepela iznosila oko 10 000 tona. Provođenjem ispitivanja nanošenja mlaznog betona, istraživači su dobili su da je specifična površina visoko funkcionalnog letećeg pepela  $5530 \text{ cm}^2/\text{g}$ , dok je specifična površina mlaznog betona bez letećeg pepela, ili s malom količinom letećeg pepela, iznosila  $1770 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Istraživanje je obuhvatilo ispitivanja koncentracije prašine, odskok prilikom nanošenja, čvrstoću, skupljanje, vodopropusnost, otpor na smrzavanje i odmrzavanje, i to za različite mješavine mlaznog betona. Ispitivanja su se provodila na modelima i na stvarnim tunelima te su pokazala sljedeće; Korištenjem visoko funkcionalnog letećeg pepela u mlaznom betonu sadržaj vlage se smanjio, dok se viskoznost takve mješavine povećala. Količina prašine, te odskok prilikom nanošenja su se smanjili za oko 50 %. Takav mlazni beton, s prisutstvom visoko funkcionalnog letećeg pepela, ima brži porast čvrstoće kao i veću trajnost. Jednoosna tlačna čvrstoća je veća što je rezultat gušće mikrostrukture.

Usvojim istraživanjima Morgan (1991), gdje se leteći pepeo koristio kao aditiv ili kao djelomična zamjena za standardni cement, došao je do zaključka da je primjena letećeg pepela u mlazno betonskim mješavinama korisna iz niza razloga. Leteći pepeo omogućava lakše rukovanje i nanošenje mlaznog betona mokrim postupkom. Nadalje on smanjuje količinu topline nastalu kao rezultat hidratacije, te posljedično, smanjuje rizik nastajanja termalnih pukotina. Osim što povećava sulfatnu otpornost, leteći pepeo kontrolira alkalno-agregatne reakcije. U posljednje vrijeme je razvijena mlazno betonska mješavina koja se ugrađuje mokrim postupkom, a koja ima izrazito visoki sadržaj letećeg pepela od 40% do čak 60% ukupne mase. Takvoj mješavini se dodaju i značajne količine superplastifikatora u svrhu dobijanja niskog vodocementnog omjera. Odlika ovakve mješavine je u dobroj volumnoj stabilnosti (malo skupljanje), dobru trajnost na smrzavanje-odmrzavanje i vrlo malu kloridnu propusnost u odnosu na standardne mlazno betonske mješavine koje sadrže portland cement.

Nadalje, u literaturi Hofler i dr. (2006) su navedene karakteristike letećeg pepela kao aditiva u mlaznom betonu. Posebno su navedene uloge letećeg pepela u formiranju karakteristika svježe betonske mješavine, te u razvoju čvrstoće i trajnosnim karakteristikama. I dok leteći pepeo u mlazno betonskoj mješavini pozitivan utjecaj na lakše rukovanje, nema nikakav utjecaj na formiranje rane čvrstoće, ali povećava kasniju čvrstoću. S aspekta trajnosti, leteći pepeo povećava vodootpornost mješavine.

Leteći pepeo je u ispitivanjima Watanabe i dr. (2010) korišten kao sastavni dio mlaznog betona čija se kvaliteta ispitivala primjenom metode akustične emisije. Točnije, korišten je u mješavini u kojoj je zamijenio dio agregata, finijeg pijeska, a pokazalo se da takva mješavina ima povoljnije karakteristike s aspekta ugradnje nego što ga ima mlazni beton bez letećeg pepela, jednako kao što su to potvrdila i ostala ispitivanja. Iako djelomična zamjena za agregat, radi svojih puculanskih svojstava, leteći pepeo je dodatno doprinio povećanju tlačne čvrstoće mlaznog betona. Treba uzeti u obzir da je kod svih ispitivanih mješavina količina portland cementa ostala jednaka, te stoga leteći pepeo nije korišten kao zamjena za cement. Značajno veće količine letećeg pepela (tzv. High Volume Fly Ash, HVFA), točnije 50 % težine ukupnih cementnih materijala, su korištene u ispitivanjima Zhang i dr. (1997), gdje su takav materijal dodatno ojačali vlaknima u količinama od 0.5% ukupnog volumena smjese. Rezultati pokazuju zadovoljavajuću razinu mogućnosti ugradnje, mehaničkih karakteristika, kao i otpornost na penetraciju kloridnih iona i otpornost na cikluse smrzavanja i otapanja.

Slični rezultati su dobiveni i u ispitivanjima Morgan i dr. (1992) i Malhotra i dr. (1994) gdje je još zaključeno da takav mlazni beton ima vrlo malu propusnost, te da se vrlo malo skuplja prilikom sušenja. Malhotra i dr. (1994) su istraživali utjecaj letećeg pepela u primjenama za mlazni beton. Korištenjem letećeg pepela u količini većoj od 50 % cementa, autor je razvio mlazni beton sa tlačnom čvrstoćom od 20 MPa nakon 28 dana, te tlačnom čvrstoćom od 50 MPa nakon jedne godine. Ovim se dokazalo da leteći pepeo značajno utječe na razvijanje kasne čvrstoće mješavina.

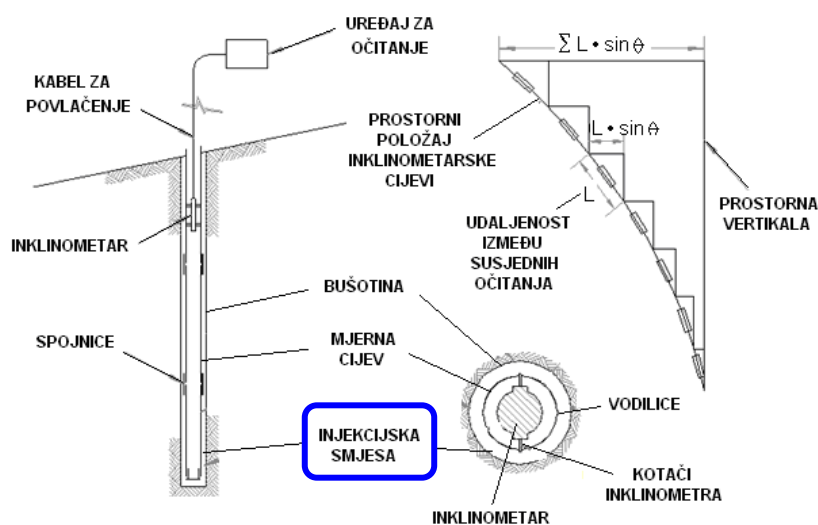
### **Injektiranje bušotina**

U geotehničkom inženjerstvu izvedba bušotina je neizbježan posao. Bušotine se izvode u stijenskim materijalima iz brojnih razloga. Bilo da se radi o bušotinama u koje se

ugrađuju sidra, oprema za geotehnički monitoring ili pak o bušotinama koje su potrebne u procesu eksploatacije geotermalne energije, neizbježno je njihovo injektiranje nakon ugradnje potrebne opreme. Injektiranjem se postiže zadovoljavajući stupanj kvalitete sustava sidro (ili cijevi za monitoring) – injekcijska smjesa - stijenska masa (ili tlo). Dok se leteći pepeo može u injekcijskim smjesama korsistiti na jednak način kao u standardnim betonima, njegova primjena u injektiranju sidara u stijenskim masama je relativno rijetka. Razlog za ovo je u činjenici da jednoosna tlačna čvrstoća injekcijske smjese pri korištenju većih količina letećeg pepela znatno manja nego u slučaju kada koristimo sami cement bez aditiva. Međutim u ostalim bušotinskim aplikacijama, gdje jednoosna tlačna čvrstoća injekcijske smjese ne igra ključnu ulogu, potencijalna primjena letećeg pepela ima prosperitet.

Jedna od takvih aplikacija je geotehnički monitoring - Naime, u svakoj fazi izvedbe, kao i nakon izvedbe, potrebno je definirati realno stanje konstrukcije i tla u svrhu pravovremenog poduzimanja odgovarajućih mjera sanacije ili zaštite ako se mjerenjima pokaže da su takve mjere potrebne. Rezultat programa opažanja i mjerenja su relevantni podaci na temelju kojih je moguće registrirati sve događaje i stanja koji bi mogli dovesti do nesigurnosti objekta i okolnog područja.

Neke od metoda monitoringa su mjerenja inklinometrom i deformatrom. Oni služe za mjerenja pomaka uslijed geotehničkog zahvata. Međutim da bi metoda bila primjenjiva, mjerna oprema se mora nalaziti u bušotini. Ponašanje materijala ispune je od velikog značaja za točnost rezultata mjerenja, jer se nalazi u direktnom kontaktu s ugrađenom opremom i medijem čije se deformacije mjere. Dosadašnja iskustva su pokazala da je najprihvatljivija injekcijska smjesa cementa i bentonita, međutim Mikkelsen (2002) predlaže zamjenu cementa s letećim pepelom. U tom slučaju će čvrstoća i modul elastičnosti smjese pasti jer leteći pepeo sadrži manje kalcija i gipsa, tj. manje cementirajućih sastojaka. Autori međutim preporučuju daljnja istraživanja u ovom području. Na slici 4.25. je prikazan postupak mjerenja inkinometrom s položajem injekcijske smjese unutar bušotine.



Slika 4.25. Postupak mjerenja inklinometrom s naznačenim položajem injekcijske smjese (prema Mikkelsen, 2002)

Moguća upotreba letećeg pepela daje se i u radu Mikkelsen i dr. (2003) u kojem se raspravlja o ugradnji piezometara za mjerenje tlakova vode u tlu, kao jednoj od metoda monitoringa razine podzemnih voda. Kroz rad se prezentiraju karakteristike cementno – bentonitne injekcijske smjese, te se kao zamjena za cement predlaže moguća upotreba letećeg pepela čime bi se smanjila čvrstoća i modul elastičnosti radi manjeg postotka cementnih agenata (kalcija i gipsa).

Još jedna važna primjena letećeg pepela kao sastavnog elementa injekcijske smjese bušotina je u okviru injekcijskih smjesa za injektiranje geotermalnih bušotina. Injekcijske smjese u ovoj primjeni moraju imati dovoljnu termalnu provodljivost, tj. malu termalnu otpornost, iz razloga koji će se navesti u nastavku. Proces korištenja geotermalne energije podrazumijeva iskorištavanje potencijala konstante temperature tla na dubinama od 15-ak m. U tu svrhu je potrebno do tih dubina doći bušenjem bušotina u koje se smještaju apsorpcijske cijevi s fluidom koji ima ulogu prijenosa topline. Takve bušotine se injektiraju, gdje je potrebno imati na umu da injekcijska smjesa mora imati što bolju termalnu provodljivost u svrhu efikasnijeg prijenosa topline u sustavu tlo – injekcijska smjesa – apsorpcijske cijevi. U radu Allan i dr. (2000) se letećim pepelom zamijenilo 40% količine cementa u odnosu na standardne injekcijske smjese za injektiranje geotermalnih bušotina. Veći postotak letećeg pepela također povećava

propusnost injekcijske smjese. Međutim iako leteći pepeo omogućuje potencijalnu financijsku uštedu, manju toplinu hidratacije i povećanje trajnosnih karakteristika, lošije povezivanje sastojaka od cementa može imati negativan utjecaj na provođenje topline. Takvo ponašanje injekcijskih smjesa koje sadrže leteći pepeo je potrebno detaljnije istražiti.

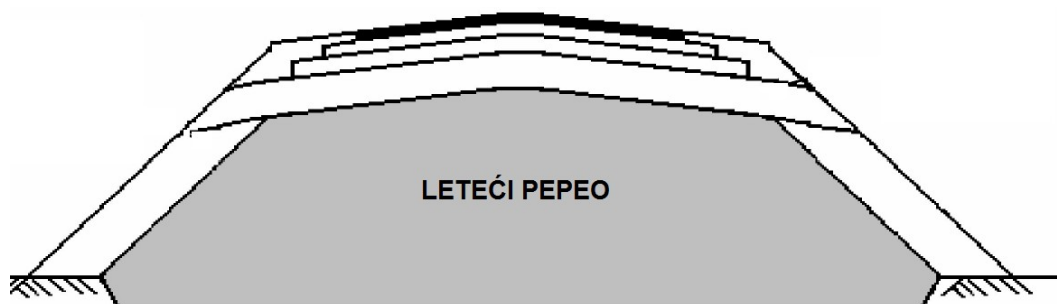
## Nasipi

Izgradnja nasipa predstavlja jednu od najznačajnijih geotehničkih disciplina koja zahtjeva izrazito velike količine zemljanih materijala. Nasipi su linijske konstrukcije čija duljina često može iznositi i do nekoliko desetaka kilometara. Funkcija im može biti višestruka. Kod izgradnje cesta nasipi se koriste da bi se postigla zahtjevana niveleta ceste, dok se u hidrotehničkim aplikacijama koriste kao konstrukcije koje služe za formiranje akumulacija i retencija ili kao zaštita od poplavnih voda. S obzirom koja im je namjena, nasipi zahtijevaju određene karakteristike. Kod cestovnih nasipa stišljivost materijala ispunje je od važnosti u svrhu ograničenja slijeganja, dok je kod hidrotehničkih nasipa njihova mehanička otpornost i propusnost bitnija. Izgradnja mu je takva da se nakon postavljanja sloja zemljanog materijala u određenoj debljini, isti zbija, nakon čega se nanosi sljedeći sloj koji se dalje zbija. Takvim slijedom aktivnosti nasipanja i zbijanja, nasip postiže svoju konačnu visinu, uz uvažavanje nagiba pokosa koji su obično propisani projektom. Tipični izled nasipanih konstrukcija se može vidjeti na slici 4.26. zajedno s tipskim presjekom nasipa.



Slika 4.26. Tipični poprečni presjek nasipa (SEPA, 2014)

Primarna funkcija letećeg pepela u ovoj aplikaciji je da bude zamjena za standardne materijale koji služe kao ispuna, tj. koji formiraju tijelo nasipa. Međutim radi svojih poculanskih svojstava može djelomično utjecati i na povećanje stabilnosti samog nasipa. Poželjno je međutim da leteći pepeo ima što manja samocementirajuća svojstva, radi olakšane ugradnje, što će detaljnije biti razmatrano u nastavku ovog poglavlja. S obzirom na činjenicu da je za formiranje nasipa potrebno na raspolaganju imati izrazito velike količine materijala koji će činiti nasip, leteći pepeo koji se nagomilava na odlagalištima zvuči kao logično rješenje pri primjeni za formiranje tijela nasipa. Prema posljednjim iskustvima (Santos i dr., 2011), korištenjem letećeg pepela kao materijala za nasipanje, može se postići učinkovitost usporediva s formiranjem nasipa od zemljanih materijala. U tom slučaju, neke karakteristike letećeg pepela koje su navedene u poglavlju X. koje razmatra geotehničke karakteristike letećeg pepela, su od ključne važnosti; odnos vlažnosti i zbijenosti koji se uspješno može odrediti Proctorovim pokusom, granulometrijski sastav, vodopropusnost i paramteri čvrstoće. Na slici 4.27. se može vidjeti poprečni presjek nasipa za autocestu u kojemu leteći pepeo formira tijelo nasipa.



Slika 4.27. Poprečni presjek nasipa čije je tijelo formirano od letećeg pepela

Leteći pepeo koji se koristi za formiranje nasipa u svijetu je prema FHWA (2008), u većini slučajeva nastao kao nusprodukt izgaranja antricitnih ili bitumenoznih ugljena. Iako poculanska očvršćavajuća svojstva letećih pepela nastalih uslijed izgaranja lignitnih i subitumenoznih ugljena mogu značajnije utjecati na povećanje čvrstoće, te se, kako je veća navedeno, takvi leteći pepeli ne koriste često. Naime samocementirajući leteći pepeli prilikom dodavanja vode mogu prerano očvrnuti, što rezultira s potencijalnim problemima u rukovanju i nemogućnošću kvalitetnog zbijanja. Ako je



takav leteći pepeo jedini dostupni, onda je potrebno provesti određene tretmane. Prvo se mora s dodavati voda (10-15 %), skladištiti ga na nekoliko tjedana, te zatim provesti kroz stroj za mljevenje da bi se uklonile neželjene aglomeracije. Takav je spreman za ugradnju, a ako je eventualno potrebno dodati još vode da bi se dosegla optimalna vlažnost, onda je to potrebno uraditi neposredno prije zbijanja. Letećim pepelom, a posebice onim s nesamocementirajućim svojstvima, kao materijalom za formiranje nasipa je izrazito jednostavno rukovati i zbijati ga iz razloga jer je takav materijal lagan i nema većih kvržica i nepravilnosti u svom sastavu. Može se zbijati koristeći vibrator ili statičke valjke.

S obzirom da je vlažnost pri zbijanju jedan od ključnih parametara ako se leteći pepeo namjerava koristiti za formiranje nasipa, potrebno je visoka razina stručnosti i opreza kako prilikom projektiranja tako i prilikom izgradnje. Vlažnost letećeg pepela je jedina karakteristika koju je potrebno modificirati za ugradnju u nasip. Da bi se prilikom ugrađivanja postigao stupanj zbijenosti koji je zahtijevan projektom, obično se zahtijeva da prilikom dostavljanja na gradilište leteći pepeo ima vlažnost unutar granica od 3 do 4% (Collins i dr., 1989) u odnosu na optimalnu vlažnost.

Važno je naglasiti da i potencijalni nedostaci prilikom korištenja letećeg pepela u nasipima se odnose na potencijalne varijacije u vlažnosti, ali to je problem koji se javlja i pri korištenju konvencionalnih materijala za nasipe. Uz vlažnost, potencijalni nedostatak korištenja letećeg pepela za formiranje nasipa se očituje kroz činjenicu da je leteći pepeo, kao dominantno materijal prašinih frakcija, podložan eroziji uslijed djelovanja voda ili jačeg vjetrova, te su potrebne dodatne kontrolne mjere zaštite od erozije. Odmah nakon gradnje pokosi nasipa od letećeg pepela se stabiliziraju tanjim slojem portland cementa ili vapna, ili čak tankim slojem krupnijeg, donjeg pepela (FHWA, 2008).

Osim dominantnih, kompakcijskih parametara, letećeg pepela pri formiranju nasipa, u svrhu osiguranja stabilnosti temeljnog tla i samog nasipa, moraju biti zadovoljeni parametri stišljivosti i posmične čvrstoće. Izrazito povoljna karakteristika letećih pepela u formiranju nasipa je u činjenici da je leteći pepeo lagan materijal u usporedbi ga sa standardnim materijalom za formiranje nasipa. Tako on uzrokuje manja slijeganja nastala kao rezultat težine nasipa. Ovo je izrazito atraktivno pri formiranju nasipa na

slabim i mekanim tlima kao što su aluvijalne gline ili prahovi gdje prekomjerna težina može dovesti do sloma. Značajno manja stišljivost letećeg pepela pak uzrokuje neznatna naknadna slijeganja unutar samog nasipa.

Kod proračuna stabilnosti nasipa formiranog od letećeg pepela potrebno je, kao i kod nasipa od standardnih materijala, provesti određene analize kojima bi se dokazala stabilnost. U tim slučajevima se analizira posmična čvrstoća koja je rezultat djelovanja dvaju parametara – kuta trenja i kohezije. Kako je ranije navedeno, kut trenja se kreće prema preoprukama američke agencije za autoceste u rasponu od  $26^{\circ}$ -  $42^{\circ}$ .

Ispitivanja McLaern i dr. (1987) su uključivala ispitivanja posmične čvrstoće na 51 različitom uzorku letećeg pepela gdje je srednja vrijednost kuta trenja svih ispitivanih uzoraka bila  $34^{\circ}$ , sa standardnom devijacijom od 3.3., tako da se za potrebe projektiranja kut trenja od  $30^{\circ}$  može s opravdanošću uzeti. Kohezija bi se trebala uzimati s vrijednošću nula, osim ako se nasip ne izvodi od samocementirajućeg letećeg pepela kad bi za koheziju bilo opravdano uzeti neke niske vrijednosti.

Osim korištenja samog letećeg pepela, moguće je za formiranje nasipa koristiti i mješavine letećeg pepela i tla. Zanimljivo je istraživanje predstavljeno u literaturi Bhuvaneshwari i dr. (2005), kod kojeg je kao materijal za izgradnju nasipa korištena lokalno dostupna glina. Takva glina međutim je imala ekspandirajuća svojstva i kao takva nije bila pogodna za ugradnju. Stoga je prethodno stabilizirana letećim pepelom, na način na koji je prikazano u prethodnom poglavlju, te je nakon postizanja zadovoljavajućih parametara takva mješavina ekspandirajuće gline i letećeg pepela formirala tijelo nasipa.

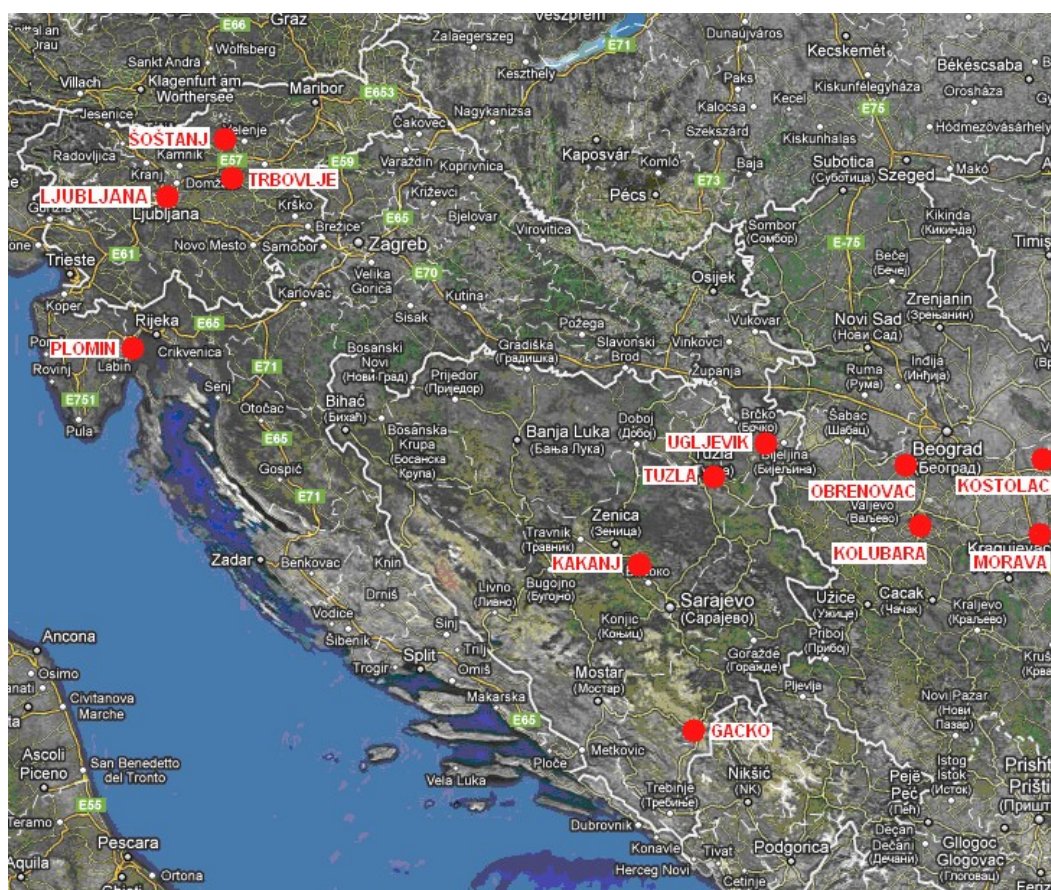
U istraživanju Santos i dr. (2011) provedeni su laboratorijski pokusi u svrhu određivanja geotehničkih karakteristika tla koje je namijenjeno miješanju s letećim pepelom pri čemu bi krajnji proizvod bio materijal koji bi imao mogućnost formiranja nasipa. Vršena su ispitivanja za materijal koji sadrži redom 0, 20, 40, 60, 100% letećeg pepela u ukupnoj masi te je podvrgnut ispitivanjima da bi se odredila svojstva zbijanja, vodopropusnosti i tlačne čvrstoće. Ispitivanjima je pokazano da mješavine tla i letećeg pepela pokazuju vrlo jasno definiranu vezu između vlage i zbijenosti, gdje se povećanjem količine letećeg pepela u mješavini povećava i vrijednost optimalne vlage pri kojoj se postiže najveća zbijenost. Zbijenost se pak povećanjem vlage smanjuje.

Jednosna tlačna čvrstoća se povećava sa sadržajem letećeg pepela, gdje 100% letećeg pepela (dakle bez primjesa tla) ima jednoosnu tlačnu čvrstoću od 9,4 MPa. Koeficijent vodopropusnosti iznosi, prema ovom istraživanju iznosi  $2,45 \times 10^{-8}$  cm/s, što je vrijednost za dva reda veličine veća od onih danim u smjernicama FHWA, 2008..

Iako je leteći pepeo kao materijal jeftiniji od konvencionalnih materijala koji se koriste za ugrađivanje, potrebno je u obzir uzeti i cijenu transporta takvog materijala od njegovog odlagališta. Nasipi kao linijske građevine koje mogu imati duljinu i do nekoliko desetaka kilometara, moraju imati izrazito kvalitetno razrađenu organizaciju gradilišta, koja je vrlo kompleksna. Potrebno je stoga u ekonomsku razradu projekta za formiranje nasipa uzeti u obzir brojne parametre, od cijene samog materijala za nasipanje, načina i udaljenosti za transport, pa sve do tehnologije ugradnje materijala.

#### 4.5. PREGLED LETEĆEG PEPELA U HRVATSKOJ I OKOLICI

Ovo poglavlje pružit će informacije o sastavu i karakteristikama letećih pepela dobivenih izgaranjem u termoelektranama Republike Hrvatske i susjednih zemalja, na temelju dostupnih podataka. U Hrvatskoj, jedina termoelektrana koja koristi ugljen kao gorivo je TE Plomin, smještena na istočnoj obali Istarskog poluotoka. U Sloveniji, termoelektrane na ugljen uključuju TE Šoštanj, TE Trbovlje i TE Ljubljana. U Bosni i Hercegovini aktivne su termoelektrane TE Tuzla, TE Kakanj, TE Ugljevik i TE Gacko. U Srbiji su u pogonu TE Nikola Tesla, TE Kostolac, TE Kolubara i TE Morava. Na slici 4.28. prikazane su lokacije ovih termoelektrana.



Slika 4.28. Lokacije termoelektrana na ugljen u Republici Hrvatskoj i regiji

Ključan aspekt primjene letećeg pepela u geotehničkim aplikacijama čine raspoložive količine. Dok su u Hrvatskoj i Sloveniji potražnja i potrošnja letećeg pepela uglavnom u ravnoteži (zbog niže proizvodnje), u Bosni i Hercegovini, a posebno u Srbiji, postoji značajna količina odloženog letećeg pepela koji bi se mogao iskoristiti za različite

geotehničke primjene, opisane u prethodnom poglavlju. U nastavku će biti prikazane informacije o termoelektranama u regiji, s posebnim naglaskom na godišnju potrošnju ugljena, godišnju proizvodnju letećeg pepela i sastav pepela. Ove informacije mogu poslužiti kao smjernica za odabir letećeg pepela u budućim geotehničkim primjenama.

### **Republika Hrvatska**

U Hrvatskoj se jedina termoelektrana na ugljen, TE Plomin (slika 4.29), nalazi na istočnoj obali Istarskog poluotoka. Razlog u činjenici što je to jedina termoelektrana na ugljen treba naći u činjenici da su energetske izvori u Hrvatskoj najviše usmjereni na hidropotencijal.



Slika 4.29. TE Plomin ([www.hep.hr](http://www.hep.hr))

Termoelektrana Plomin sastoji se od dva bloka. Prvi blok, izgrađen 1969. i pušten u rad 1970. godine, te drugi blok, izgrađen 1999. i u pogonu od 2000. godine. Oba bloka godišnje troše oko 800.000 tona uvoznog kamenog ugljena niskog sadržaja sumpora, koji se nabavlja iz SAD-a, Kolumbije, Venezuele, Rusije, Južnoafričke Republike, Indonezije i Kine. U normalnom režimu rada TE Plomin godišnje proizvede približno 90.000 tona letećeg pepela. Većina nusproizvoda izgaranja koristi se kao sirovina u cementari Holcim u Koromačnom.

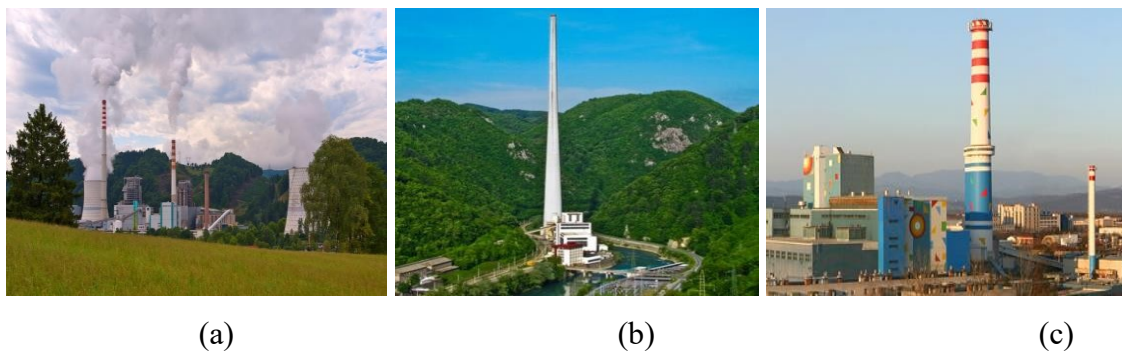
Kemijski sastav letećeg pepela iz TE Plomin pokazuje da se može klasificirati kao leteći pepeo klase F prema američkoj specifikaciji prikazanoj u tablici 4.5. Njegova gustoća iznosi 2,27 g/cm<sup>3</sup>, dok je gubitak žarenjem (LOI) nizak, tek 1,6 %.

Komponenta	mas. %
SiO <sub>2</sub>	59,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,93
CaO	2,81
MgO	0,84
SO <sub>3</sub>	0,18
Na <sub>2</sub> O	0,40
K <sub>2</sub> O	1,27
C	0,6

Tablica 4.5. Kemijski sastav letećeg pepela TE Plomin (www.hep.hr)

### Republika Slovenija

U Republici Sloveniji su trenutačno aktivne tri termoeletrane na ugljen, TE Šoštanj, TE Trbovlje i TE Ljubljana. TE Šoštanj za izgaranje koristi lignit, TE Trbovlje lignit i mrki ugljen, a TE Ljubljana uvozni mrki ugljen. TE Šoštanje u prosjeku godišnje, za proizvodnju električne energije upotrijebi, više od 4 milijuna tona ugljena, dok su ostale termoeletrane daleko iza nje, s godišnjom potrošnjom od 620.000,00 (TE Trbovlje) i 500.000,00 (TE Ljubljana). Godišnja proizvodnja letećeg pepela u Sloveniji iznosi oko 800.000 tona za TE Šoštanj, 140.000,00 tona za TE Trbovlje, te tek oko 24.000,00 tona za TE Ljubljana. Većina letećeg pepela se koristi kao materijal ispune u građevinskim i rudarskim poslovima, dok se samo manji dio odlaže (primjerice najveći proizvođač letećeg pepela TE Šoštanj uopće ne odlaže leteći pepeo, već se koristi u potpunosti u druge svrhe).



Slika 4.30. TE u Republici Srbiji – TE Šoštanj (a), TE Trbovlje (b), TE Ljubljana (c)

Prema dostupnoj literaturi može pronaći kemijski sastav letećeg pepela s lokacija TE Šoštanj i TE Trbovlje, isti su dani u tablici 4.6.

TE Komponenta	Šoštanj	Trbovlje
SiO <sub>2</sub>	43.58	49.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.58	26.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.2	8.74
CaO	13.18	6.59
MgO	2.57	2.26
SO <sub>3</sub>	1.98	1.33
Na <sub>2</sub> O	1.15	1.09
K <sub>2</sub> O	2.0	2.32
TiO <sub>2</sub>	0.96	0.98
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.1

Tablica 4.6. Kemijski sastav letećeg pepela TE u Republici Sloveniji ([www.te-sostanj.si](http://www.te-sostanj.si))

### Bosna i Hercegovina

U Bosni i Hercegovini su trenutno aktivne četiri termoelektrane na ugljen. To su TE Tuzla, TE Kakanj, TE Ugljevik i TE Gacko. Bosnu i Hercegovinu karakteriziraju izrazito velike količine resursa ugljena, te je stoga rad termoelektrana najvećim dijelom baziran na izgaranju ugljena. Na slici 4.31. se mogu vidjeti položaji rudnika u Bosni i

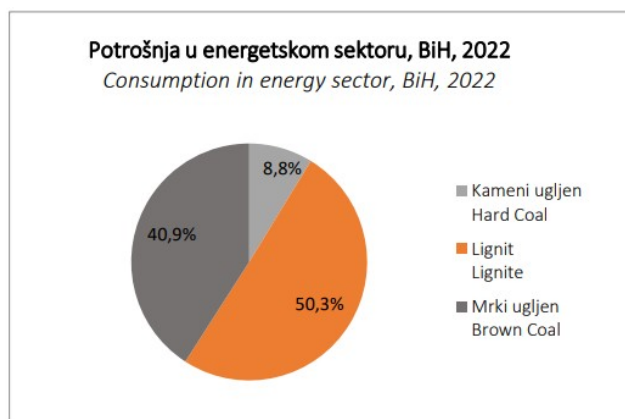
Hercegovini, te njihova udaljenost od termoelektrana prema Studiji razvoja energetskog sektora u BiH (ESSBIH) iz 2008. godine.



Slika 4.31. Položaj rudnika ugljena i termoelektrana u BiH (ESSBIH, 2008)

Prema podacima Agencije za statistiku BiH iz Saopćenja br. 14 od 5. prosinca 2023., proizvodnja ugljena u Bosni i Hercegovini u 2022. godini iznosila je 13.327.928 tona, od čega je proizvedeno 6.698.050 tona lignita i 6.629.878 tona mrkog ugljena. U potrošnji energetskog sektora, lignit sudjeluje s 50,3 %, mrki ugljen s 40,9 %, a kameni ugljen s 8,8 %. Na slici 4.32. prikazana je ova struktura potrošnje.





Slika 4.32. Potrošnja ugljena u BiH u energetske sektoru 2021. Godine (Agencija za statistiku BiH 2023)

TE Tuzla koristi lignit i mrki ugljen iz rudnika Kreka, Banovići i Đurđevik, s godišnjom potrošnjom od oko 3,5 milijuna tona ugljena. U TE Tuzla primjenjuje se tehnologija u kojoj se zgura i pepeo miješaju s vodom u omjeru 1:7 do 1:15, nakon čega se transportiraju na posebno izgrađene deponije. Dio pepela iz elektrofiltera bloka 4 transportira se u međusilos kapaciteta 80 m<sup>3</sup>, a zatim u silos od 1570 m<sup>3</sup>, odakle se koristi za potrebe cementare Lukavac. Prosječna godišnja proizvodnja letećeg pepela iznosi oko 770.500 tona.

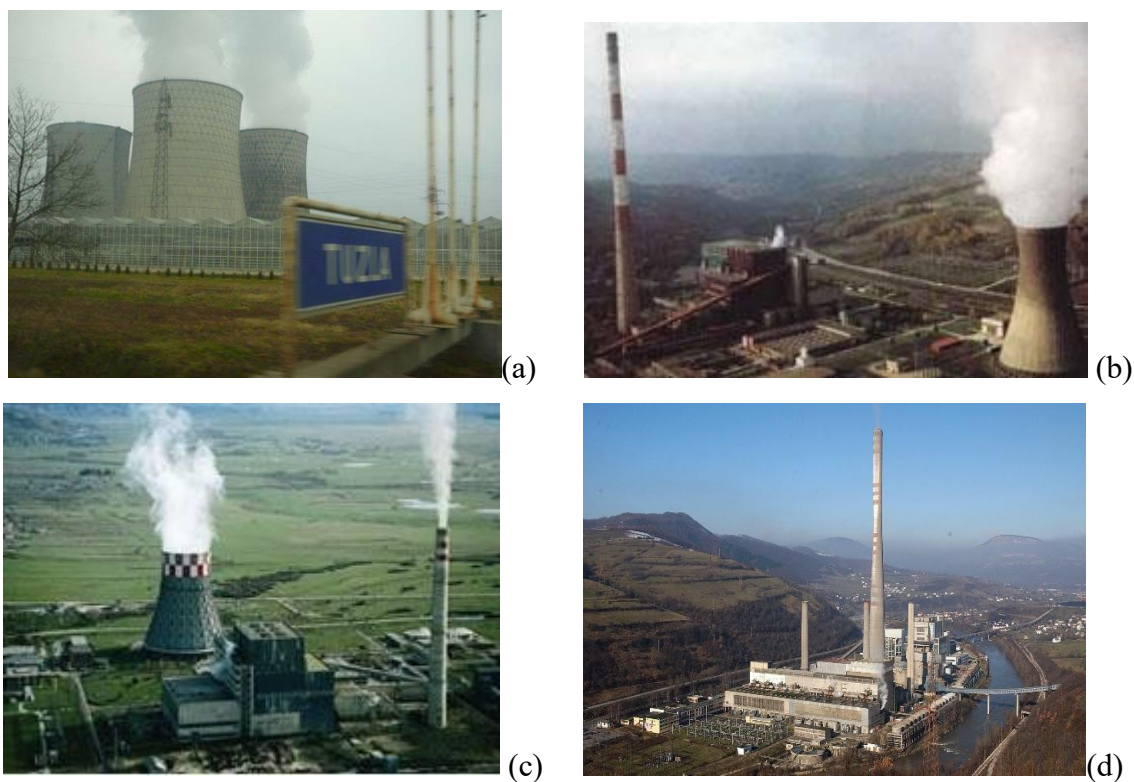
Prema dostupnoj literaturi o osnovnim karakteristikama elektrofilterskog pepela iz TE Tuzla, ovaj pepeo ima granulometrijski sastav koji odgovara skupini prašinasto-glinovitih pijesaka, s prosječnom specifičnom težinom od 1,9 g/cm<sup>3</sup> do 2,1 g/cm<sup>3</sup>. Kemijski sastav, prikazan u tablici 4.7., ukazuje na to da pepeo iz TE Tuzla pripada tzv. kiselim pepelima, s visokim udjelom aluminosilikata.

U TE Ugljevik, kao gorivo se koristi mrki ugljen iz PK Bogutovo Selo, čija je godišnja potrošnja oko 1,9 milijuna tona, a kao nusprodukt njegovog izgaranja nastaje pepeo čije su karakteristike dane u tablici 4.7. Prema literaturi godišnja proizvodnja letećeg pepela iznosi oko 480.000 tona.

Termoelektrana Gacko koristi lignit iz površinskog kopa Gračanica, s godišnjom potrošnjom od oko 2 milijuna tona. Izgaranjem ugljena stvara se oko 79 tona pepela i šljake po satu, što godišnje iznosi približno 420.000 tona. Pepeo na odlagalištima predstavlja potencijalno opasan materijal s dominantnim udjelom vapna (CaO), koje prema tablici 4.7. čini oko 70 % sastava. Zbog toga se elektrofilterski pepeo TE Gacko

izdvaja od "standardnog" pepela i ima specifične karakteristike, pri čemu u kontaktu s vodom stvara baznu sredinu s visokim pH faktorom od 13. To predstavlja ekološki izazov jer se viškovi takve vode ispuštaju u rijeke Gračanicu i Mušnicu, što može imati štetne posljedice na okoliš.

Termoelektrana Kakanj smještena je u srednjobosanskom ugljenom bazenu, koji ima značajne geološke rezerve mrkog ugljena. Godišnja potrošnja ugljena iznosi oko 1,8 milijuna tona, a udio izvora opskrbe je sljedeći: 60 % ugljena dolazi iz rudnika Kakanj, 20 % iz rudnika Breza, 10 % iz rudnika Zenica i 10 % iz drugih rudnika. Kao rezultat izgaranja, godišnje se proizvodi oko 390.000 tona pepela. Kemijski sastav pepela iz TE Kakanj prikazan je u tablici 4.7.



Slika 4.33. TE u Bosni i Hercegovini – TE Tuzla (a), TE Ugljevik (b), TE Gacko (c), TE Kakanj (d) ([www.elektroenergetika.info/he-bih](http://www.elektroenergetika.info/he-bih))

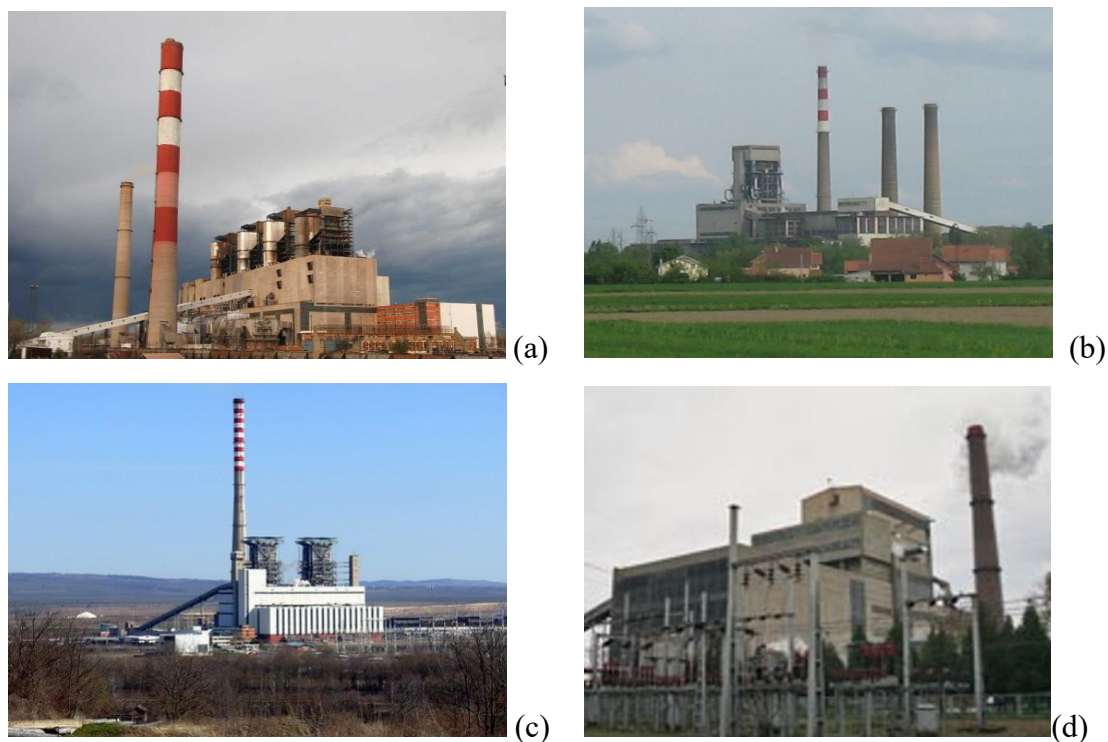
Poglavlje 4  
Leteći pepeo kao vezivo

TE Komponenta	Tuzla	Ugljevik	Gacko	Kakanj
SiO <sub>2</sub>	55.8	31.97	10.39	cca 42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.2	17.09	5.93	cca 19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.85	11.89	3.29	cca 9
CaO	5.29	15.08	67.71	cca 23
MgO	2.88	3.62	1.73	pod 'ostalo'
SO <sub>3</sub>	pod „ostalo“	17.46	7.72	cca 2
Na <sub>2</sub> O	pod „ostalo“	0.62	0.09	pod 'ostalo'
K <sub>2</sub> O	pod „ostalo“	1.30	0.27	pod 'ostalo'
TiO <sub>2</sub>	pod „ostalo“	0.58	0.43	pod 'ostalo'
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	pod „ostalo“	0.19	0.27	pod 'ostalo'
Ostalo	798	0.2	2.10	cca 5

Tablica 4.7. Kemijski sastav letećih pepela TE u Bosni i Hercegovini  
([www.elektroenergetika.info/he-bih](http://www.elektroenergetika.info/he-bih))

### Republika Srbija

U Srbiji se kao osnovna energetska sirovina u termoelektranama godišnje potroši preko 35 milijuna tona ugljena, što rezultira proizvodnjom oko 7 milijuna tona pepela i šljake. S obzirom na to da Srbija još nema jasnu strategiju za daljnje iskorištavanje letećeg pepela, na postojećim odlagalištima trenutno se nalazi više od 180 milijuna tona pepela, što predstavlja značajan potencijal za geotehničke primjene. Godišnje se kao nusproizvod izgaranja ugljena stvori oko 5,5 milijuna tona pepela i šljake. U Srbiji gotovo sve proizvedene količine pepela završavaju na deponijama, gdje se trenutno nalaze zalihe veće od 180 milijuna tona. U tablici 4.8. prikazane su godišnje količine proizvodnje pepela za pojedine termoelektrane u Srbiji.



Slika 4.34. TE u Republici Srbiji – TE Nikola Tesla (a), TE Kolubara (b), TE Kostolac (c), TE Morava (d) (www.eps.rs)

Termoelektrana	Prosječna godišnja proizvodnja pepela [t]	Godina formiranja	Ukupne površine [ha]
TE 'Nikola Tesla A'	2.200.000 - 2.500.000	1974.	400
TE 'Nikola Tesla B'	1.800.000 - 2.200.000	1984	600
TE 'Kostolac'	550.000	1977.	246
TE 'Kolubara'	535.000	1976.	78
TE 'Morava'	90.000	1968.	45
Ukupno u eksploataciji cca	5.565.000		1.369

Tablica 4.8. Godišnja proizvodnja letećeg pepela u TE u Republici Srbiji (www.eps.rs)

Kako je najbolji pokazatelj različitosti pepela iz pojedinih termoelektrana je njegov kemijski sastav, tako je u tablici 4.9. prikazan sadržaj pojedinih oksida pepela u Srbiji. Po kemijskom sastavu, vidljivo je da su pepeli iz termoelektrana Obrenovac, Kostolac i ostalih kiseli.

TE Komponenta	NikolaTesla A	NikolaTesla B	Kolubara	Kostolac A	Kostolac B
SiO <sub>2</sub>	55.4	56.2	53.8	50.4	53.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.9	24.5	25.7	24.4	21.1
CaO	4.6	5.2	4.3	8.6	9.2
MgO	2.1	2.0	1.7	4.2	3.6
TiO <sub>2</sub>	1.1	0.8	0.6	0.9	0.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.6	9.0	7.4	9.7	9.9
SO <sub>3</sub>	1.4	1.1	-	1.1	0.9
Na <sub>2</sub> O	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
K <sub>2</sub> O	1.8	0.9	1.1	0.5	0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

Tablica 4.9. Kemijski sastav letećih pepela TE u Republici Srbiji (www.eps.rs)

#### 4.6. KARAKTERISTIKE LETEĆEG PEPELA UPOTREBLJAVANOG U LABORATORIJSKIM ISPITIVANJIMA

Prema standardu ASTM C618, leteći pepeo dijeli se u dvije glavne kategorije: klasu F i klasu C, pri čemu je klasifikacija zasnovana na kemijskom sastavu. Leteći pepeo klase F najčešće nastaje izgaranjem tvrdih, starijih ugljena poput antracitnih i bitumeniziranih. Ova klasa pepela ima pucolanska svojstva i sadrži manje od 15 % vapna. Silikati i aluminijevi silikati prisutni u letećem pepelu klase F zahtijevaju cementni agens (npr. Portland cement, vapno ili hidratizirano vapno) kako bi, uz prisutnost vode, formirali cementni spoj. Dodavanjem kemijskog aktivatora ovom tipu pepela može doći do formiranja tzv. geopolimera.

Leteći pepeo klase C proizvodi se izgaranjem mlađih lignitnih ili subbitumeniziranih ugljena. Osim pucolanskih svojstava, ovaj pepeo ima i samovezujuće karakteristike, pa mu nije potreban dodatni aktivator za očvršćavanje. Sadrži više od 20 % vapna i, u prisutnosti vode, prirodno stvrdnjava te s vremenom povećava čvrstoću. Leteći pepeo klase C sadrži viši udio alkalnih i sulfatnih primjesa u usporedbi s klasom F. Zahvaljujući samovezujućim svojstvima, ovi pepeli u pravilu ne zahtijevaju aktivatore, zbog čega su često nazvani samovezujućim letećim pepelima.

Za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji, uzorak letećeg pepela dobavljen je iz tvrtke HOLCIM (Hrvatska) d.o.o., koja u svom proizvodnom procesu koristi leteći pepeo iz termoelektrane Plomin u Hrvatskoj. Kemijska svojstva letećeg pepela analizirana su u laboratoriju tvrtke HOLCIM (tablica 4.10). Prema normi ASTM C618-94a, budući da kombinirani udio  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  prelazi 70 %, a sadržaj sumpornog trioksida ( $\text{SO}_3$ ) je manji od 5 %, ovaj leteći pepeo klasificiran je kao klasa F. Prosječna specifična gustoća uzorka iznosi  $2,11 \text{ g/cm}^3$ .

udio	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	Cl	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	LOI	R45
[%]	55,88	16,07	5,39	4,5	1,67	0,54	0,01	1,65	1,71	3,85	9,19

Tablica 4.10. Kemijski sastav uzorka letećeg pepela (TE Plomin)

#### **4.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI**

U ovom poglavlju opisani su procesi nastajanja letećeg pepela uz opisani kemijski i mineraloški sastav. Također opisane su osnovne geotehničke karakteristike letećeg pepela uz primjenu letećeg pepela u geotehnici i općenito građevinarstvu. Na kraju poglavlja dati su statistički podaci o količinama letećeg pepela u RH i susjednim državama.

Leteći pepeo se javlja kao nusprodukt koji nastaje izgaranjem ugljena u termoelektrana koji se pretežito koristi u inustriji proizvodnje cementa i betonske galanterije.

Iz svega prethodnoga može se zaključiti da leteći pepeo u geotehnici može imati široku potencijalnu primjenu. U nekim aplikacijama su od veće važnosti poculanska svojstva letećeg pepela, i tada on služi kao djelomična (rijetko potpuna) zamjena standardnim vezivnim materijalima kao što su cement ili vapno. Takve primjene uključuju ojačanje tla, primjenu u mlaznim betonima, injekcijskim smjesama za injektiranje bušotina ili materijalima niskih čvrstoća (CLSM). Za leteći pepeo u navedenim aplikacijama je poželjno da ima što veći postotak kalcij oksida, te se takvi leteći pepeli nazivaju samocementirajućim letećim pepelima.

## 5. ZGURA KAO VEZIVO

### 5.1. UVOD

U ovom poglavlju prikazat će se proces nastanka zgure, njezin mineraloški i kemijski sastav, kao i geotehničke karakteristike i primjena u geotehničkim inženjerskim projektima. Prema Gandhiju (2005), elektropečna zgura (poznata i kao crna zgura ili troska) najvažniji je otpadni materijal u procesu proizvodnje čelika elektropečima. U mnogim razvijenim zemljama danas se tretira kao nusproizvod (Sofilić i dr., 2011), dok se, nažalost, u mnogim drugim zemljama, uključujući Hrvatsku, još uvijek najčešće kategorizira kao neopasni otpad. Ipak, zbog svojih svojstava i široke primjenjivosti, kako u metalurgiji tako i u drugim industrijama, zaslužuje status nusproizvoda.

Podaci o globalnoj proizvodnji zgure nisu javno dostupni, no procjenjuje se da ona iznosi približno 25% do 30% proizvodnje sirovog željeza i čelične zgure te oko 10% do 15% proizvodnje sirovog čelika. Na temelju tih procjena, ukupna svjetska proizvodnja željezne zgure u 2018. godini iznosila je oko 300 do 360 milijuna tona, dok se čelična zgura kretala između 190 i 290 milijuna tona. Prema Lebo i dr. (2021), na području Republike Hrvatske procjenjuje se da postoji oko 1,8 milijuna tona lako dostupne zgure, uglavnom iz željezara u Sisku i Splitu.

U 2023. godini, 29,7 milijuna tona zgure iskorišteno je u različitim oblicima kao građevinski materijal u EU i UK. Od toga, 20,3 milijuna tona (68%) činila je granulirana zgura iz visokih peći, od koje je 18,3 milijuna tona (90%) mljeveno i korišteno u proizvodnji cementa, dok je preostalih 2 milijuna tona (10%) upotrijebljeno kao agregat. Preostalih 9,4 milijuna tona činila je čelična zgura, od koje je 600.000 tona (6,4%) iskorišteno u proizvodnji cementa i betona, dok je ostatak korišten za izgradnju cesta.



## 5.2. OPĆENITO O ZGURI

U metalurškim procesima zgura nastaje tijekom rafinacije taline dodavanjem nemetalnih dodataka i talitelja, koji su smjese različitih oksida, te putem međudjelovanja taline i vatrostalnog materijala obzida peći (Sofilić, 2010). Tijekom taljenja ili rafinacije, zgura pliva na površini rastaljenog metala, štiteći ga od oksidacijskog ili redukcijskog djelovanja atmosfere i čineći ga čistim. Vrsta nastale zgure ovisi o vrsti rudače koja se prerađuje te načinu hlađenja zgure (kristalasta, granulirana, ekspanzirana ili pjenušava). Zgura se javlja kao rastaljena tekućina, složena otopina oksida i silikata koja se stvrdnjava nakon hlađenja. Kada se metalurške zgure razvrstavaju prema procesima u kojima nastaju, obično se dijele (Remus i dr., 2013) na:

- Zgura iz proizvodnje sirovog željeza (zgura iz visokih peći - BF)
- Zgure iz proizvodnje čelika
  - a) zgura iz kisikovih konvertora (engl. Basic Oxygen Furnace - BOF)
  - b) zgura iz elektrolučne peći (engl. Electric arc Furnace - EAF)
  - c) zgura iz lonac peći.

Zgura iz visokih peći (BF) i čelična zgura čine najveći dio nusproizvoda u čeličanama. Čelična zgura nastaje bilo od pretvorbe željeza u čelik u osnovnom kisikovom konverteru (BOF), bilo od taljenja otpada za proizvodnju čelika u električnoj lučnoj peći (EAF). Ova zgura predstavlja nusproizvod najvećeg volumena u čeličanama. Iako čelične zgure iz ovih dviju peći imaju slična svojstva, čelična zgura iz lonca-peći, koja nastaje daljnjim rafiniranjem u loncu, znatno se razlikuje od visokopećne čelične zgure (Shi, 2004.).

Također, nije moguće zanemariti tzv. nemetalurške zgure koje nastaju u termoenergetskim postrojenjima, kao i zgure koje nastaju u spalionicama krutog otpada. U kategoriju željeznih zgura, osim visokopećnih i čeličanskih zgura, ubrajaju se i ostale zgure nastale u najsuvremenijim postupcima sekundarne metalurgije (slika 5.1.).



Slika 5.1. Razvrstavanje željeznih zgura prema mjestu nastanka (Sofilić, 2011)

### Zgura iz proizvodnje sirovog željeza

Pri proizvodnji sirovog željeza, osnovne sirovine uključuju rude željeza, talitelje i gorivo. Talitelji su ključni u ovom procesu jer značajno utječu na količinu i kvalitetu nastale zgure, pa će u nastavku biti objašnjeni njihovi osnovni funkcionalni principi.

Prema Glavaš i Dolić (2014), kisik se iz rude željeza uklanja u visokoj peći putem postupka redukcije. Ovaj proces rezultira prisutnošću nečistoća, koje imaju visoku temperaturu taljenja, što znači da ih nije moguće odvojiti od metala u krutom stanju. Talitelji kemijski reagiraju s tim nečistoćama, stvarajući spojeve s nižom temperaturom taljenja, što omogućava da nastala zgura, lakotaljiva zbog niže gustoće, ispliva na površinu tekućeg metala.

Osim toga, talitelji također reagiraju s nekim elementima iz sirovog željeza, poput sumpora, koji se zatim prevode u zguru. Ako ruda željeza sadrži kiselu jalovinu, što je uobičajeno, koristi se bazični talitelj, dok se za osnovnu jalovinu koristi kiseli talitelj. Glavni prirodni bazični talitelji su vapnenac ( $\text{CaCO}_3$ ) i dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ). Kvalitetan talitelj trebao bi imati što veći udio  $\text{CaO}$ , a što manji udio  $\text{SiO}_2$ . U

slučajevima kada je potrebno intenzivno uklanjanje sumpora iz sirovog željeza i manji volumen zgure, dolomit postaje manje pogodan talitelj.

Glinica ( $Al_2O_3$ ) je amfoterni talitelj, što znači da može djelovati kao kiselina ili baza ovisno o uvjetima. Iako se rijetko koristi u visokoj peći, često je prisutna u jalovini. U kiselim zgurama, glinica stvara alumosilikate i djeluje kao baza, dok u bazičnim zgurama formira kalcijeve aluminate, djelujući kao kiselina. Po važnosti, glinica je treća komponenta zgure iz visoke peći, odmah iza  $SiO_2$  i  $CaO$ .

$SiO_2$  se najčešće koristi kao kiseli talitelj u procesu proizvodnje željeza. Dodatak  $SiO_2$  može se iskoristiti za korekciju baziciteta zgure kada je taj udio previsok. Također, temperatura taljenja i viskoznost zgure mogu se smanjiti dodatkom  $CaF_2$ , što poboljšava svojstva zgure u smislu lakšeg upravljanja i obrade.

Proces nastajanja zgure usko je povezan s proizvodnjom sirovog željeza. Sirovo željezo se proizvodi u visokoj peći, a sirovine koje ulaze u peć uključuju rude željeza, gorivo (najčešće koks) i talitelje. Kombinacija tih komponenti dovodi do stvaranja zgure, koja pliva na površini taline i odvaja nečistoće od željeza, čime se čisti metal.

### **Zgure iz proizvodnje čelika**

Proces nastajanja zgure pri proizvodnji čelika od ključne je važnosti jer čelik predstavlja jedan od najvažnijih konstrukcijskih materijala i koristi se u gotovo svim industrijama, građevinarstvu, transportu, poljoprivredi i mnogim drugim sektorima. Godišnja proizvodnja čelika u svijetu premašuje 1,6 milijardi tona, pri čemu se stalno nastoji optimizirati proces kako bi bio jeftiniji, energetske učinkovitiji, te kako bi čelik bio što kvalitetniji.

Prema Barra i dr. (2001), proizvodnja tri tone nehrđajućeg čelika stvara približno jednu tonu čelične zgure (SS), što znači da industrija čelika generira značajnu količinu otpada. Svake godine se na globalnoj razini proizvede oko 50 milijuna tona otpadne čelične zgure, a samo u Europi godišnje nastaje oko 12 milijuna tona ove vrste otpada (Mutz i dr., 2001).

Čelik se najčešće proizvodi na dva osnovna načina: taljenjem čeličnog otpada u elektropečama ili oksidacijskim pročišćavanjem sirovog željeza u kisikovim konvertorima. Tijekom tih procesa nastaju različiti nusproizvodi, uključujući prašinu, zguru, istrošene vatrostalne materijale i ogorinu (Sofilić i dr., 2013). Čelična zgura je

nusproizvod koji nastaje bilo tijekom pretvorbe željeza u čelik u osnovnim kisikovim pećima (BOF) ili tijekom taljenja otpada u električnoj lučnoj peći (EAF).

Tijekom taljenja i rafinacije, zgura pluta na površini rastaljenog metala, štiteći ga od oksidacije ili redukcije uslijed utjecaja atmosfere, dok održava čistoću metala. Neželjene tvari iz čelika uklanjaju se formiranjem složenih metalnih i nemetalnih oksida i silikata. Mineralni sastav i svojstva zgure ovise o vrsti procesa proizvodnje čelika i tipu čelika koji se proizvodi.

Postoje dva osnovna tipa zgure: crna i bijela zgura.

Crna zgura nastaje prilikom proizvodnje ugljičnih čelika, dok se bijela zgura javlja u procesu proizvodnje legiranih nehrđajućih čelika, kao i prilikom sekundarne obrade ugljičnih čelika u lončanim pećima. Ove dvije vrste zgure razlikuju se u svom kemijskom sastavu, što utječe na njihovu primjenu u različitim industrijskim područjima, ovisno o njihovim fizikalnim, mehaničkim i kemijskim svojstvima.

Količina zgure koja nastaje u procesu proizvodnje čelika metodom kisikovih konvertora kreće se od 85 do 165 kg po toni proizvedenog čelika, dok u elektropečnom postupku nastale količine zgure variraju između 60 i 270 kg po toni elektročelika (BAT, 2013).

Zgura se može koristiti kao kvalitetan agregat u različitim industrijskim granama, uključujući cestogradnju, proizvodnju cementa i betona, te kao sinter materijali.

Prema BAT (2013), zgura iz visokih peći javlja se u manjoj količini po toni taline čelika u odnosu na elektropečnu zguru, s količinom od 10-80 kg po toni čelika. Zgura ima ključnu ulogu jer apsorbira produkte reakcija i sprječava reoksidaciju taline kisikom iz zraka, čime pomaže u stabilizaciji procesa i hladi talinu.

Čelična zgura može nastati tijekom tri glavna postupka u čeličanskim proizvodnim procesima, a svaki od tih postupaka bit će ukratko objašnjen u sljedećem tekstu.

- Proces u kisikovim konvertoru
- Proces u elektrolučnoj peći
- Zgura iz lonac peći

Sirovina za proizvodnju čelika u kisikovim konvertorima je tekuće željezo proizvedeno u visokoj peći, zajedno s čeličnim otpadom. Punjenje peći obično se sastoji od 80-90 % rastaljenog željeza i 10-20 % čeličnog otpada. Postupak započinje punjenjem peći čeličnim otpadom, nakon čega se izlijeva tekuće željezo, a zatim se uvodi čist kisik koji djeluje tijekom 20-25 minuta. Tijekom ovog ciklusa kisikovog upuhivanja dolazi do

oksidacijskih reakcija, pri čemu se oksidiraju nečistoće u tekućem željezu. Ugljik u čeliku oksidira u ugljični monoksid (CO), čime se smanjuje sadržaj ugljika u čeliku. Također, dodaju se drugi materijali, poput CaO ili dolomita ( $MgCa(CO_3)_2$ ), kako bi se uklonili ili smanjili neželjeni elementi, pri čemu nastaje zgura. Uz ugljik, oksidiraju i silicij, mangan i fosfor, dok se sadržaj sumpora smanjuje uglavnom tijekom predtretmana sirovog željeza.

Cilj oksidacijskog procesa je smanjiti sadržaj ugljika sa 4-5 % na 0,1-0,4 %, prilagoditi sadržaj drugih elemenata i ukloniti nečistoće (Vlcek et al., 2013). Nakon što je postignut zadovoljavajući kemijski sastav, čelik se odvaja u lonac izlivanjem iz konvertora s jedne strane, dok se zgura odvaja na suprotnu stranu.

Zgura koja nastaje u procesu proizvodnje čelika u kisikovim konvertorima obično sadrži sljedeće kemijske komponente: 40-60 % mas. CaO, 4-30 % mas. FeO, 12-26 % mas.  $SiO_2$ , 2-10 % mas. MgO, 3-8 % mas. MnO, 1-3 % mas.  $P_2O_5$ , 1-2 % mas.  $Al_2O_3$  i 0,1-0,3 % mas. (Gojić, 2005; Sofilić i dr., 2015).

Osnovna sirovina za proizvodnju čelika u elektrolučnoj peći je čelični otpad, uz dodatak male količine sirovog željeza. Ferolegure se također koriste, u većim ili manjim količinama, kako bi se prilagodile koncentracije neželjenih metala u konačnom čeliku (BAT, 2013).

U elektrolučnoj peći vrši se taljenje sirovina, dok se u lonac peći obično obavlja dorada čelika, osobito za proizvodnju visokolegiranih i specijalnih čelika (Gojić, 2005). Peć se puni čeličnim otpadom, uz dodatak vapna koje omogućava formiranje zgure tijekom taljenja uložka. Također, u elektrolučnu peć se dodaju nositelji ugljika, poput metalurškog koksa, antracita ili dijelova grafitnih elektroda. Čelični otpad koji se koristi kao uložak u peći obično se skladišti na otvorenom prostoru, a pomoću magneta se puni u košare koje se zatim prevoze do peći.

Kako bi se minimizirao unos neželjenih nemetalnih elemenata u čelik, čelični otpad mora udovoljavati međunarodnim specifikacijama. Tijekom skladištenja čeličnog otpada, moguće su emisije u tlo, uključujući teške metale i ugljikovodike.

Taljenje sirovine u elektrolučnoj peći provodi se djelovanjem električnog luka, koji nastaje između grafitne elektrode i čeličnog otpada (Yildirim i dr., 2011). U početnoj fazi, obično se dodaje 50-60 % čeličnog otpada u prvoj šarži, nakon čega se peć zatvori

i spuste elektrode do razine punjenja. Na udaljenosti od 300 mm iznad punjenja stvara se električni luk. Kisik ili mješavina plinova upuhuje se u elektrolučnu peć kako bi se dodatno ubrzalo taljenje sirovine.

Dodavanje kisika omogućava oksidaciju elemenata prisutnih u čeliku, poput aluminija, silicija, mangana, fosfora, ugljika i željeza, a nastali oksidi se spajaju u zguru. Injektiranjem ugljika stvara se ugljik (II)-oksid (CO), koji doprinosi stvaranju pjenušave zgure. Pjenušava zgura ima važnu funkciju kao zaštitni sloj, jer povećava iskorištenje električne energije tijekom proizvodnje čelika i štiti unutrašnje dijelove peći od jakog zračenja (Sofilić i dr., 2013).

Nakon postizanja željenog sastava, elektrolučna peć se nagnje i zgura se izbacuje, dok se talina čelika prebacuje u lonac peći radi daljnje obrade. Zgura nastala u elektrolučnoj peći odvodi se u vanjske bazene za hlađenje, gdje se voda koristi za hlađenje. Zgura se zatim obrađuje drobljenjem, usitnjavanjem i sijanjem. Tijekom drobljenja nastaju emisije prašine, koje se uklanjaju vlaženjem zgure.

Pri hlađenju zgure mogu se dodavati silicijev i aluminijev oksid kako bi se poboljšala kvaliteta zgure i njezina dimenzijska svojstva. Ovaj postupak omogućava prilagodbu zgure za daljnje industrijske primjene.

Zgura koja nastaje u lonac peći generira se u manjoj količini nego zgura iz elektropeći i kisikovog konvertora, s količinom koja se kreće od 10 do 80 kg po toni taline čelika. Nakon što se čelična talina iz elektropeći prebaci u lonac peći, nastavljaju se kemijske reakcije koje uključuju dezoksidaciju, odsumporavanje, odfosforavanje, legiranje i druge. Zgura igra ključnu ulogu u ovim procesima jer apsorbira produkte reakcija, sprječava reoksidaciju taline kisikom iz zraka i pomaže u održavanju stabilnosti temperature taline.

Zgura iz lonac peći obično se sastoji od smjese kalcijevog oksida (CaO), silicijevog dioksida (SiO<sub>2</sub>), aluminijevog oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i magnezijevog oksida (MgO), pri čemu su koncentracije ovih oksida u različitim granicama. U usporedbi s elektro-kosom zgura, zgura iz lonac peći sadrži manju količinu željeznog oksida (FeO), koji je obično manji od 10 %, dok je koncentracija Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i CaO veća.

Brzim hlađenjem, zgura iz lonac peći postaje potpuno amorfná, osim ako se ne formiraju kristali magnezijevog oksida (MgO). S druge strane, zgura iz elektropeći i kisikovog konvertora razvija složene kristalne strukture uslijed sporijeg hlađenja.

Zgure iz kisikovih konvertora i elektrolučnih peći (ELP) obično sadrže visok udio željeznih oksida, pri čemu FeO (vustit) čini glavnu mineralnu fazu. S druge strane, zgura iz lonac peći ima manji udio FeO, a kao glavnu fazu u ovoj vrsti zgure možemo promatrati  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ .

U prisutnosti vode, slobodni kalcijev oksid (CaO) hidratizira i tvori kalcijev hidroksid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Ovaj hidroksid ima manju gustoću od oksida, što uzrokuje povećanje volumena zbog hidratacije zgure. Istraživanja su pokazala da se kompaktni CaO gotovo potpuno hidratizira u nekoliko dana nakon što dođe u kontakt s vodom, uz povećanje volumena koje može doseći i do 100%. To znači da će većina slobodnog CaO unutar zgure iz čeličane hidratizirati brzo, u nekoliko dana, ako se kontaktira s vodom.

Za razliku od CaO, magnezijev oksid (MgO) hidratizira mnogo sporije, te uzrokuje značajne promjene u volumenu zgure tek nakon nekoliko mjeseci ili čak godina. Zgure koje nastaju modernim tehnologijama proizvodnje čelika obično imaju nizak udio MgO, ali ako se u proizvodnji koristi dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), udio slobodnog MgO se povećava, čime se povećava i mogućnost ekspanzije volumena uslijed hidratacije MgO. Faza  $\text{C}_2\text{S}$ , koja je prisutna u zguri iz lonac peći, također je podložna ekspanziji volumena.  $\text{C}_2\text{S}$  može postojati u različitim polimorfnim strukturama:  $\alpha$ ,  $\beta$ , i  $\gamma$ .  $\alpha$ - $\text{C}_2\text{S}$  je stabilan na visokim temperaturama ( $>630^\circ\text{C}$ ), dok se pri temperaturama nižim od  $500^\circ\text{C}$   $\beta$ - $\text{C}_2\text{S}$  počinje transformirati u  $\gamma$ - $\text{C}_2\text{S}$ . Ova transformacija može uzrokovati ekspanziju volumena i do 10%. Ako hlađenje zgure traje dugo, može doći do pucanja struktura, što rezultira stvaranjem velike količine prašine.

Ove faze će biti detaljnije objašnjene u poglavlju 5.3.

### 5.3. KEMIJSKI SASTAV ZGURE

Obzirom na dvije vrste zgure prema nastanku, čeličnu i željeznu, njihovi kemijski sastavi se razlikuju pa će u daljnjem tekstu biti prikazani kemijski sastavi odvojeno.

#### Kemijski sastav željezne zgure

Tekuća zgura u visokoj peći počinje se formirati pri temperaturama između 950 i 1100 °C i naziva se primarnom zgrom (Koželj, 1984). S obzirom na to da sirovo željezo nastaje tek na temperaturama većim od 1350 °C, primarna zgura se razlikuje od konačne zgure koja se formira u gnijezdu peći pri najvišim temperaturama. Primarna zgura sadrži SiO<sub>2</sub> iz rude, CaO iz sintera, te visok udio FeO i MnO. Po sastavu se značajno razlikuje od konačne zgure koja nastaje na višim temperaturama.

Temperatura pri kojoj se formira primarna zgura i temperaturni interval u kojem zasip prelazi iz krutog u tekuće stanje imaju značajan utjecaj na rad visoke peći. Sniženje temperature formiranja primarne zgure smanjuje mogućnost i skraćuje vrijeme dostupno za indirektnu redukciju oksida željeza. U tom slučaju, velika količina nereduciranih oksida željeza prelazi u primarnu zguru, koja, nedovoljno zagrijana, s visokim udjelom FeO prelazi u gnijezdo peći. Ovo povećava udio direktne redukcije.

Povećanje temperaturnog intervala u kojem zasip prelazi iz krutog u tekuće stanje može pogoršati propusnost za plinove, što utječe na proizvodnost i neravnomjernost raspodjele plinskog toka kroz peć.

Kemijski sastav zasipa, bazičnost, stupanj oksidacije i oblik oksida željeza ključni su faktori koji utječu na temperaturu početka formiranja primarne zgure i temperaturni interval u kojem zasip prelazi iz krutog u tekuće stanje. Najpovoljniji uvjeti za rad visoke peći postižu se kada se zasip sastoji od Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, koji se lako reducira, i teško taljive jalovine s višim udjelom CaO. U ovom slučaju, većina oksida željeza se reducira u metalno željezo prije početka formiranja primarne zgure, a jalovina i metalno željezo pri višim temperaturama i užem temperaturnom intervalu prelaze iz krutog u tekuće stanje.

Najnepovoljniji uvjeti nastaju kada se preradom prirodnog magnetita Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, koji je teško reducibilan, dobije zgura s visokim udjelom FeO i lako taljivom kiselim



jalovinom. Ovi uvjeti povećavaju izazove u procesu proizvodnje, jer usporavaju redukciju i stvaranje primarne zgure.

Nakon formiranja primarne zgure, ona se kreće prema gnijezdu visoke peći gdje se zagrijava visokopećnim plinovima i prelijeva preko vrućih komada koksa, talitelja i nerastaljenih komada rude. Ovaj proces dovodi do promjene kemijskog sastava zgure.

Kontakt s koksom omogućava direktnu redukciju FeO i MnO iz zgure, čime se smanjuje njihov udio u troski. S obzirom na otapanje bazičnih oksida, prvenstveno CaO, bazicitet zgure se povećava, čime se povećava njezina sposobnost vezanja sumpora iz plina i sirovog željeza. Također, SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> iz pepela koksa prelaze u zguru.

Temperatura tako formirane nove zgure, nazvane međuzgurom, kreće se od 1480 do 1550 °C. U ovom procesu, sav FeO iz zgure je praktički izreduciran, a sav CaO iz zasipa otopljen u zguri (Muhamedagić, 1984).

Konačna zgura formira se u gnijezdu visoke peći na temperaturama između 1500 i 1550°C, nakon što su talitelji, jalovina iz rude i pepeo iz koksa potpuno rastaljeni (Koželj, 1984). U ovoj fazi dolazi do završnog odsumporavanja sirovog željeza, kao i redukcije silicija, mangana, kroma i fosfora iz zgure. Sastav konačne zgure ovisi o nekoliko faktora, uključujući kemijski sastav rudne jalovine, količinu dodanog vapnenca u mješavinu za sinteriranje ili zasip, kao i količinu drugih talitelja. Na primjer, dolomit se koristi za podešavanje udjela MgO u troski, dok boksit korektira udio Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Također, količina i sastav pepela iz koksa, kao i udio sumpora u koksu, igraju značajnu ulogu u oblikovanju konačne zgure. Najčešći sastav zgure je:

- Kalcijev oksid (CaO) ili vapno: 30-50% - dodaje se tijekom procesa taljenja kako bi se vezao za nečistoće i formirao trosku.
- Silicij dioksid (SiO<sub>2</sub>): 10-40% - ključna komponenta koja se nalazi u sirovinama i djeluje kao kiseli oksid u zguri.
- Željezni oksidi (FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): 10-30% - dolaze iz željeza koje nije u potpunosti reducirano tijekom procesa taljenja.
- Magnezijev oksid (MgO): 5-15% - dolazi iz dolomita ili drugih magnezijevih spojeva dodanih tijekom taljenja.
- Aluminijev oksid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): 1-10% - prisutan zbog aluminijskih spojeva u sirovinama ili dodanih materijala.

- Manganov oksid ( $\text{MnO}$ ): 1-5% - dolazi iz mangana koji je prisutan u sirovinama ili legirnim elementima.
- Fosforni oksid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ): 0.5-3% - prisutan u manjoj količini i dolazi iz fosfora u sirovinama.
- Sumporni oksid ( $\text{SO}_3$ ): 0.1-2% - dolazi iz sumpora u sirovinama ili gorivu korištenom u procesu.
- Titanov oksid ( $\text{TiO}_2$ ): 0.5-1% - dolazi iz titana prisutnog u nekim vrstama ruda ili legurama.
- Kalijev oksid ( $\text{K}_2\text{O}$ ) i Natrijev oksid ( $\text{Na}_2\text{O}$ ): <1% - alkalni oksidi prisutni su u tragovima i dolaze iz onečišćenja ili dodataka.

Ovaj kemijski sastav može varirati ovisno o tipu peći (visoka peć, BOF, EAF), korištenim sirovinama (ruda, otpadni materijali) i specifičnim parametrima procesa. Razumijevanje kemijskog sastava važno je za određivanje mogućih primjena zgure, poput upotrebe u građevinarstvu, cestogradnji, proizvodnji cementa i drugih industrijskih primjena.

Za rad visoke peći, osim kemijskog sastava i temperature taljenja, viskoznost zgure igra ključnu ulogu. Kemijski sastav i temperatura zgure izravno utječu na njenu viskoznost, koja mora biti optimalna kako bi se omogućio nesmetan rad peći. U slučaju guste i viskozne zgure, rad visoke peći postaje otežan jer se zgura može zalijepiti za vatrostalni obzid, što otežava ispuštanje zgure i smanjuje protok plinova. Također, takva zgura može smanjiti učinkovitost odsumporavanja. Za optimalno odsumporavanje, potrebne su bazične zgure (s  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  omjerom od 1,2 do 1,4) s niskom viskoznošću. Za postizanje takve viskoznosti, potrebne su više temperature zgure.

Pored osnovnih sastojaka  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , na viskoznost zgure značajno utječu i ostale komponente.  $\text{MgO}$  može smanjiti viskoznost zgure, osobito pri bazicitetu  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,6$  do 1,07 i udjelu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  od 10 do 12 %. Međutim, ako je bazicitet veći ili manji, viskoznost i temperatura taljenja zgure će se povećati.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  do 10 % smanjuje viskoznost i temperaturu taljenja zgure, a ovaj učinak je jači kod bazičnih zgura. Najnižu viskoznost imaju zgure s bazicitetom  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1$  koje sadrže 10 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ako udio  $\text{Al}_2\text{O}_3$  premaši 10 %, viskoznost i temperatura taljenja zgure rastu. Sumpor u zguri obično je prisutan u obliku spoja  $\text{CaS}$ . Niski udjeli  $\text{CaS}$  (3-4 %) u bazičnoj zguri,

uz odgovarajući udjel MgO (5-10 %), povoljno utječu na viskoznost. Međutim, viši udjeli CaS uzrokuju povećanje viskoznosti i smanjenje tečljivosti zgure. BaO također povećava viskoznost bazičnih zgura, a njegov učinak je izraženiji kada udio BaO prelazi 3 %. FeO smanjuje viskoznost primarnih zgura i međuzgura s bazicitetom CaO/SiO<sub>2</sub> od 0,6 do 1,2, dok MnO u udjelima do 20 % smanjuje viskoznost zgure.

Željezna zgura, koja je nusproizvod metalurških procesa, sastoji se od različitih minerala, čiji se sastav može značajno razlikovati ovisno o procesu proizvodnje, vrsti peći, korištenim sirovinama i specifičnim uvjetima tijekom taljenja. Najčešći minerali prisutni u željeznoj zguri prikazani su u tablici 5.1.

Naziv minerala	Formula	Opis
Željezni oksidi - Vustit	FeO	Nastaje tijekom oksidacije željeza Nalazi u visokim koncentracijama.
Silicij dioksid - Belit	2CaO·SiO <sub>2</sub> ili C <sub>2</sub> S	Prisutan u velikim količinama u željeznoj zguri Polimorfnog oblika - β-C <sub>2</sub> S
Silicij trioksid - Alit	3CaO·SiO <sub>2</sub> ili C <sub>3</sub> S	Ključni sastojak cementa Prisutan u manjim količinama u zguri
Kalcijev aluminat	CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ili CA	Može nastati reakcijom kalcija i aluminija Ima različite polimorfne oblike
Kalcijev ferit	CaO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ili CF	Uobičajeni mineral u zguri Formira se reakcijom kalcija i željeznog oksida
Magnezijev silikat - Forsterit	MgO·SiO <sub>2</sub>	Često se nalazi u zguri zbog prisutnosti magnezija u sirovinama
Spinel	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Formira se kombinacijom magnezija i aluminija Prisutan je u manjim količinama u zguri
Željezni silikat - Fajalit	2FeO·SiO <sub>2</sub>	Formira tijekom oksidacije i taljenja željeza i silicija Često se nalazi u zgurama visoke peći
Kristobalit i Tridimit	SiO <sub>2</sub>	Polimorfi silicijevog dioksida Nalaze se u zguri zbog visokih temperatura tijekom proizvodnog procesa
Vapno	CaO	Slobodno vapno je često prisutno u zguri zbog dodatka vapna tijekom procesa taljenja za uklanjanje nečistoća

Tablica 5.1. Minerali prisutni u željeznoj zguri (Gojić, 2005.)

### Kemijski sastav čelične zgure

Prema Yildirim i Prezzi (2011) većina čeličnih zguri sastoji se prvenstveno od komponenta CaO, MgO, SiO<sub>2</sub> i FeO. U praksi, proizvodnje čelika s niskim sadržajem fosfora, ukupna koncentracija ovih oksida u tekućim zgurama je u rasponu od 88-92%. Stoga se čelična zgura može jednostavno prikazati kao četverokomponentni sustav CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-FeO. Međutim, udjeli ovih oksida i koncentracija drugih manjih komponenata su vrlo promjenjivi i mijenjaju se od serije do serije čak i u jednoj tvornici, ovisno o sirovinama, vrsti proizvedenog čelika, uvjetima u peći itd.

Tablica 5.2. prikazuje raspon kemijskog sastava za različite vrste čeličnih zguri. Čelične zgure iz EAF-a za proizvodnju ugljičnih čelika vrlo su slične onima iz BOF-a. Međutim, zgure iz EAF-a za proizvodnju legiranih ili nehrđajućih čelika su prilično različite. Imaju niži sadržaj FeO-a i vrlo visok sadržaj kroma, što dovodi do klasifikacije zgure kao opasnog otpada. Kemijski sastav zgure iz lonca značajno se razlikuje od one iz čelične peći, jer zgura iz lonca ima nizak sadržaj FeO-a. Neke operacije proizvodnje čelika koriste aluminij za daljnje rafiniranje. U tim slučajevima, zgura iz lonca ima visok sadržaj Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. U drugim operacijama koriste CaF<sub>2</sub> za daljnje rafiniranje, tada zgura iz lonca uglavnom sadrži CaO i SiO<sub>2</sub>.

Sastav oksida (%)				
Komponenta	Kisikova visoka peć	Elektrolučna peć (čelik)	Elektrolučna peć (legura)	Lonac peć
SiO <sub>2</sub>	8-20	9-20	24-32	2-35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-6	2-9	3,0-7,5	5-35
FeO	10-35	15-30	1-6	0,1-15
CaO	30-55	35-60	39-45	30-60
MgO	5-15	5-15	8-15	1-10
MnO	2-8	3-8	0,4-2	0-5
TiO <sub>2</sub>	0,4-2	-	-	-
S	0,05-0,15	0,08-0,2	0,1-0,3	0,1-1
P	0,2-2	0,01-0,25	0,01-0,07	0,1-0,4
Cr	0,1-0,5	0,1-1	0,1-20	0-0,5

Tablica 5.2. Raspon kemijskog sastava čelične zgure (Yildirim i Prezzi, 2011)

Tijekom proizvodnje čelika, često se koristi omjer  $\text{CaO}(\%) / \text{SiO}_2(\%)$  za karakterizaciju bazičnosti čelične zgure s niskim sadržajem fosfora.

Proces hlađenja zgure direktno utječe na kemijski sastav čelične zgure. Postoji nekoliko metoda za hlađenje rastaljene čelične zgure a to su prirodno hlađenje zrakom, prskanje vodom, gašenje vodom, gašenje zrakom i hlađenje u plitkim kutijama.

Prirodno hlađena čelična zgura hladi se prirodno na zraku nakon izlivanja u jamu ili na tlo. Sastoji se uglavnom od velikih grumenata i nešto praha. Prah nastaje pretvorbom  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  u  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  na oko  $675^\circ\text{C}$ . Budući da  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  i  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  imaju različitu kristalnu strukturu i gustoću, pretvorba  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  u  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  praćena je povećanjem volumena od gotovo 10% što rezultira razbijanjem kristala u prašinu (Lea, 1974).

U procesu hlađenja prskanjem vodom, rastaljena čelična zgura izliva se u jamu i hladi na zraku. Voda se prska na površinu čelične zgure nakon što se rastaljena zgura stvrdne kako bi se stvrdnuta čelična zgura sama razbila zbog temperaturnih razlika, što olakšava rukovanje zgurom i oporavak metala. Također može spriječiti pretvorbu  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  u  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  ako se prskanje vodom provodi pri višoj temperaturi.

Gašenje vodom se široko koristi za rastaljenu zguru visoke peći, ali rijetko za čeličnu zguru budući da rastaljena čelična zgura ima veću viskoznost od rastaljene zgure visoke peći. Voda se lako može zarobiti u čeličnoj troski i uzrokovati eksploziju. Nekoliko čeličana koristi proces gašenja vodom. Prema Shi (2000) vodom gašena čelična zgura sastoji se od malih čestica veličine od 3 do 5 mm.

Proces gašenja zrakom. U osnovi, rastaljena čelična zgura u loncu za zguru izliva se u otvor ispod kojeg se nalazi mlaznica za zrak. Komprimirani zrak se upuhuje na tok zgure s tlakom između 0,35 i 0,6 MPa. Komprimirani zrak treba uključiti prije izlivanja rastaljene zgure. Zgura se raznosi u male čestice veličine od 3 do 5 mm i pada u bazen ispunjen vodom. Ovaj proces je vrlo jednostavan i nema sekundarnog onečišćenja okoliša. Međutim, većina metala se oksidira tijekom procesa gašenja zrakom. Čelična zgura gašena zrakom mnogo je teža za mljevenje nego čelična zgura hlađena zrakom ili prskanjem vodom.

Hlađenje u plitkim kutijama razvijeno je u Japanu. Detaljan opis procesa može se pronaći u objavljenom radu Montgomeryja i Wanga (1991). Debljina od oko 100 mm

rastaljene čelične zgure izlijeva se u posudu i hladi 4 minute. Zatim se voda prska na zguru oko 20 minuta, snižavajući temperaturu čelične zgure na oko 500°C. Nakon početnog prskanja vodom, zgura se transportira do stanice za prskanje radi daljnjeg prskanja vodom tijekom 4 minute kako bi se temperatura smanjila na oko 200°C. Na kraju, zgura se stavlja u bazen s vodom za daljnje hlađenje i magnetsko razvrstavanje. Čelična zgura hlađena na ovaj način ima veličinu čestica između 30 i 50 mm i nizak sadržaj slobodnog vapna (2-4%). Budući da se voda prska na relativno tanki sloj čelične zgure, izbjegava se rizik od eksplozije zbog stvaranja i zarobljavanja pare.

Nekoliko istraživača proučavalo je mineraloški sastav čeličnih zguri i došli do spoznaje pomoću postupka rendgenska difrakcijska uzoraka čelične zgure koji su pokazali složenu strukturu s mnogo preklapajućih vrhova koji odražavaju kristalne faze prisutne u čeličnoj troski. Prema Shi (2002), sve kristalne faze su uglavnom posljedica kemijskog sastava čelične zgure i sporog hlađenja primijenjenog tijekom obrade. Sirovine (punjenje) u pećima variraju od jedne do druge čeličane, tako da se očekuju varijacije u kemijskim sastojcima čeličnih zguri proizvedenih u različitim čeličanama. Različite mineralne faze identificirane su i zabilježene u literaturi za EAF, BOF i lončane zgure. Uobičajene mineralne faze čelične zgure prikazane su u tablici 5.3.:

Naziv minerala	Kemijska formula
Mervinit	$3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$
Olivin	$2\text{MgO}\cdot 2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$
Ferit - C <sub>4</sub> AF	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{FeO}_3$
Dikalcij ferit - C <sub>2</sub> F	$2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$
Slobodno vapno	CaO
Trikalcij siliakt- C <sub>3</sub> S	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Vustit	FeO
Dikalcij silikat β-C <sub>2</sub> S	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Dikalcij silikat α-C <sub>2</sub> S	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$

Tablica 5.3. Minerali prisutni u čeličnoj zguri (Shi, 2002.)

## 5.4. GEOTEHNIČKE KARAKTERISTIKE ZGURE

Fizikalna i mehanička svojstva zgure zadovoljavaju zahtjeve visokokvalitetnog materijala. U usporedbi s prirodnim agregatima, zgura pruža idealnu trajnost, propusnost, stabilnost te otpornost na abraziju, pucanje i trajne deformacije. Fizikalna i mehanička svojstva zgure prema Aziz i dr. (2014) prikazana su u daljnjem tekstu.

- **Trajnost:** Čelična zgura pokazuje iznimnu trajnost u različitim uvjetima.
- **Propusnost:** Ima visoku propusnost što je čini pogodnom za različite građevinske primjene
- **Stabilnost:** Stabilnost čelične zgure osigurava dugotrajnost konstrukcija.
- **Otpornost na abraziju:** Otpornost na abraziju čini je idealnom za površine koje su podložne velikom habanju.
- **Otpornost na pucanje i deformacije:** Sposobnost da se odupre pucanju i trajnim deformacijama dodaje vrijednost ovom materijalu u građevinarstvu.
- **Sposobnost čelične zgure da se kemijski veže s drugim vezivima**

Čelične zgure su prema (Develioglu i Pulat, 2018) hidrofobne (imaju snažan afinitet s bitumenskim vezivom), bazične ili alkalne prirode s pH vrijednošću oko 12, dok je bitumensko vezivo obično kiselo, s prirodnim kemijskim afinitetom prema čeličnoj zguri i pH vrijednošću manjom od 7. Ovo svojstvo čelične zgure osigurava dobru adheziju i pomaže u otpornosti na ljuštenje. Jednostavan test može se provesti stavljanjem uzorka u kipuću vodu i procjenom stupnja ljuštenja.

### **Specifična težina**

Čelična zgura sadrži dovoljne količine željeznog oksida, stoga ima veću specifičnu težinu u usporedbi s prirodnim agregatima. Specifična težina čelične zgure kreće se u rasponu od 3 do 4. Čelična zgura je oko 20% teža od minerala vapnenca ili granita.

### **Distribucija zrna po veličini (frakcija)**

Distribucija veličine zrna važan je faktor koji značajno utječe na mehanička svojstva materijala. Teško je razbiti čeličnu zguru na čestice različitih veličina tijekom njezine proizvodnje u čeličani. Tijekom procesa hlađenja, zgura se raspada na različite veličine

čestica, od krupnih komada do veličine mulja. Nadalje, može se obrađivati kako bi se dobila odgovarajuća granulacija čelične zgure u postrojenjima za drobljenje. Grubo-gradirane čestice mogu se naći u rasponu od oko 64–200 mm, a srednje veličine čestice dosežu do 64 mm, dok se fino-gradirana čelična zgura može usporediti s dobro gradiranim pijeskom koji se sastoji od čestica šljunka do veličine mulja, zadržanih na situ od 4,75 mm i prolazeći kroz 0,075 mm. Postotak čestica veličine mulja ostaje u rasponu od 10–15%.

### **Svojstvo zbijanja čelične zgure pri optimalnoj vlažnosti**

Ograničena istraživanja su provedena na zbijenosti čelične zgure. Rezultati su uglavnom pokazali veće vrijednosti maksimalne suhe jedinične težine u usporedbi s prirodnim agregatima. Rohde i dr. (2003) su proučavali karakteristike zbijanja EAF čelične zgure različitih razreda metodom standardnog Proctorovog testa. Optimalni sadržaj vlage i maksimalna suha težina EAF čelične zgure bili su u rasponu od 3–6% i 23–26 kN/m<sup>3</sup>. Andreas i dr. (2005) su radili na kompaktilnosti mješavine ladlaste i 35% EAF čelične zgure i dobili zadovoljavajuće rezultate standardnih Proctorovih parametara zbijanja. Sadržaj vlage bio je 13% a maksimalna suha jedinica težine 22 kN/m<sup>3</sup>.

### **Termalna svojstva**

Primijećeno je da čelična zgura ima potencijal zadržavanja topline duže vremensko razdoblje u usporedbi s prirodnim agregatima. Svojstvo zadržavanja topline agregata čelične zgure (SSA) je prednost, posebno pri pripremi vrućeg asfalt betona kako bi se agregati pravilno obložili, osobito tijekom popravaka površina kolnika u hladnim vremenskim uvjetima.

### **Ispiranje čelične zgure**

Fällman (2000) i Proctor i dr. (2000) proučavali su različite uzorke zgure prikupljene iz 58 aktivnih čeličana u Sjevernoj Americi, što čini više od 47% proizvodnje čelika. Sadržaj teških metala u čeličnoj zguri također je testiran u skladu s procedurom ispitivanja karakteristika toksičnosti ispiranja. Rezultati su potvrdili da se teški metali u čeličnoj zguri ne mogu lako odvojiti čak ni u kiselim uvjetima. Zaključeno je da kontaminanti čelične zgure na ispitanjoj razini nemaju negativan utjecaj na preporučene



standarde pitke vode iz podzemnih voda. Iako se BOF zgura može koristiti kao sredstvo za mehaničku stabilizaciju u cementom stabiliziranim tlima, otpuštanje kontaminanata može se smanjiti kemijskim reakcijama u mediju. Alkalnost ispiranja čelične zgre također je jedna od važnih karakteristika. Povećanje pH vrijednosti čelične zgre odložene na odlagalištima ima utjecaj na pH podzemnih voda, a uzrok je ispiranje alkalnih tvari iz čelične zgre. Stoga je za očuvanje ekosustava potrebno pažljivo analizirati područja na kojima se odlaže čelična zgura.

Granulirana zgura visoke peći ima staklastu strukturu i pokazuje cementna svojstva. Trenutno se mljevena granulirana zgura iz visokih peći široko koristi kao zamjena za cement diljem svijeta (Malhotra, 1987). Beton koji sadrži mljevenu zgru visoke peći obično ima dulje vrijeme vezivanja, nižu ranu čvrstoću, ali pokazuje veću kasniju čvrstoću, gušću mikrostrukturu i bolju izdržljivost u usporedbi s betonom od portland cementa. Potencijalna cementna svojstva granulirane zgre visoke peći mogu se učinkovito aktivirati korištenjem alkalnih aktivatora (Pudon, 1940; Gluhovsky i dr., 1980; Shi, 1996). Istraživanja su potvrdila da cementi od zgre visoke peći aktivirani alkalijama bez klinkera mogu pokazati veću čvrstoću, gušću strukturu i bolju izdržljivost od portland cementa (Shi i Stegemann, 2000). Iako su mnoga istraživanja potvrdila da čelična zgura iz peći ima cementna svojstva i može se smatrati slabim cementnim klinkerom (Emery i Tang, 1973), čelična zgura se koristi kao agregat za asfaltni beton u većini zemalja. Na primjer, proizvodnja čelične zgre u SAD-u iznosi oko 5,1 milijun tona godišnje, ali se čelična zgura ne koristi kao cementni sastojak, osim u nekim slučajevima kada se čelična zgura koristi kao sirovina za proizvodnju cementa (Young, R. D., 1994) što je poznato desetljećima.

Sva navedena svojstva čine čeličnu zgru vrijednim materijalom za različite građevinske primjene, posebice u kombinaciji s bitumenskim vezivom, gdje njezina hidrofobna priroda i visoka specifična težina dodatno poboljšavaju performanse i trajnost konačnog proizvoda.

## 5.5. PRIMJENA ZGURE U GEOTEHNICI

Čelična zgura ima povoljne karakteristike poput većeg kuta trenja i svojstava samo-cementacije. Poznato je da određene mješavine cementa, vapna, letećeg pepela i čelične zgure imaju visoku tlačnu čvrstoću kada se pravilno očvrstnu.

De Bock i Bergh (2004) su pokazali rezultate studije u Belgiji gdje je korišteno 4% cementa (po težini), 18% prirodnog pijeska i 78% EAF zgure (u rasponu veličine od 0–20 mm) u obliku hidraulične vezane mješavine u temeljnom sloju industrijskog skladišnog područja. Mymrin i dr. (2005) su eksperimentirali s mješavinom EAF zgure (0–5 mm veličine) i gotovo 5% MgO u kombinaciji s cementom stabiliziranim tlima. Mehanička svojstva EAF zgure i učinak vezivanja reakcijom s vodom značajno su poboljšali čvrstoću stabiliziranog tla. Zamjena cementa čeličnom zgurama u stabilizaciji tla može smanjiti ukupne troškove projekata.

Ova svojstva čine čeličnu zguru atraktivnom opcijom za različite geotehničke primjene, uključujući stabilizaciju tla, temeljne slojeve, i druge građevinske aplikacije gdje su potrebne visoke tlačne čvrstoće i otpornost na deformacije. Njene karakteristike kao što su veći kut trenja i samo-cementacija čine je pogodnom za upotrebu u osnovnim i podložnim slojevima prometnica i drugih građevinskih objekata.

Uključivanje čelične zgure u građevinske projekte također ima ekonomske prednosti, s obzirom na smanjenje troškova materijala i poboljšanje dugoročne održivosti struktura zahvaljujući poboljšanoj čvrstoći i trajnosti materijala. Primjenjuju se u raznim područjima građevinarstva kao i u drugim industrijama što je prikazano u tablici 5.4. U građevinskom sektoru, feritne zgure konkuriraju prirodnim agregatima (drobljeni kamen, pijesak i šljunak), ali su daleko manje dostupne od prirodnih materijala. Kao cementni dodatak u miješanim cementima i betonu, GGBFS (mljevena granulirana zgura iz visokih peći) uglavnom konkurira pepelu iz termoelektrana, metakaolinu i vulkanskim pepelima pucolanima. U tom smislu, GGBFS smanjuje količinu portland cementa po toni betona, omogućujući tako proizvodnju više betona po toni portland cementa.

Poglavlje 5  
Zgura kao vezivo

Primjena zgure	Područje primjene				
	Graditeljstvo	Uređenje odlagališta otpada	Održavanje riječnih korita i morske obale	Ostala industrija	Poljoprivreda
Agregat u cestogradnji	X				
Agregat u industriji cementa i betona				X	
Sipina (sprječavanje poledice u zimskim uvjetima)	X				
Uređenje morskih luka i obala	X		X		
Uređenje nasipa i obala rijeka	X		X		
Spriječavanje erozije	X		X		
Nosivi sloj od znatog materijala	X				
Nasipavanje cesta i puteva	X				
Željeznički nasipi	X				
Neutraliziranje otpadnih voda rudarske industrije	X		X		
Agrotehničke mjere					X
Granulirana ispuna (posteljice) kod polaganja cjevovoda, nasipavanje parkiralište i sl.	X				
U čeličanama kao taljitelj			X	X	
Pokrivanje otpada na odlagalištima		X			
Ispuna za drenaže	X				
Mineralna vuna (izolacijski materijal)				X	
Punilo pri proizvodnji boja i lakova				X	
Nasipni materijali (krajobrazna arhitektura)	X				
Pokrivalo krovova				X	

Tablica 5.4. Primjena elektropečnih i visokopećnih zgura (Proctor i dr., 2000)

## 5.6. KARAKTERISTIKE ZGURE UPOTREBLJAVANE U LABORATORIJSKIM ISPITIVANJIMA

Zgura iz visoke peći (BFS) je otpadni materijal koji se ponovo koristi u raznim građevinskim projektima. Kao rastaljena tekućina, zgura je složena otopina oksida i silikata koja se stvrdnjava tijekom hlađenja. U industriji, zgura se obično granulira naglim hlađenjem, a zatim se melje kako bi postala pogodna za daljnju upotrebu.

Za potrebe ovog istraživanja, upotrijebljen je uzorak zgure koji je potekao iz visoke peći tvornice čelika ILVA u Tarantu, Italija, a dobavljen je od tvrtke Holcim d.o.o. iz Hrvatske. Uzorak je dopremljen u metalnoj posudi u zrnatom obliku, s prosječnom veličinom zrna oko 2,0 mm. Prije miješanja s glinom, zgura je usitnjavana mljevenjem i prosijavana kako bi se kalibrirala do veličine zrna od 0,425 mm.

Kemijska svojstva ovog uzorka zgure određena su u laboratoriju tvrtke Holcim d.o.o. (tablica 5.5.). Prosječna specifična gustoća uzorka zgure iznosi 2,90 g/cm<sup>3</sup>.

udio	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	Na <sub>2</sub> O	LOI.
[%]	37,83	12,63	3,09	42,96	7,00	0,61	0,125	0,52	0,33

Tablica 5.5. Kemijske karakteristike uzorka zgure (Holcim d.o.o.)

## 5.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI

U ovom poglavlju opisani su procesi nastajanja zgre uz opisani kemijski i mineraloški sastav. Također opisane su osnovne geotehničke karakteristike zgre uz primjenu zgre u geotehnici i općenito građevinarstvu. Kratko je spomenuta i upotreba zgre u EU u 2023. godini kao i korištene količine. Opisane su karakteristike zgre korištene za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji

Zgre (posebno čelična zgura) mogu se koristiti kao djelomična zamjena za vapnenac i neke druge prirodne sirovine za proizvodnju klinkera (cementa) i u ovoj upotrebi konkuriraju pepelu iz termoelektrana i donjem pepelu. Neke druge metalurške zgre, kao što je zgura bakra, mogu konkurirati feritnim zgurama na nekim specijaliziranim tržištima, kao što je ferozni dodatak u proizvodnji klinkera, ali su općenito mnogo ograničenije dostupne od feritnih zgura.

U građevinskom sektoru, željezne zgre konkuriraju prirodnim agregatima (drobljeni kamen, pijesak i šljunak), ali su daleko manje dostupne od prirodnih materijala. Kao cementni dodatak u miješanim cementima i betonu, GGBFS (mljevena granulirana zgura iz visokih peći) uglavnom konkurira pepelu iz termoelektrana, metakaolinu i vulkanskim pepelima pucolanima. U tom smislu, GGBFS smanjuje količinu portland cementa po toni betona, omogućujući tako proizvodnju više betona po toni portland cementa. Zgre (posebno čelična zgura) mogu se koristiti kao djelomična zamjena za vapnenac i neke druge prirodne sirovine za proizvodnju klinkera (cementa) i u ovoj upotrebi konkuriraju pepelu iz termoelektrana i donjem pepelu. Neke druge metalurške zgre, kao što je zgura bakra, mogu konkurirati željeznim zgurama na nekim specijaliziranim tržištima, kao što je ferozni dodatak u proizvodnji klinkera, ali su općenito mnogo manje dostupne od željeznih zgura.

## **6. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE KRUTOSTI I ČVRSTOĆE GLINE**

### **6.1. UVOD**

U ovom poglavlju prikazuju se osnovni pojmovi krutosti i čvrstoće gline, odnosno kako se definiraju i što predstavljaju ti fizikalni pojmovi. Također navode se postupci i metode koje se primjenjuju u geotehnici kako bi se ispitala krutost i čvrstoća gline.

Generalno ispitivanja se mogu podijeliti na laboratorijska ispitivanja i in situ ispitivanja. Za potrebe ovoga rada primjenjena su laboratorijska ispitivanja.

Krutost možemo definirati kao sposobnost materijala da se opire deformacijama kada su mu primijenjene vanjske sile. Ako je deformacija uzrokovana tim silama reverzibilna, znači da se materijal vraća u svoj izvorni oblik nakon što sila prestane djelovati, tada govorimo o elastičnosti. Ako je elastičnost materijala linearna, to znači da je odnos između primijenjene sile i rezultirajuće deformacije proporcionalan, a ako je materijal izotropan, to znači da ima iste mehaničke osobine u svim smjerovima. U tom slučaju govorimo o linearnom elastičnom materijalu.

Čvrstoću gline možemo okarakterizirati kao mehaničko svojstvo otpora tla, a određuje se najčešće kao jednoosna tlačna čvrstoća, troosna i posmična čvrstoća tla, premda do sloma mogu dovesti i druga stanja efektivnih napreznja. Također razlikuje se čvrstoća u dreniranim i nedreniranim uvjetima.

## 6.2. NAPONSKO DEFORMACIJSKI ODNOSI

Prema magistarskom radu (Lebo, 2011), prognoza ponašanja tla, odnosno procjena odnosa između deformacija i naprezanja tla u promjenjivim uvjetima naprezanja, ključna je za uspješno projektiranje geotehničkih zahvata. Postoje brojni primjeri neuspjelih građevinskih objekata čije ponašanje nije odgovaralo predviđanjima, što je rezultat nepravilnog proračuna utjecaja opterećenja na tlo. Kao rezultat, mogu nastati pretjerane deformacije, što može izazvati mehanička oštećenja, poput pukotina ili potpune destrukcije dijelova objekta, čineći ga djelomično ili potpuno neupotrebljivim. Takve deformacije mogu uključivati neočekivana sljeza velikog intenziteta ili neujednačene veličine (diferencijalno sljeza), što može uzrokovati naginjanje građevine, čime ona gubi funkcionalnost. U ekstremnim slučajevima, deformacije tla oko i ispod građevine mogu postati toliko velike da dođe do urušavanja cijele građevine.

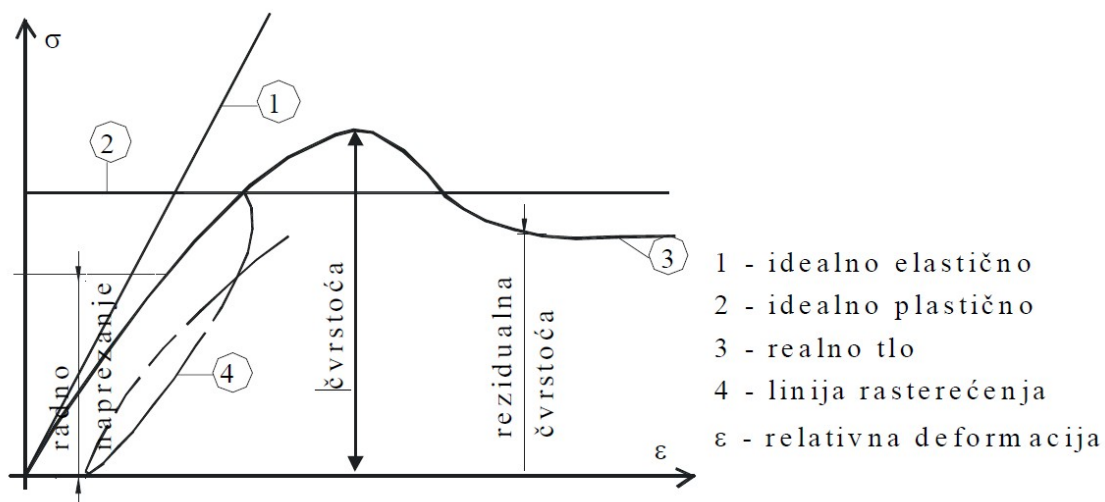
Kako bi se spriječile ovakve katastrofe, osnovni zadatak mehanike tla je predviđanje deformacija tla i određivanje graničnih opterećenja koja uzrokuju eventualni slom tla. Za to je nužno uspostaviti funkcionalne veze između naprezanja i deformacija tla. Međutim, problem je otežan jer tlo, kao materijal, ima vrlo složene funkcionalne veze koje variraju od vrste tla do vrste tla. Unatoč tome, suvremena geotehnička praksa zahtijeva što precizniju procjenu deformacija tla, s naglaskom na točno predviđanje sljeza kao problema koji može izazvati ozbiljne i često katastrofalne deformacije.

Za pouzdano razumijevanje ponašanja tla, ključno je poznavanje osnovnih karakteristika tla koje će biti uključene u proračun za odabrani geotehnički model. Jedan od ključnih parametara u ovoj analizi je krutost tla, koja se obično izražava putem modula posmika ( $G$ ), modula stišljivosti ( $M_v$ ) i Young-ovog modula elastičnosti ( $E$ ). Za određivanje krutosti i deformacija tla, te naprezanja, geotehnička praksa razvila je niz laboratorijskih i terenskih metoda, kako direktnih, tako i indirektnih, koje omogućuju precizno određivanje aspekata mehaničkog ponašanja tla, prilagođenih specifičnim vrstama geotehničkih problema.

Pomaci ili deformacije su vidljiva fizikalna veličina koja se može mjeriti na uzorcima tla, a pomoću raznih direktnih ili indirektnih mjernih uređaja, ti pomaci mogu se pretvoriti u naprezanje. Ova se metoda temelji na pretpostavci da deformacije tvari mogu biti kvantificirane, dok su naprezanja filozofski koncept koji se izvodi iz tih

mjerenja. Kako je John Burland istaknuo 1967. godine u svom doktoratu: "*Naprezanje je filozofski koncept, a deformacija je fizikalna realnost*" (Simpson, 1992).

Na Slici 6.1. prikazan je odnos između naprezanja i deformacija za različite modele ponašanja materijala.



Slika 6.1. Različiti modeli deformacija tla pri promjeni naprezanja (Lebo, 2011)

Prikaz elastičnih konstanti po teoriji elastičnosti:

Naziv konstante	Izraz	Definicija
<i>Modul elastičnosti</i>	$E = \frac{\sigma}{\xi}$	Odnos naprezanja i relativne deformacije mjerene u pravcu djelovanja sile kada je uzorak tla opterećen tlačno (kompresijski)
<i>Modul posmika</i>	$G = \frac{\tau_{xz}}{\gamma_{xz}}$	Odnos posmičnog naprezanja i relativne posmične deformacije
<i>Poisson-ov broj</i>	$\nu = \frac{\xi_3}{\xi}$	Odnos lateralne (bočne) i osne relativne deformacije, koje su posljedica tlačnog naprezanja na uzorku
<i>Sferni modul</i>	$K = \frac{\sigma_0}{3 \cdot \xi}$	Odnos izotropnog naprezanja na uzorku i relativne volumske deformacije

Tablica 6.1. Prikaz elastičnih konstanti po teoriji elastičnosti



Za određivanje konstanti dovoljno je odrediti dvije, a ostale se mogu izračunati iz međusobnih odnosa, npr.:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{E \cdot K}{9K - E} = 3K \cdot (1 - 2\nu) \quad (6.1)$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)} = \frac{3G}{3 \cdot (3G - E)} = \frac{2G \cdot (1 + \nu)}{3 \cdot (1 - 2\nu)} \quad (6.2)$$

$$\nu = \frac{E + 2G}{2G} = \frac{3K - E}{6K} = \frac{3K - 2G}{2 \cdot (3K + G)} \quad (6.3)$$

$$E = 3K \cdot (1 - 2\nu) = \frac{9KG}{3 \cdot (K + G)} = 2G \cdot (1 + \nu) \quad (6.4)$$

Usvoji li se Terzaghi-jev princip efektivnih napreznja, totalna se napreznja  $\bar{\sigma}$ , prikazana u vektorskom obliku, sastoje od vektora efektivnih napreznja  $\bar{\sigma}'$  i vektora pornog tlaka vode  $\bar{u}$

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}' + \bar{u} \quad (6.5)$$

U takvom se modelu može pokazati da su posmična napreznja invarijanta, tj. ako je prema Mohr-ovom zakonu napreznje u ravnini, posmično napreznje je:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (6.6)$$

onda se to isto napreznje izraženo u efektivnim napreznjima može pisati:

$$\tau' = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} = \frac{(\sigma_1 - u) - (\sigma_3 - u)}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (6.7)$$

iz čega se dobiva da je:

$$\tau' = \tau \quad (6.8)$$

Iz prethodnoga se zaključuje da je posmično napreznje jednako za efektivno i totalno stanje napreznja.

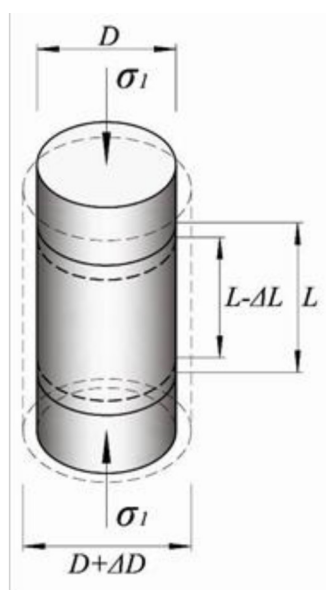
### 6.3. ISPITIVANJE JEDOOSNE I NEDRENIRANE ČVRSTOĆE GLINE

Određivanje krutost gline zasniva se na jednoosnom opterećivanju glinenog uzorka, te mjerenju deformacija izazvanih poznatim naprežanjem. Omjer naprežanja i deformacija reprezentira krutost.

U geotehničkim laboratorijima se najčešće primjenjuje metoda pod normom ASTM D2166 / D2166M-16, američkog društva za ispitivanje i materijale ASTM (*eng. American Society for Testing and Materials*), što predstavlja određivanje jedoosne čvrstoće koherentnih tala (*eng. Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*).

Prema navedenoj normi uzorak se najprije pripremi, odnosno izvadi iz cilindra bušotine, zatim “oblikuje u valjak” postupkom “trimanja”, te se važe, mjeri i stavlja u uređaj za ispitivanje. Visina uzorka mora biti 2,0 do 2,5 puta veća od promjera uzorka, a ravnost stranica mora biti manja od 0,5mm, a ravnost baze manja od 0.025mm, a stranice moraju biti okomite na bazu. Brzina nametanja sile se kreće između 0,5 do 2% / minuti. (nedrenirano stanje). Prirast naprežanja treba odabrati tako da vrijeme do sloma ne prelazi 15 minuta.

Nakon postavljanja u uređaj za ispitivanje uzorak se opterećuje uzdužnom silom uz istovremeno mjerenje uzdužnih deformacija (slika 6.2.).



Slika 6.2. Uzorka u jednoosnom stanju naprežanja (Jurić Kačunić, 2009).

Uzdužno tlačno naprezanje ( $\sigma$ ) izazvano djelovanjem sile ( $P$ ) na površinu uzorka ( $A=D^2 \cdot \pi/4$ ) izračunava se prema izrazu:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6.9)$$

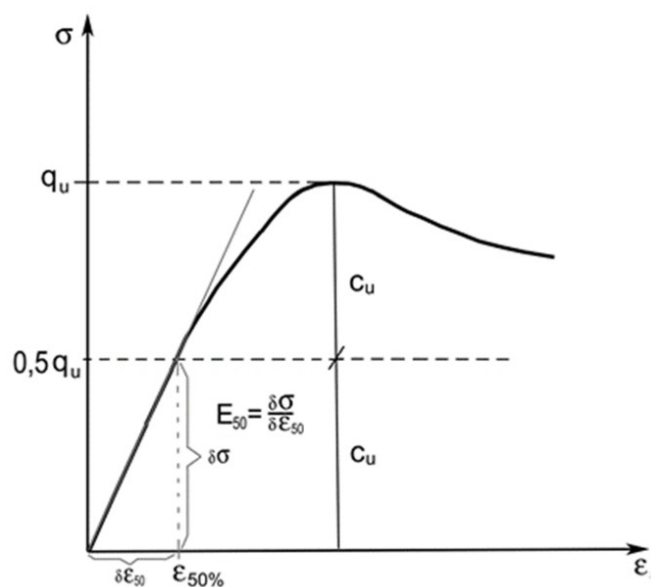
Uzdužna deformacija ( $\epsilon_x$ ) izračunava se prema izrazu:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L}{L} \quad (6.10)$$

Opterećivanje uzorka može se provoditi kontinuiranim prirastom sile odnosno naprezanja ili kontinuiranim prirastom pomaka odnosno deformacija. Prirast naprezanja ili deformacija treba biti takav da se slom uzorka ostvari u nedreniranim uvjetima.

Promjena visine uzorka ( $\Delta L$ ) odnosno uzdužna deformacija mjeri se na način da se na uređaj postave mikrourice u paru ili na tri točke podložne ploče uređaja.

U zadnje vrijeme često se koriste LVDT osjetila pomoću kojih se vrlo precizno očitavaju promjenu početne visine uzorka ( $L$ ) koja se uzima u proračun modula. Mjerenja se obavljaju na najmanje dva (obično tri) senzora, ravnomjerno raspoređena oko uzorka, a u proračun se uzima prosječna vrijednost izmjerenih pomaka. Ispitivanje se provodi do sloma uzorka ili dok se ne dosegne deformacija do najviše 15 %. Obvezno se u ispitivanjima navodi brzina podizanja klipa uređaja za jednoosno ispitivanje čvrstoće, a kasnije se odredi sadržaj vlage u ispitnom uzorku koristeći cijeli uzorak.



Slika 6.3. Naponsko deformacijska krivulja za jednoosno ispitivanje gline

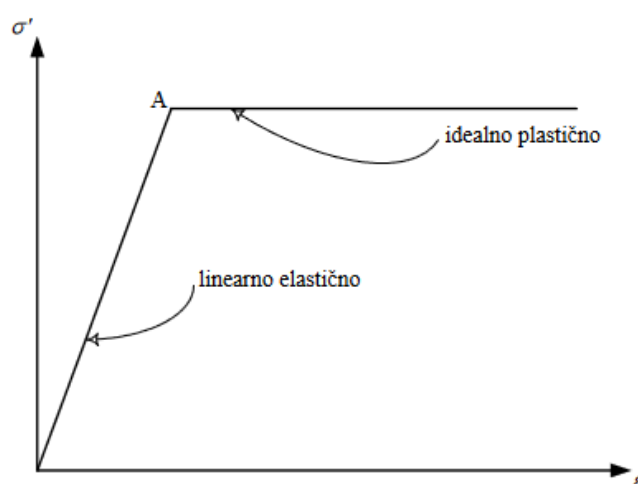
Nedrenirana čvrstoća tla ( $c_u$ ) se može dobiti iz dijagrama na slici 6.3. kao polovična vrijednost najveće jednoosne tlačne čvrstoće ( $q_u$ ) prije sloma uzorka.

$$c_u = \frac{q_u}{2} \quad (6.11)$$

## 6.4. SLOM TLA I POSMIČNA ČVRSTOĆA

U mehanici tla, posmična čvrstoća tla povezuje se sa slomom tla, koji označava stanje nestabilnosti tla uzrokovano posmičnim deformacijama. Slom tla obično se manifestira kao klizanje jedne mase tla po drugoj, uz jasno izraženu kliznu plohu ili manje izraženu kliznu zonu. Na kliznoj plohi, posmično naprezanje doseže posmičnu čvrstoću tla. Daljnji rast posmičnih deformacija više nije praćen povećanjem otpora u obliku povećanja posmičnih naprezanja, kao što je bio slučaj prije sloma. U tom trenutku tlo popušta, što označava početak sloma. Kao primjer, možemo pretpostaviti da se tlo ponaša prema modelu linearno elastično – idealno plastično (kako je prikazano na slici 6.4.). Do točke A ponašanje tla je linearno elastično, a nakon dosezanja te točke ponaša se idealno plastično. Elastično ponašanje znači da su deformacije povratne; tj., kada bi se tlo, na putu do točke A, rasteretilo, ostvarena deformacija bi se poništila.

Linearan odnos znači da je elastični odnos između efektivnih naprezanja i deformacija prikazan ravnom linijom na grafu. Ovaj odnos vrijedi sve do točke A, u kojoj dolazi do popuštanja ili sloma tla. Nakon dosezanja točke A, u kojoj se pojavljuje slom, deformacije tla počinju rasti pri konstantnom efektivnom napreznju. To označava početak plastičnog ponašanja tla, gdje su deformacije nepovratne ili trajne. To znači da, u fazi plastičnog ponašanja, deformacije više nisu reversibilne. Ako bi se tlo rasteretilo u fazi plastičnih deformacija, deformacija bi ostala ista kao što je bila prije rasterećenja, jer se energija koja je potrebna za deformaciju više ne može "vratiti".



Slika 6.4. Linearno elastičan-idealno plastičan odnos efektivnih naprezanja i deformacija

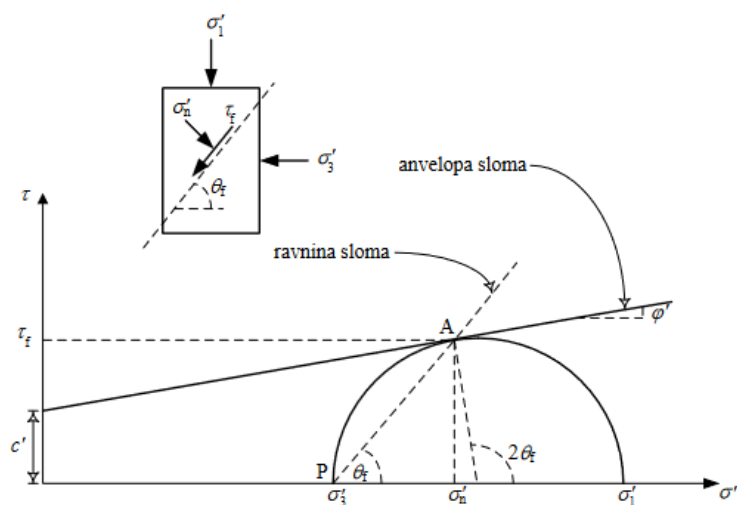
Tlo se ponaša elasto-plastično, što znači da pod određenim uvjetima može doći do trajnih deformacija (plastičnih deformacija) koje ne nestaju nakon što se opterećenje ukloni. Međutim, kako bi se slom u tlu mogao jednoznačno odrediti, potrebno je primijeniti odgovarajući kriterij sloma. U mehanici tla, najčešće se koristi Mohr-Coulombov zakon sloma, koji definira posmičnu čvrstoću tla (maksimalno naprezanje prije sloma). Mohr-Coulombov zakon sloma glasi:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad (6.12)$$

gdje je:  $\tau_f$  posmična čvrstoća tla,  $c'$  kohezija tla,  $\varphi'$  kut unutarnjeg trenja tla,  $\sigma'_n$  je normalno efektivno naprezanje. Ova ravnina, na kojoj dolazi do sloma, naziva se ravnina sloma. Parametri  $c'$  i  $\varphi'$  predstavljaju efektivne parametre čvrstoće tla, koji su od ključne važnosti za predviđanje ponašanja tla pod opterećenjem.

Jednadžba (6.12) opisuje pravac na dijagramu naprezanja, gdje je  $c'$  odsječak na ordinati, a  $\varphi'$  je nagib pravca u odnosu na horizontalu. Ovaj pravac poznat je kao anvelopa sloma, kako je prikazano na slici 6.5. Linearna anvelopa sloma je osnovni Coulombov doprinos ovom zakonu sloma.

Prema Mohr-u, slom u tlu nastupa kada anvelopa sloma tangira Mohrovu kružnicu naprezanja. To znači da, kada se kružnica naprezanja dodirne s anvelopom, dolazi do sloma. Kružnica siječe apscisu u točkama  $\sigma'_3$  i  $\sigma'_1$ , koje predstavljaju glavna efektivna naprezanja pri slomu. Na slici 6.5. prikazan je uzorak tla, gdje veće glavno efektivno naprezanje  $\sigma'_1$  djeluje na horizontalnu površinu uzorka, dok manje glavno efektivno naprezanje  $\sigma'_3$  djeluje na vertikalnu površinu uzorka. Na tim ravninama posmična naprezanja su nula, te se nazivaju glavnim ravninama naprezanja.



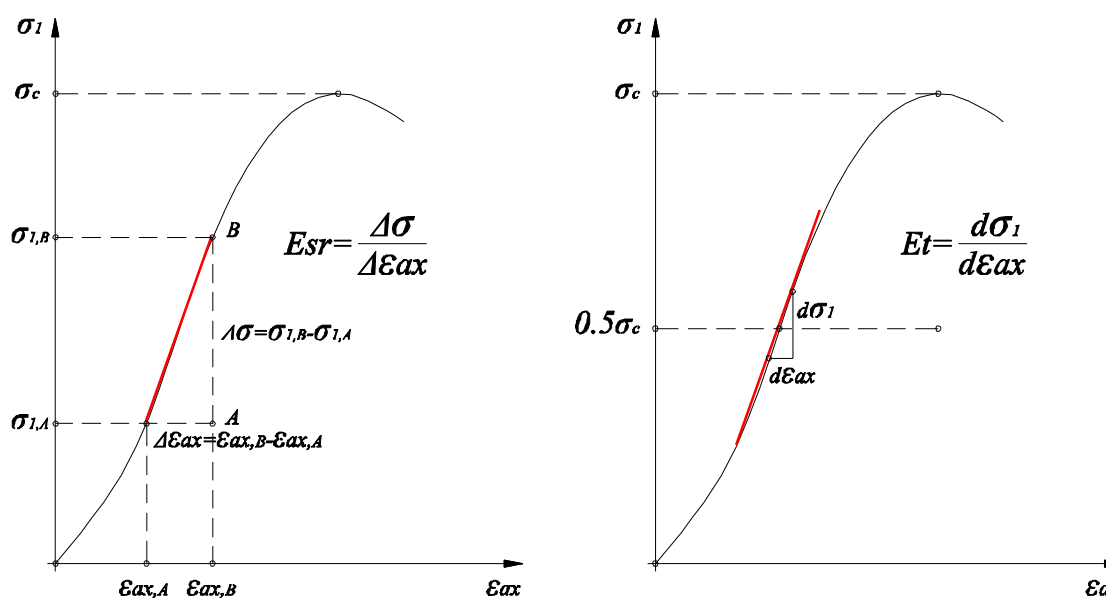
Slika 6.5. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće

## 6.5. ISPITIVANJE KRUTOSTI KOMPRESIJOM

O krutosti možemo govoriti samo kod čvrstih tvari, jer tekućine i plinovi nemaju stalan oblik zbog slabijih međumolekularnih sila. U mehanici kontinua, krutost općenito ovisi o nekoliko faktora: materijalu tijela, geometriji tijela ili sustava (oblik i dimenzije), te vrsti opterećenja. Krutost se može definirati kao otpornost na deformaciju i matematički je izražena kao odnos sile  $F$  koja uzrokuje deformaciju i same deformacije.

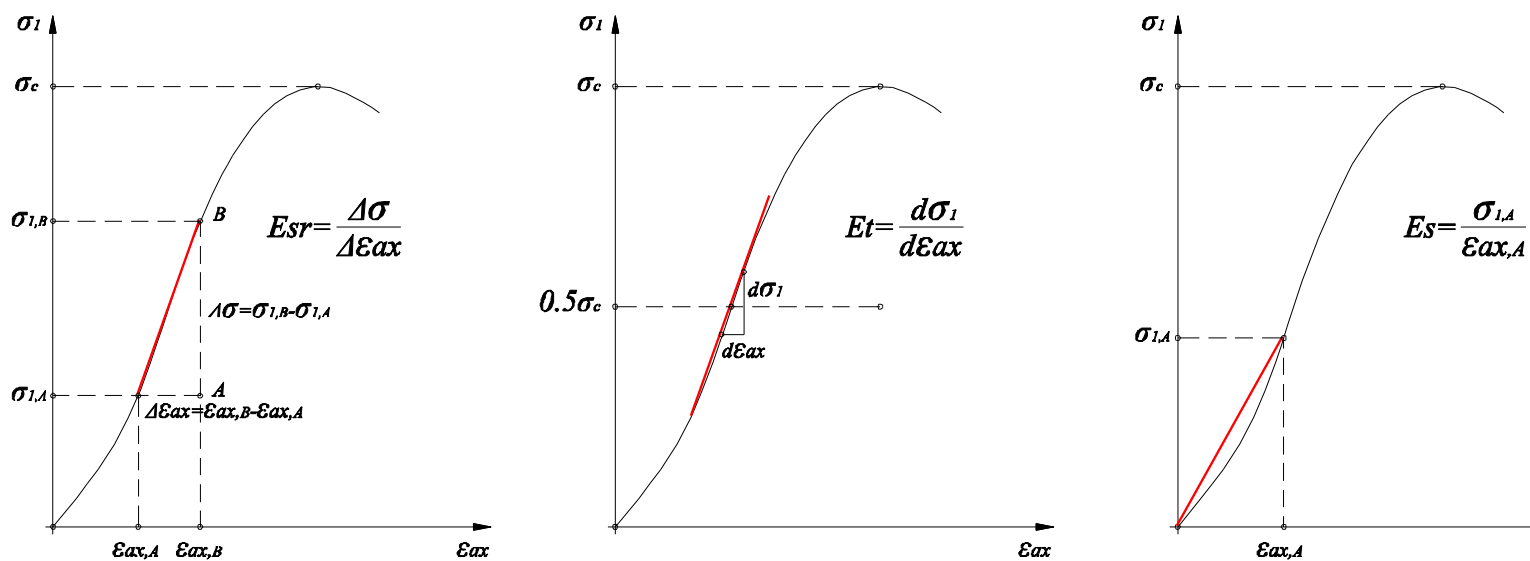
U geotehničkim aspektima, često se razmatra aksijalna deformacija, pa govorimo o aksijalnoj krutosti, koju definiramo modulom elastičnosti. Modul elastičnosti, kao mjera linearne krutosti, može se odrediti na nekoliko načina koji se koriste u inženjerskoj praksi. Tri glavne vrste modula elastičnosti su srednji, tangentni i sekantni modul elastičnosti.

Srednji modul elastičnosti predstavlja omjer razlike napreznjanja i odgovarajuće razlike deformacija za odabrano područje naponsko-deformacijske krivulje.



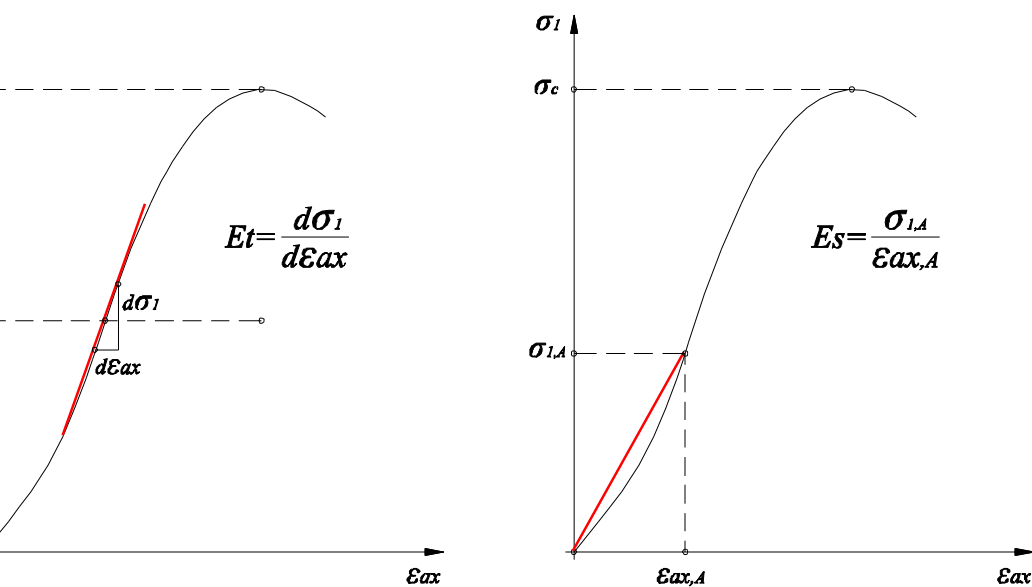
Slika 6.6. Srednji modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku (Jurić Kačunić, 2009).

Tangentni modul elastičnosti predstavlja omjer prirasta napreznjanja i odgovarajućeg prirasta deformacija za napreznjanje od  $0.5 \sigma$  (slika 6.7.).



Slika 6.7. Tangentni modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku (Jurić Kačunić, 2009).

Sekantni modul elastičnosti predstavlja omjer naprezanja i pripadne deformacije u željenoj točki naponsko-deformacijske krivulje (slika 6.8.).



Slika 6.8. Sekantni modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku (Jurić Kačunić, 2009).



## 6.6. PREGLED KRUTOSTI TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA

Ranije smjernice u geotehničkom projektiranju fokusirale su se na određivanje opterećenja koja, uz primjenu faktora sigurnosti, osiguravaju stanje naprezanja u tlu koje ne dovodi do sloma. U tom pristupu, čvrstoća tla bila je ključni parametar, dok su elastičnost i krutost tla imale manju ulogu. Za procjenu pomaka (deformacija) najčešće su se koristili empirijski izrazi, kao na primjer korelacija između dopuštenog opterećenja na temelje, širine temelja i broja udaraca standardnog penetracijskog pokusa, koji je jamčio da slijeganje temelja bude manje od 25 mm (Terzaghi i Peck, 1967). Također se smatralo da linearno-elastični model tla s konstantnim modulom stišljivosti "dovoljno dobro" opisuje ponašanje stvarnog tla.

Međutim, postupci predviđanja deformacija tla temelje se na mehanici kontinuuma, najčešće primjenom teorije elastičnosti, koja zahtijeva poznavanje parametara deformabilnosti (stišljivosti) tla u širem području oko mjesta djelovanja opterećenja. Ovi parametri deformabilnosti (stišljivosti) obično se određuju laboratorijskim i terenskim pokusima. Praksa, međutim, pokazuje da pouzdanost predviđanja deformacija tla često nije dovoljna za racionalno projektiranje građevinskih konstrukcija, zbog čega je potrebna daljnja preciznost u predviđanjima i razmatranju složenih ponašanja tla.

Dugo se smatralo da se krute ili prekonsolidirane gline ponašaju kao linearno-elastični materijal, ili barem da se dodatna naprezanja u takvim materijalima ponašaju prema pravilima linearne teorije elastičnosti. Ova teza je bila prvenstveno podržana istraživanjima ponašanja prekonsolidiranih glina u laboratorijskim uređajima, poput troosnog uređaja. Druga teza bila je zasnovana na pokazateljima da vertikalna dodatna naprezanja vrlo slabo ovise o naponsko-deformacijskom zakonu. Na temelju toga, smatralo se da točnost predviđanja slijeganja temeljnog tla prvenstveno ovisi o točnosti utvrđenih elastičnih modula krutih glina i njihovoj promjeni s dubinom.

Međutim, ubrzo je ustanovljeno da je teško izmjeriti ove elastične parametre. Standardni laboratorijski pokusi redovito su značajno potcjenjivali krutost takvih materijala u odnosu na krutost dobivenu povratnim analizama iz opaženih slijeganja. Čak su i povratne analize davale različite rezultate ovisno o izboru opaženih podataka i prihvaćenim pretpostavkama. Osim u slučajevima plitkih temelja, ovi problemi bili su očiti i u slučajevima građevnih jama i savitljivih potpornih konstrukcija.

Rješenje ovih problema pokušalo se pronaći in situ ispitivanjima tla, ali bez značajnijeg uspjeha. Premala krutost laboratorijskih uzoraka krutih glina pripisivala se njihovoj raspucalosti i poremećenju tijekom vađenja iz tla i ugradnje u odgovarajući laboratorijski uređaj. Istraživanja u mehanici tla usmjerila su se na pouzdano određivanje čvrstoće tla, što je dovelo do unapređenja standardnog troosnog uređaja (traksijski uređaj) i uređaja za izravno smicanje (direktni posmik). Iako se dosezanje čvrstoće u ovim uređajima pratilo preko deformacije uzorka (pomaka), nije se dovodilo u pitanje jesu li izmjerene deformacije primjenjive za određivanje krutosti tla. Međutim, novija istraživanja o krutosti tla, do kojih se došlo mjerenjima u laboratoriju i in situ, predstavljaju značajnu novost u tom području i zaslužuju posebnu pozornost.

Dugo se smatralo da se tlo ponaša prema principima linearne elastičnosti, a istraživanja su se uglavnom svodila na određivanje modula elastičnosti i njegove promjene s dubinom. Međutim, promjena ovog pristupa započela je sredinom sedamdesetih godina prošlog stoljeća, kada su se počeli objavljivati rezultati terenskih opažanja pomaka tla koji su značajno odstupali od teorijskih izračuna. Na primjer, tijekom iskopavanja u krutoj prekonsolidiranoj londonskoj glini, pomaci tla bili su mnogo manji nego što je predviđeno, dok su laboratorijski izračuni krutosti tla bili deset puta veći od stvarnih vrijednosti (Simpson, O’Riordan i Croft, 1979). Sličan fenomen uočio se i početkom šezdesetih godina u Londonu, gdje su temeljne deformacije zgrade od 35 katova bile minimalne (5,5 mm), dok su deformacije u temelju sloja krede pri opterećenju iznosile samo 0,01% (Burland, 1989). Takva odstupanja u mjerenim deformacijama od projektiranih vrijednosti objašnjavana su poremećenjem uzoraka tla tijekom laboratorijskih ispitivanja, što se smatralo glavnim uzrokom niskih vrijednosti krutosti.

Ovaj izazov doveo je do većeg fokusa na terenskim ispitivanjima, što je rezultiralo razvojem novih uređaja poput presiometara. Međutim, ni takvi uređaji nisu pružili odgovore na pitanje o uzrocima tih odstupanja. Povod za pomak u razumijevanju mehaničkog ponašanja tla dali su Simpson i suradnici (1979), koji su primijenili metodu konačnih elemenata kako bi analizirali tlo kao bilinearno-elastičan materijal. Umjesto tradicionalnih laboratorijskih vrijednosti, za početnu krutost uzeli su deset puta veće vrijednosti, što je rezultiralo značajno boljim podudaranjem sa stvarnim rezultatima terenskih ispitivanja u odnosu na prethodnu teoriju linearne elastičnosti.

Pravi pomaci u razumijevanju ponašanja tla nastali su kada je realizirana ideja lokalnog mjerenja deformacija na samom uzorku tla u ćeliji uređaja za troosno smicanje. Krajem

sedamdesetih i početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća počeo je razvoj specijaliziranih uređaja koji su omogućili mjerenje malih deformacija direktno na površini uzorka tla, prvenstveno tijekom troosnih pokusa (Burland i Symes, 1982; Jardine, Symes i Burland, 1984; Clayton i Khatrush, 1986; Goto i dr., 1991). Ovi uređaji omogućili su registriranje deformacija reda veličine do 0,001%.

Rezultati tih istraživanja pokazali su da tlo pri vrlo malim posmičnim deformacijama ima mnogo veću krutost nego što su prethodna mjerenja pokazivala. Također, primjećeno je da odnos između naprezanja i deformacija postaje izrazito nelinearan kako deformacije rastu do 0,1%, pri čemu je krutost tla opadala čak deset puta (Jardine i dr., 1984). Ova saznanja značajno su unaprijedila razumijevanje mehaničkog ponašanja tla, posebno u kontekstu malih deformacija, što je bilo neprepoznato u ranijim istraživanjima temeljenima na standardnim metodama mjerenja.

Rezultati pokusa s novim uređajima izazvali su ozbiljnu sumnju u prethodnu pretpostavku da se čvrste gline ponašaju linearno-elastično. Iako su sumnje u rezultate ispitivanja bile prisutne, jedno je bilo jasno – male deformacije do 0,1 % su te koje su primjećivane i registrirane u tlu. Terenskim opažanjem potvrđeno je da se upravo ove male deformacije mogu uočiti u prirodnim uvjetima. Jardine i suradnici (1984) analizirali su krutosti tla dobivene praćenjem pomaka tla u iskopima ispod ploča pilota u krutom tlu, koje su izazivale posmične deformacije od 0,01 % do 0,1 % pod radnim opterećenjem. Utvrdili su da su krutosti dobivene laboratorijskim troosnim smicanjem uz lokalno mjerenje deformacija bile približno iste kao i one izmjerene na terenu. Također su pokazali da nelinearnost odnosa posmičnog modula i posmičnih deformacija do 0,1 % značajno poboljšava točnost procjene deformacija u odnosu na linearno-elastičnu analizu s konstantnim modulom. Ovisnosti posmične krutosti o relativnoj posmičnoj deformaciji dobivene novom tehnologijom mjerenja malih deformacija u laboratoriju za statička opterećenja bile su u skladu s ranije poznatim rezultatima iz dinamičkih laboratorijskih pokusa, kao što su pokusi rezonantnog stupca (Atkinson i Sallfors, 1991). Dugo se smatralo da se rezultati dinamičkih pokusa ne mogu koristiti za analize u statičkim uvjetima, no primjena nove tehnologije mjerenja malih deformacija značajno je smanjila razlike u razumijevanju dinamičke i statičke krutosti tla.

Jedna od naprednijih metoda mjerenja malih deformacija u tlu posljednjih godina je korištenje piezo-keramičkih pločica poznatih kao bender elementi (engl. Bender Elements), čija se skraćena često koristi kao BE. Ova tehnika prvi je put primijenjena

od strane Shirley i Hampton (1977) kao metoda za mjerenje malih deformacija. Iako je metoda bender elemenata prvobitno otkrivena i primijenjena još prije, njezina širija uporaba u geotehničkim istraživanjima počela je s radovima Shulteissa (1982), Dyvika i Madshusa (1985), koji su je koristili u troosnim uređajima. Međutim, tek nakon 1996. godine metoda bender elemenata postaje prepoznata kao pouzdana tehnika za mjerenje vrlo malih deformacija u tlu, a najviše zasluga za to pripada prof. H.J. Atkinsonu. Metoda se temelji na mjerenju brzine širenja posmičnih valova koji prolaze kroz uzorak tla, zbog čega se često naziva "dinamičkom metodom". Korištenje BE za mjerenje malih deformacija u tlu prvi je puta primijenjeno u Hrvatskoj 2011. godine u Zavodu za geotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (slika 6.9.).



Slika 6.9. Bender elementi tvtkve GDS u troosnom uređaju Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Lebo, 2011)

Analizom rezultata pokusa iz magistarskog rada (Lebo, 2011) i dostupne literature, potvrđuje se teza o nelinearnom elastičnom ponašanju pijeska i krutih gline. Ova istraživanja otkrivaju dvije ključne spoznaje:

Prvo, u području malih deformacija ponašanje tla, uključujući pijesak i krute gline, pokazuje izrazito nelinearno ponašanje. Posmična krutost tla u ovom području opada s porastom posmičnih deformacija.

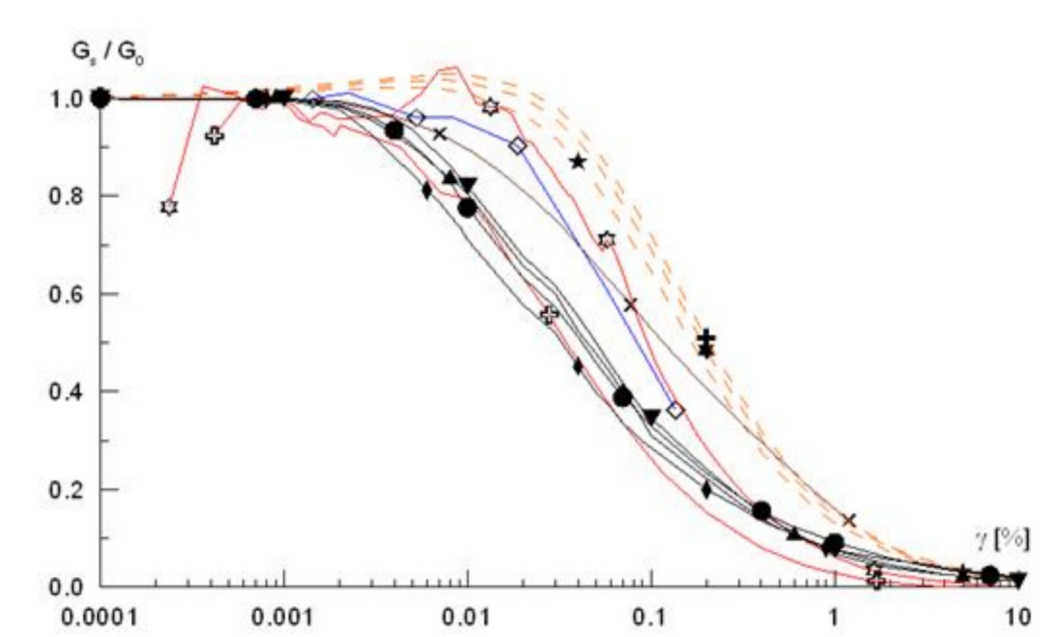
Drugo, posmična krutost tla pri malim deformacijama mnogo je veća nego pri većim deformacijama.

Usporedbom rezultata krutosti tla, pokazuje se da su ovisnosti posmične krutosti o relativnoj posmičnoj deformaciji, dobivene za monotona (statička) opterećenja, u skladu s ranijim rezultatima dobijenim iz dinamičkih laboratorijskih pokusa (Atkinson i Salfors, 1991; Cascante i dr., 2003; Youn i dr., 2008; Wicaksono i dr., 2008). Dugo se smatralo da postoje značajne razlike u rezultatima dobivenim dinamičkim opterećenjima u odnosu na statička opterećenja. Međutim, nova tehnologija za mjerenje malih deformacija u laboratoriju, koja uključuje lokalno mjerenje deformacija na uzorku i/ili upotrebu BE, pokazala je da postoji zanemariva razlika između dinamičke i statičke krutosti tla (Wicaksono i dr., 2008).

U svojoj disertaciji (Matešić, 2002) je pokazao da se glina iz područja grada Zagreba prati prethodno opisane trendove u pogledu posmične krutosti. Iz rezultata niza pokusa koji su provedeni na zagrebačkoj glini (krutim glinama) prikazana je ovisnost sekantnog posmičnog modula o posmičnoj deformaciji tijekom monotonog smicanja. Posmični modul, odnosno posmična krutost ovisi o mnogo parametara među kojima su prethodno opterećenje i srednje efektivno naprezanje. Istraživanja su pokazala da se normalizacijom posmičnog modula ( $G$ ) s posmičnim modulom na početku smicanja ( $G_0$ ) te normalizacijom posmične deformacije ( $\gamma$ ) s referentnom posmičnom deformacijom može skoro eliminirati utjecaj srednjeg naprezanja na ovisnost normaliziranog posmičnog modula o normaliziranoj posmičnoj deformaciji.

Ovakva normalizacija ima barem jedan teoretski i barem jedan praktični nedostatak. Teoretski nedostatak je što navedena normalizacija implicitno pretpostavlja linearnu konstitucijsku jednadžbu za elastične deformacije, dok je dobro poznato da to nije slučaj u tlu. Praktični nedostatak opisane normalizacije leži u opažanju da pri većim promjenama srednjeg efektivnog naprezanja tijekom pokusa smicanja, posebno pri većim deformacijama, ovisnost normaliziranog posmičnog modula i normalizirane posmične deformacije počinje dosta odstupati od ovisnosti dobivene iz pokusa gdje nije bilo veće promjene srednjeg efektivnog naprezanja.

Na slici 6.10. dat je prikaz usporedbe posmične krutosti gline za više autora (Matešić, 2002).



**Usporedba: glina**

referenca	test	IP	e	$p_p'$ [kPa]	$p_o'$ [kPa]	q [kPa]	$G_0$ [MPa]	
◆	G06		27,3	0,48	1230,0	99,0	2,7	64,8
●	G07		27,3	0,44	1232,0	200,0	1,0	104,2
▲	G10		27,3	0,59	200,0	203,0	2,8	63,8
▼	G11		27,3	0,68	100,0	100,0	1,1	38,0
◇	Shibuya i dr. (1995)	K4	27,0	1,32	300,0	300,0	0,0	69,4
⊕	Mukabi i Tatsuoka (1999)	D24-1	28,5	-	322,5	322,5	240,3	43,2
☆	Mukabi i Tatsuoka (1999)	D24-2	28,5	-	>341,3	341,3	210,8	44,6
×	Vucetic i Dobry (1991)	-	30,0	-	-	-	-	-
★	Ishibashi i Zhang (1993)	-	30,0	-	100,0	-	-	-
⊛	Ishibashi i Zhang (1993)	-	30,0	-	200,0	-	-	-
⊞	Ishibashi i Zhang (1993)	-	30,0	-	300,0	-	-	-

Slika 6.10. Dijagrami G -  $\gamma$ , rezultata ispitivanja posmične krutosti gline prema nekim autorima (Matešić, 2002)

## 6.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI

U ovom poglavlju prikazuju se osnovni pojmovi krutosti i čvrstoće gline, odnosno kako se definiraju i što predstavljaju ti fizikalni pojmovi. Također navode se postupci i metode koje se primjenjuju u geotehnici kako bi se ispitala krutost i čvrstoća gline. Generalno ispitivanja se mogu podijeliti na laboratorijska ispitivanja i in situ ispitivanja. Za potrebe ovoga rada primjenjena su laboratorijska ispitivanja.

Također dat je pregled posmične krutosti gline pri malim deformacijama i načinu određivanja tih deformacija u laboratoriju pomoću najnovije tehnologije primjenom Bender elemenata (BE).

Čvrstoća tla (engl. *soil strenght*) može se definirati kao mehaničko svojstvo tla iskazano nekim od stanja efektivnoga naprezanja koje izaziva slom tla. Obično se ispituju jednoosna tlačna, troosna i posmična čvrstoća tla, premda do sloma mogu dovesti i druga stanja efektivnih naprezanja. Razlikuje se čvrstoća u dreniranim i nedreniranim uvjetima. Prva se odnosi na dugotrajna stalna opterećenja, tj. kada je podzemna voda stacionarna, a druga na nagla opterećenja, tj. kada je vrijeme prekratko da bi se ostvarilo znatnije gibanje vode. Čvrstoća u dreniranim uvjetima linearno raste s porastom normalnih efektivnih naprezanja, a ona u nedreniranim uvjetima ovisi samo o gustoći tla.

Krutost (engl. *stiffness*) se može definirati kao sposobnost materijala da se opire deformaciji. Ako je opiranje reverzibilno, to znači da materijal ima elastična svojstva. Ukoliko je materijal elastičan i ponaša se na isti način u svim smjerovima (izotropno), tada govorimo o linearnom elastičnom ponašanju materijala.

Na vrijednost modula elastičnosti utječe vlažnost uzorka za vrijeme ispitivanja (Hudson i Harrison, 1997). Stoga se traži da se vlažnost zabilježi za vrijeme ispitivanja te da se pokusi obavljaju na uzorcima koji reprezentiraju prirodne uvjete (saturacije ili dreniranja)

## **7. IZRADA I PRIPREMA KOMPOZITNIH UZORAKA U LABORATORIJU**

### **7.1. UVOD**

U ovom poglavlju prikazuju se laboratorijska ispitivanja krutosti i čvrstoće gline. Za ispitivanje krutosti i čvrstoće u laboratoriju se koriste valjkasti spravljeni kompozitni uzorci gline i veziva cementa, letećeg pepela i zgure.

Glina je uzeta sa dva lokaliteta na području grada Zagreba, jedan sa lokaliteta Krematorija, drugi sa lokaliteta tržnice Dolac u Zagrebu. Za vezivo u kompozitnoj mješavini se koristi cement, leteći pepeo i zgura.

Za provedbu laboratorijskih pokusa od iznimne je važnosti priprema uzoraka za ispitivanje. Glina se prethodno zdrobi i osuši te prosije i u određenom masenom omjeru suhe tvari mješa sa vezivom kako bi se stvorila mješavina kompozitnog uzorka.

Dodaci veziva cementa, letećeg pepela i zgure se dodaju u omjerima od 5%, 10%, 20 % mase veziva na masu suhe tvari gline. Tako spremljeni kompozitni uzorci mješavina gline i veziva se spremaju na odležavanje (“sazrijevanje”) u desikatoru bez gubitka vlage u vremenaskim intervalima od 7, 14 i 28 dana, nakon čega se podvrgavaju ispitivanju (krutosti i čvrstoće) u uređaju za linearnu kompresiju.



## 7.2. OPĆENITO O UREĐAJU ZA ISPITIVANJE KOMPRESIJOM

Uređaj za ispitivanje materijala kompresijom, poznat i kao „preša“, jedan je od osnovnih uređaja koji se redovito koriste u geotehničkim laboratorijima. Ovaj uređaj koristi se kako u komercijalne, tako i u istraživačke svrhe. Njegova osnovna funkcija je određivanje mehaničkih svojstava valjkastih uzoraka tla pod simetričnim uvjetima jednoosnog naprezanja, što omogućava određivanje naponsko-deformacijskih karakteristika tla. To prvenstveno uključuje ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće tla u statičkim (monotonim) uvjetima smicanja. Ispitivanje se može provoditi u dreniranim i nedreniranim uvjetima, ovisno o uvjetima pod kojima se uzorak testira.

Konvencionalni uređaji za ispitivanje tla kompresijom imaju svoja ograničenja u pogledu uvjeta pod kojima se ispiti provode. Međutim, noviji uređaji podržani su softverskim rješenjima koja omogućuju praćenje i analiziranje podataka prema različitim standardima, uključujući EN, BS, ASTM-AASHTO i druge. Precizne procedure za rad s ovim uređajem, kako u konvencionalnim, tako i u istraživačkim uvjetima, standardizirane su tehničkim normama poput Eurokoda 7, HRN EN 1997-2:2012 i ASTM D2166/D2166M-13. Detaljne informacije o postupku ispitivanja i obradi rezultata, kao i specifikacijama za jednoosno tlačno ispitivanje, mogu se naći u tehničkoj specifikaciji CEN ISO/TS 17892-7. Uređaji za kompresijsko ispitivanje često imaju automatizirani sustav za upravljanje opterećenjem, prikupljanje podataka i obrada rezultata, koji je u skladu s odgovarajućim standardima.

Općenito sukladno (Eurokodu 7) HRN EN 1997-2:2012 za jednoosno tlačno ispitivanje zahtjeva se:

- (1) Jednoosno tlačno ispitivanje treba provoditi na ispitnim uzorcima tla koji imaju dovoljno malu propusnost za zadržavanje nedreniranih uvjeta tijekom ispitivanja.
- (2) Treba izbjegavati vremenske razmake između obrade uzorka i ispitivanja kako bi se spriječila promjena sadržaja vode u ispitnim uzorcima.

Sukladno istoj normi kod vrednovanja i uporabe rezultata treba voditi računa da:

- (1) Rezultat ispitivanja približna je vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće ispitanoga tla.
- (2) Nedrenirana posmična čvrstoća  $c_u$  smije se odrediti kao polovica mjerene jednoosne tlačne čvrstoće.

(3) Efektivna naprezanja u laboratorijskom ispitnom uzorku možda odstupaju od efektivnih naprezanja *in situ*.

Zbog te razlike, rezultat ispitivanja ne predstavlja nužno nedreniranu čvrstoću tla *in situ*.

Za potrebe ovoga rada ispitivanja su provedena u laboratoriju Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Laboratorij je opremljen jednim uređajem za ispitivanje materijala kompresijom proizvođača tvrtke CONTROLS S.p.A. (slika 7.1.). U geotehničkoj praksi uređaj se još naziva i „jednoosna preša“. Pored osnovnog modula za ispitivanje kompresijom, uređaju se dodaju posebni moduli odnosno osjetila pomoću kojih se mogu ispitivati razni materijali kao recimo beton, stijene, drvo, plastika i slični materijali. Kada se ispitivaje glina postavje se osjetila za glineno prahovite materijale.

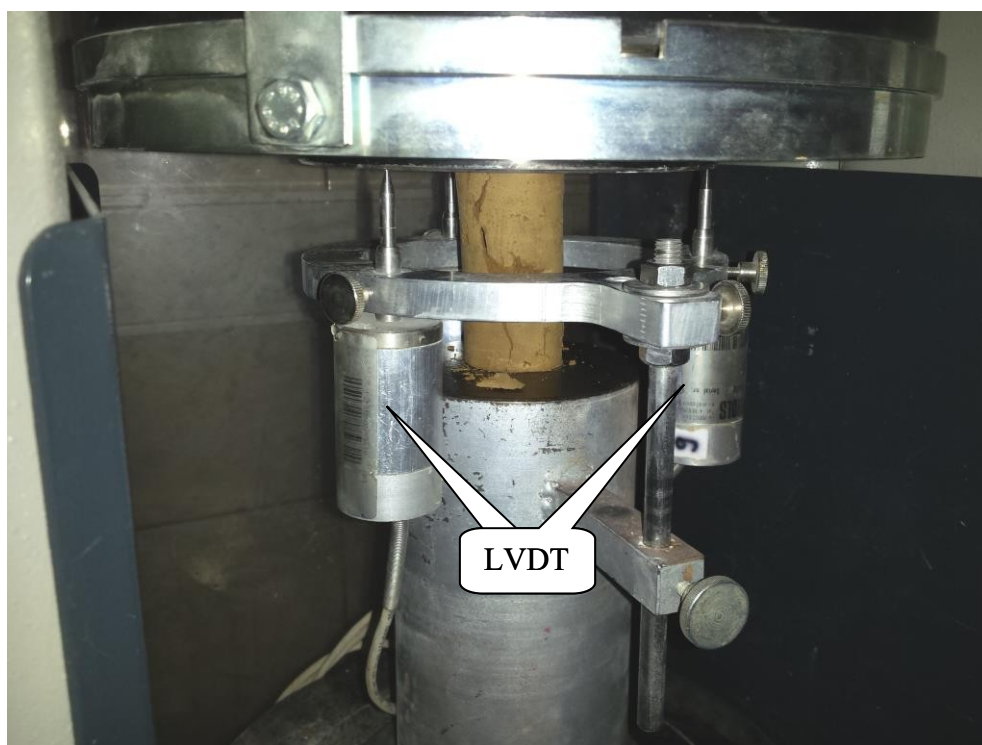


Slika 7.1. Uređaja za ispitivanje kompresijom (jednoosne tlačne čvrstoće) u laboratoriju Zavoda za geotehniku na Građevinskm fakultetu Sveučilišta u Zagrebu

Tvrtka Controls prisutna je u industriji opreme za ispitivanje kvalitete od 1968. godine. Od svojih početaka, Controls je proizveo i isporučio više od 15.000 uređaja za ispitivanje kompresije, koji se koriste u laboratorijima diljem svijeta, specijalizirajući se

za testiranje čvrstoće materijala kao što su glina, beton i stijene. Nova linija uređaja za ispitivanje kompresije, pod nazivom "COMPACT Line", temelji se na modernim upravljačkim sustavima iz serija "SMART Line" i "DIGIMAX". Pored toga, Controls također nudi uređaje za ispitivanje fleksije, vuče i drugih metoda testiranja gline, cementa, vapna i drugih materijala. Na slici 7.1. prikazan je uređaj tvrtke Controls S.p.A.

Svaki uređaj za ispitivanje kompresijom je opremljen mjernim osjetilima za mjerenje pomaka. Ova osjetila (mjerači) zasnivaju na "*Linear Variable Differential Transformer*" ili skraćeno LVDT načinu rada. Uređaj na kojemu se obavljana ispitivanja u laboratoriju Građevinskog fakulteta je opremljen (kao dodatna oprema) visoko kvalitetnim osjetilima novije generacije za mjerenje malih deformacija neizravno preko podložne ploče. Na uređaju se koriste tri istovjetna osjetila LVDT-a (slika 7.2.). Aksijalna deformacija se izračunavala na temelju srednje vrijednosti očitavanja pomaka na tri navedena osjetila.



Slika 7.2. Pozicije LVDT osjetila na uređaju za ispitivanje kompresijom (laboratorij Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu)

Pored uređaja u laboratoriju Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, za ispitivanje materijala kompresijom (jednoosne čvrstoće) korišten je uređaj za ispitivanje kompresijom geotehničkog laboratorija tvrtke GEOTEST d.o.o. iz Zagreba. Uređaj koji se koristi u laboratoriju je starije generacije tvrtke GEONOR (Norveška) koji je modificiran i opremljen osjetilima koji su ubaždareni, te se koristi u komercijalne svrhe, pa je za potrebe ovoga rada sasvim pouzdan (slika 7.3).



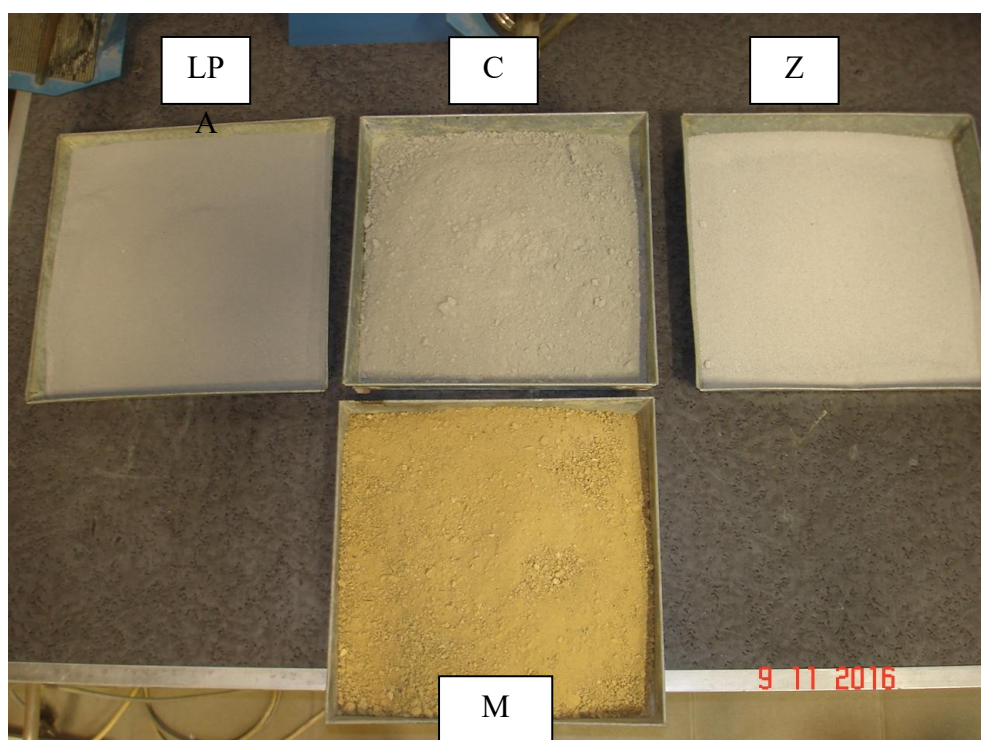
Slika 7.3. Uređaja za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka u geotehničkom laboratoriju tvrtke GEOTEST d.o.o. iz Zagreba

Autor je u svom radu s namjerom proveo ispitivanja u dva neovisna laboratorija kako bi se izbjegla mogućnost systemske pogreške, recimo pogreška nekog od osjetila koja se ne može detektirati za vrijeme ispitivanja i sl.. Ispitivanje u geotehničkom laboratoriju tvrtke GEOTEST doo je provedeno za nešto manji broj uzoraka, a rezultati su objedinjeni u analizi koja se navodi u drugim poglavljima.

### 7.3. IZRADA UZORAKA KOMPOZITA GLINE I VEZIVA

Ispitivanju ponašanja kompozita pri tlačnom jednoosnom smicanju, prethodi priprema uzoraka, odnosno spravljanje mješavine kompozita. Priprema se sastoji od mješanja smjese gline i veziva, zatim izrade uzorka u cilindričnom kalupu, sazrijevanja kompozita u desikatoru (bez gubitka vlage), vađenje uzorka iz kalupa nako određenog broja dana, ugradnje uzorka u uređaj za ispitivanje kompresijom („prešu“) namještanje mjernih osjetila za mjerenje deformacija, smicanja uzorka, te sušenje razlomljenog dijela uzorka (određivanje vlažnosti).

Za izradu kompozitnog uzorka gline i veziva potreban je osnovni materijal glinovitog tla, te komponente veziva letećeg pepela, zgure i cementa. Na slici 7.4. prikazani su materijali potrebni za izradu kompozitnog uzorka.



Slika 7.4. U gornjem redu su veziva (LP)-leteći pepeo, (C)-cement i (Z)-zgura, ispod je osnovni glineni materijal (M)

Kompozitni uzorak je mješavina glinenog materijala i veziva u određenom omjeru. Osnovna komponenta je glinoviti materijal kojemu se dodaje vezivo. Postotak veziva se kreće od 5 %, 10 % i 20 % od suhog masenog uzorka glinovite komponente.

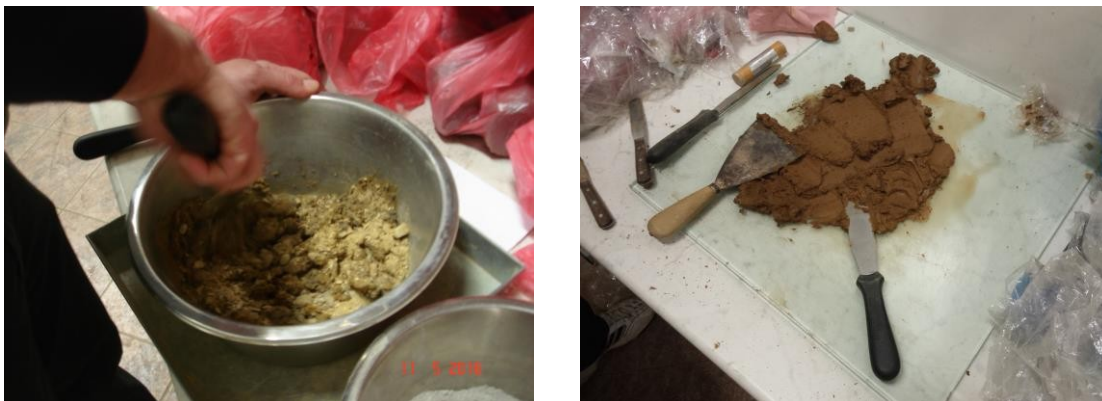
Za spravljanje uzoraka korištena je Zagrebačka glina, uzorkovana s dva lokaliteta u gradu Zagrebu. Jedan je područje okolice groblja Mirogoja, bliže Krematoriju (uzorci oznake Kr...), a druga lokacija je područje tržnice Dolac u samom centru grada Zagreba (uzorci oznake Do...). Za potrebe ispitivanja uzimana je glina iz sondažnih bušotina s različitih dubina, a uzorkovani materijal predstavljaju gline visoke plastičnosti (CH) i niske plastičnosti (CL). Postupak izrade ugradnje kompozitnog materijala gline i veziva proveden je metodom vlažnog zbijanja (eng. *moist tamping*).

Glineni uzorak se zdrobi u manje komade zatim osuši u pećnici na 105°C. Nakon sušenja materijal se mrvi i prosijava kroz sito 0.475 mm. Slika 7.5 prikazuje glineni materijal u fazi nakon sušenja vaganja, te suhog mješanja.



Slika 7.5. Uzorak gline propremljen za miješanje sa vezivom

Nakon suhog mješanja mješavini dodaje se određena količina vode tako da mješavina postigne približno prirodnu vlažnost gline koju je imala prilikom uzorkovanja iz bušotina. Naravno ovaj postupak je dosta zahtjevan te mu treba dati veliku pozornost prilikom rada (slika 7.6.). Detaljnije o pripremi ugradnji može se naći u Ladd (1977) i Been i dr. (1991).



Slika 7.6. Spravljanje (miješanje) kompozitne smjese gline i veziva

Za oblikovanje uzorka koristi se plastični cilindrični kalup poznatih dimenzija. Za ovaj slučaj upotrebljeni su valjkasti PVC kalupi (slika 7.7.)



Slika 7.7. Formiranje uzorka, stavljanje smjese gline i veziva u plastični kalup

Dimenzije cilindričnog kalupa su prilagođene pokusu jedosnog smicanja s promjerom uzorka oko 36 mm i visine oko 80 mm. Nakon izrade uzorci se označe, zamotaju u plastičnu foliju i čuvaju od gubitka vlažnosti. Približna prirodna vlažnost gline omogućava kompaktnost između čestica uzoraka prilikom ugradnje i zbijanja. Tako pripremljenu smjesu kompozita gline i veziva, ugrađuje se u plastične kalupe koji su prethodno pripremljeni (očišćeni i osušeni) slika 7.7.

Kako bi se postigla homogena vlažnost uzorka, kompozitni uzorak se čuva na sazrijevanju u PVC vrećicama u staklenom desikatoru u vremenskim intervalima 7, 14 i 28 dana (slika 7.8.).

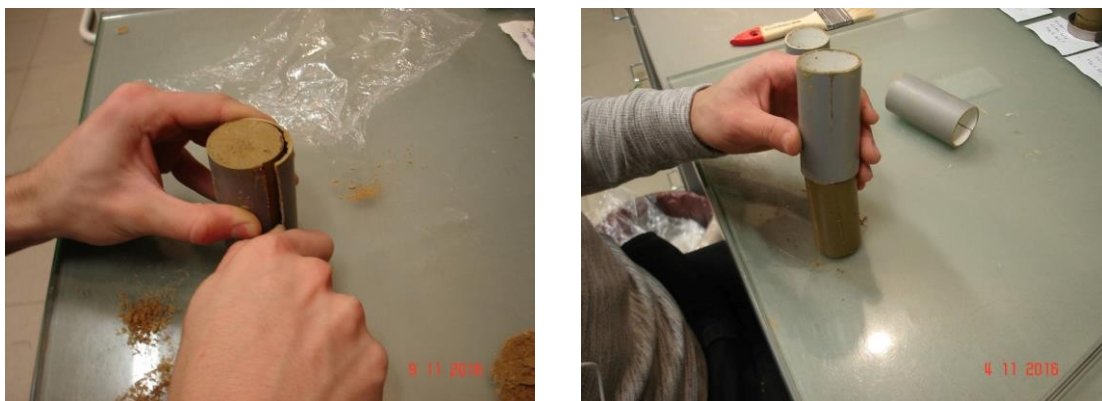
#### 7.4. JEDNOOSNO ISPITIVANJE UZORAKA KOMPOZITA GLINE I VEZIVA

Svi uzorci kompozita, odnosno mješavina gline i veziva kao što su leteći pepeo, cement ili zgura, čuvaju se u staklenom desikatoru radi očuvanja vlage. Uzorci odležavaju u desikatoru 7, 14 ili 28 dana, nakon čega s vade i pripremaju za ispitivanje jedoosne čvrstoće (slika 7.8.). Važno je desikator držati u kondicioniranim uvjetima laboratorija na konstantnoj temperaturi, obučno 21°C.



Slika 7.8. Označavanje uzoraka i čuvanje u staklenom desikatoru

Svi uzorci nakon odležavanja, odnosno sazrijevanja i vađenja iz kalupa (slika 7.9.) imaju vrlo malo geometrijskih razlika u odnosu na geometriju prilikom ugradnje, pa se prije ispitivanja obvezno vagaju i mjere im se geometrijske karakteristike promjera i visine uzorka.



Slika 7.9. Vađenje uzorka iz kalupa

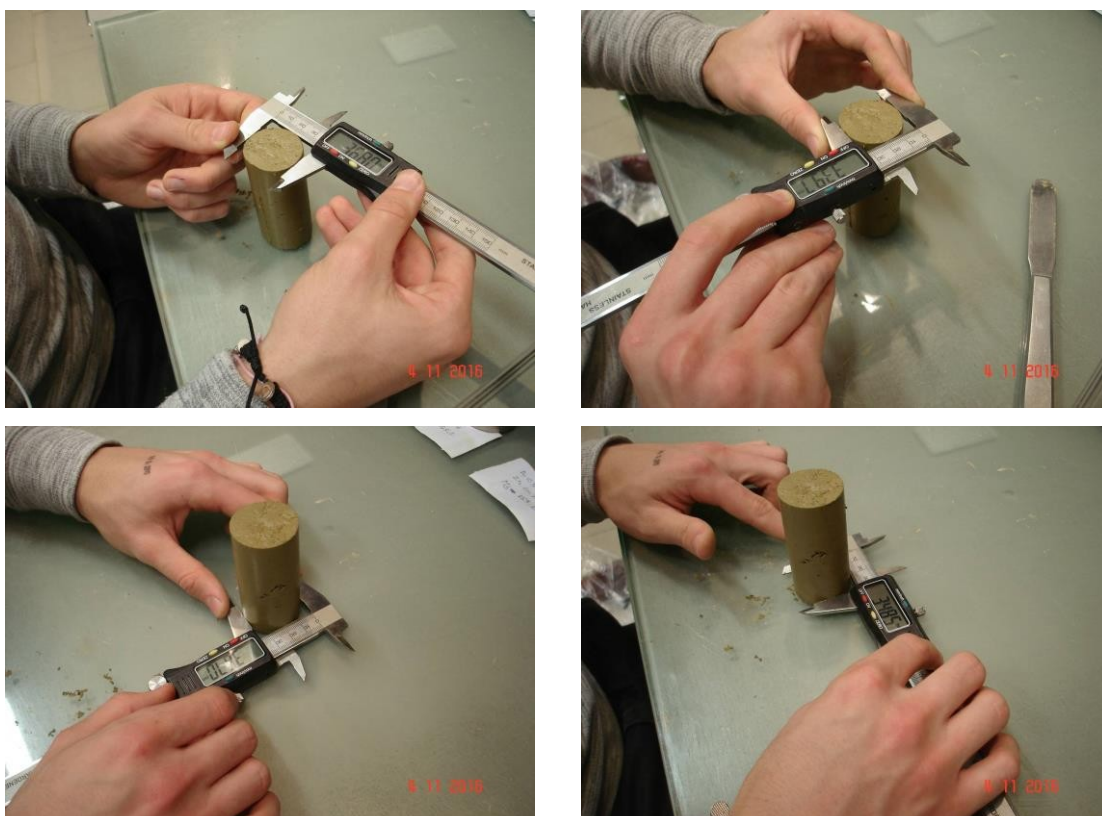


Svim uzorcima se mjeri promjer i visina, te vaga masa prije ispitivanja (slika 7.10.)



Slika 7.10. Izvađeni uzorci iz kalupa pripremljeni za mjerenje i vaganje

Na slici 7.11. prikazano je mjerenje promjera uzorka u dvije okomite osi promjera na vrhu i dnu uzorka, a za proračun uzimala se srednja vrijednost od 4 izmjerena promjera.



Slika 7.11. Mjerenje promjera uzorka na vrhu i dnu u dva okomita smjera

Visina uzorka je određena kao srednja vrijednost mjerenja dviju izvodnica (slika 7.12.)



Slika 7.12. Mjerenje visine uzorka u dvije okomite ravnine

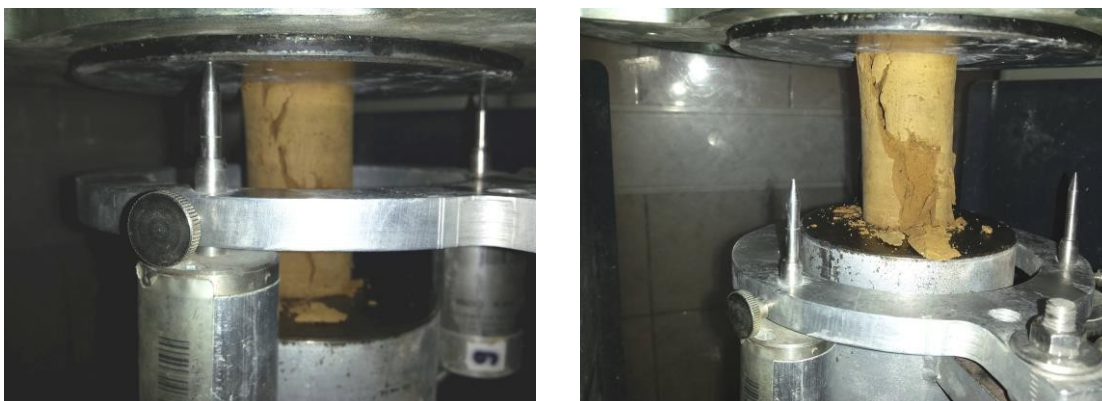
Nakon mjerenja i vaganja uzorak se pozicionira, odnosno centririra u postolje uređaja za jedoosni posmik. Uređaj mjeri tlačnu silu u osnom cilindru uređaja i pomak klipa u tri točke pomoću električnih osjetila za pomak tzv. LVDT, (slika 7.13.)



Slika 7.13. Umetanje uzorka na postolje uređaja i pozicioniranje LVDT

LVDT osjetila su namijenjeni mjerenju pomaka ili promjene položaja i pomoću njih je moguće precizno odrediti pomicanje donje ploče postolja (klizanje) u odnosu na gornju ploču uređaja. Kod ovih uređaja ne postoji električni dodir duljinom članka kojim se određuje promjena pomaka, a to znači dulji vijek trajanja i kvalitetnije podatke. Jednoosno smicanje uzorka se provodi prema normi ASTM D2166M-16 pri čemu je brzina smicanja kompresije 0.6 mm/min.

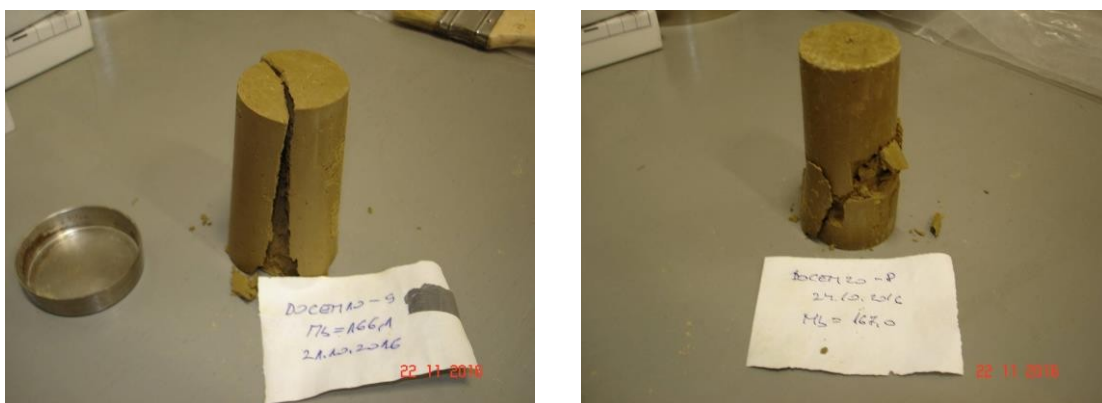
Na slici 7.14. prikazan je uzorak u uređaju tijekom i odmah nakon ispitivanja.



Slika 7.14. Uzorak u aparatu za vrijeme i nakon jednoosnog smicanja

Tijekom ispitivanja bilježe se pomaci i sile na uređaju za jednoosni posmik. Podaci o ispitivanju se pohranjuju u file na računalu uređaja, te se kasnije obrađuju.

Nakon završetka ispitivanja uzorak se vadi iz uređaja, te stavlja u peć na sušenje 24 sata na temperaturi od 105 ° C zbog određivanja (suhe) mase nakon pokusa. Ovosno o vrsti veziva nalazi se na razne oblike sloma uzorka (slika 7.15.). Posmične ravnine na kojima se događa jednoosni posmik su različite ovisno o vrsti kompozita.

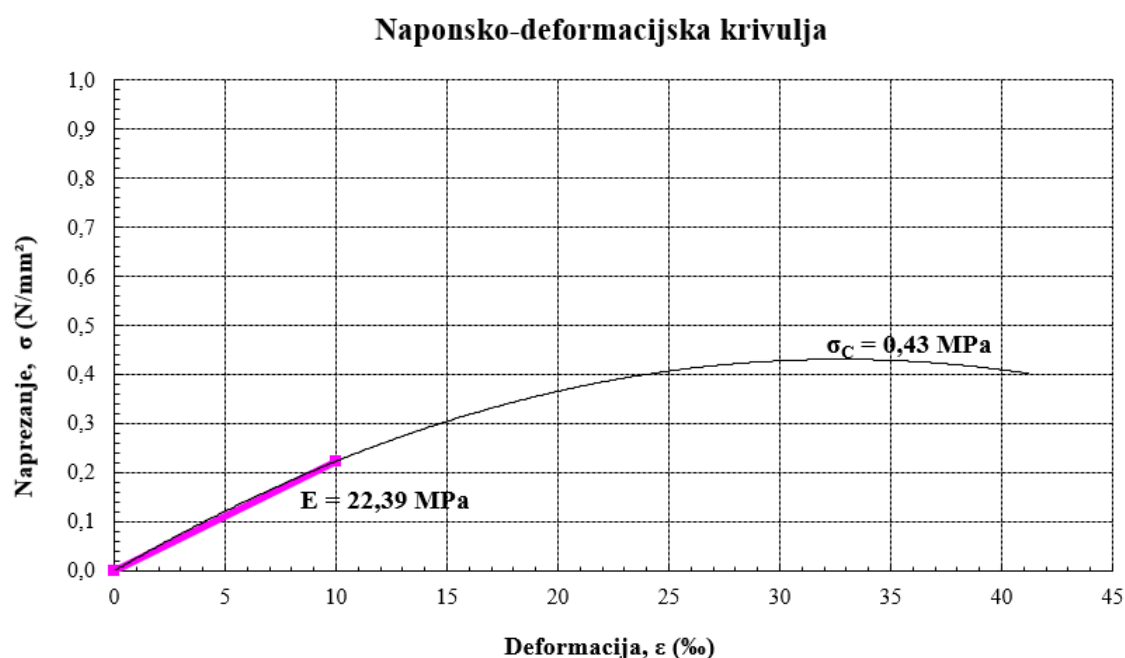


Slika 7.15. Uzorci nakon jednoosnog smicanja

## 8. REZULTATI ISPITIVANJA KOMPOZITNIH UZORAKA GLINE I VEZIVA

### 8.1. UVOD

U ovom poglavlju će se prikazati rezultati ispitivanja kompozitnih uzoraka gline i veziva. Prilikom obrade rezultata uzimana je najveća jednoosna čvrstoća uzorka u kopresiji, dok se za modu elastičnosti uzimao sekanti modul pri 1,0% jednoosne deformacije. Na slici 8.1 prikazan je postupak određivanja čvrstoće i modula elastičnosti. Svakom uzorku se nakon ispitivanja određivala vlažnost.

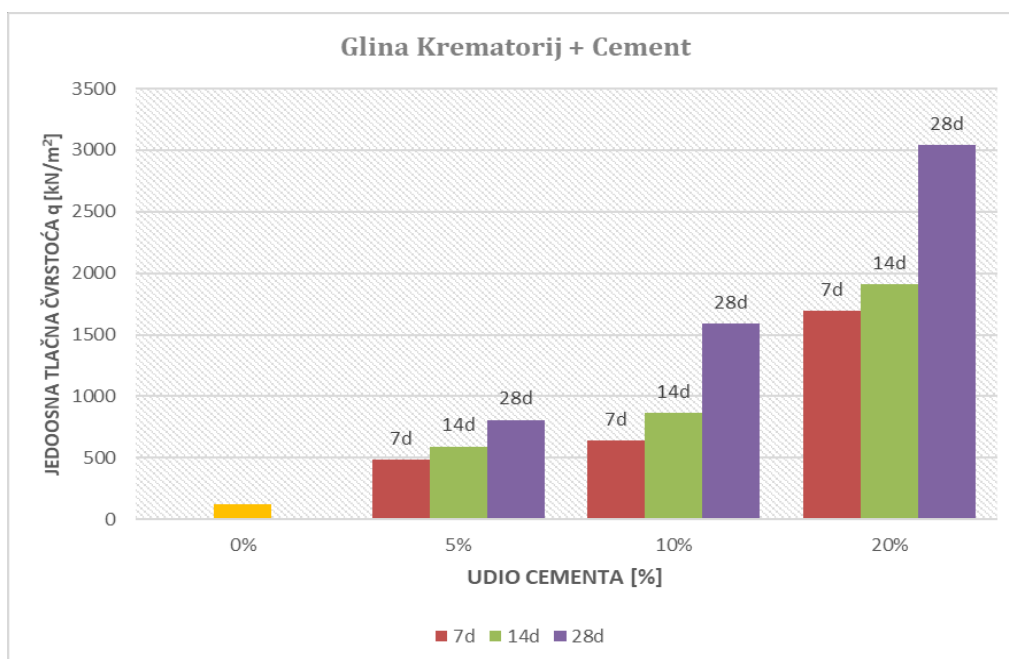


REZULTATI POKUSA	
Jednoosna tlačna čvrstoća, $\sigma$ (MPa)	0,43
Modul elastičnosti, E (MPa):	22,39
Vertikalni pomak (mm):	32,88

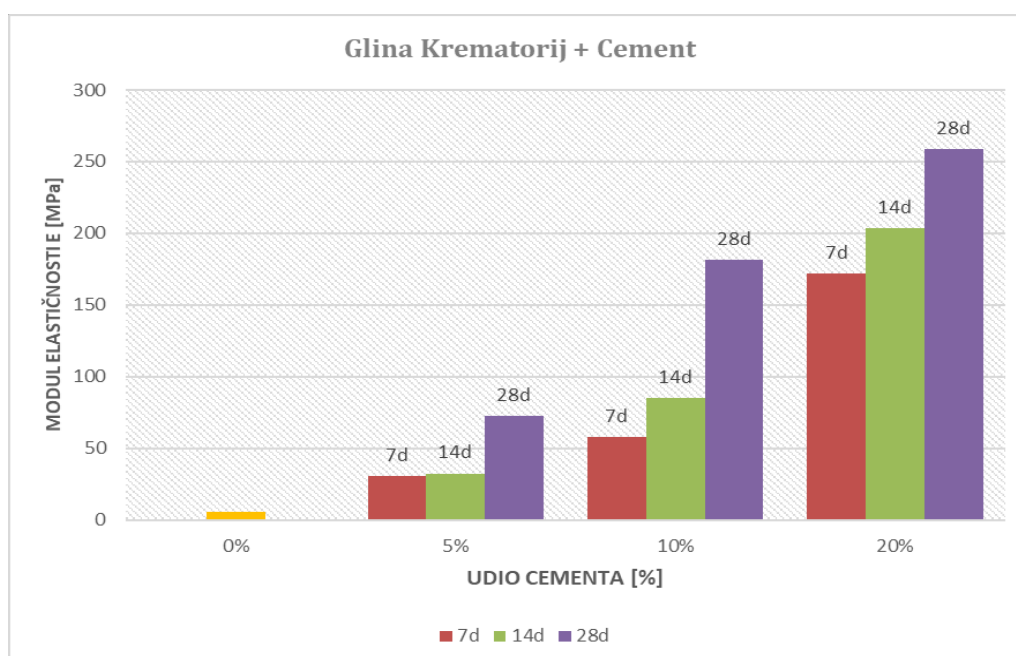
Slika 8.1. Grafički prikaz rezultata jednoosnog pokusa u laboratoriju GF

## 8.2. ISPITIVANJE UZORAKA KOMPOZITA GLINE I CEMENTA

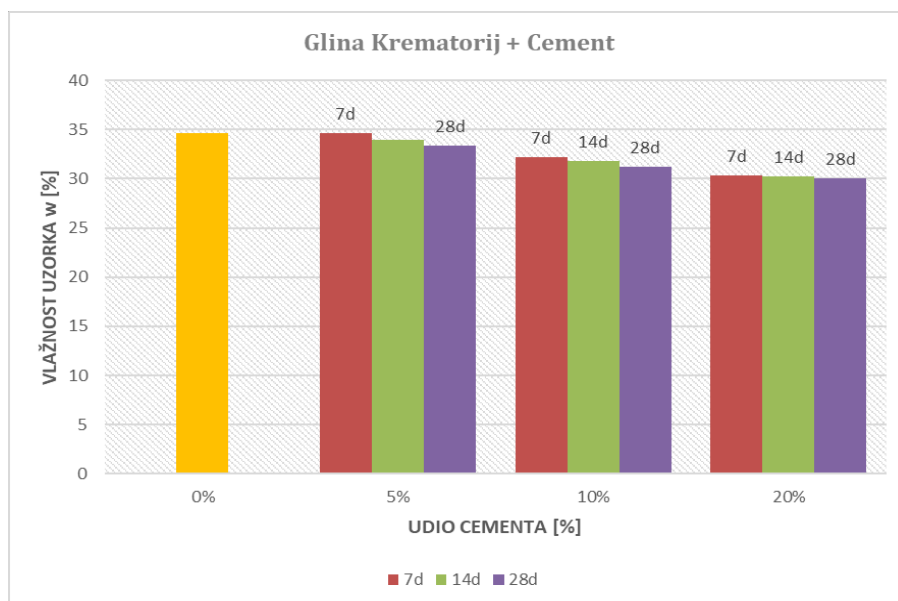
### GLINA KREMATORIJ



Slika 8.2. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij



Slika 8.3. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij



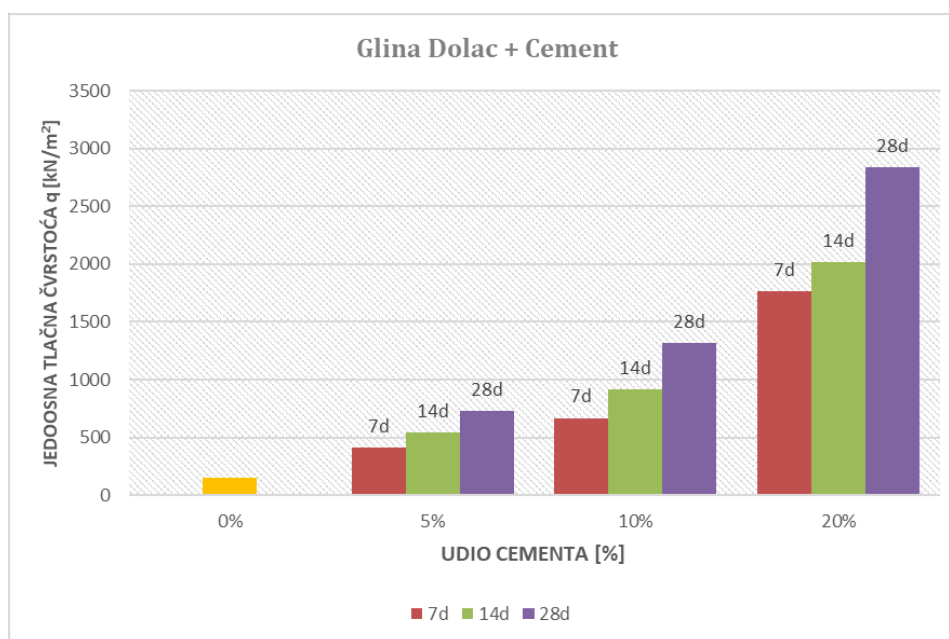
Slika 8.4. Rezultat ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij

Na slici 8.2. prikazani su rezultati ispitivanja gline iz Krematorija poboljšane s različitim udjelima cementa. Uzorci s 5% cementa pokazali su značajan porast jednoosne tlačne čvrstoće, i to 3.87 puta nakon 7 dana, 4.72 puta nakon 14 dana i 6.44 puta nakon 28 dana. Kada je dodano 10% cementa, jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka bila je veća za 5.10 puta nakon 7 dana, 6.86 puta nakon 14 dana i 12.67 puta nakon 28 dana. Uzorci s 20% cementa pokazali su najveći porast jednoosne tlačne čvrstoće, i to 13.48 puta nakon 7 dana, 15.24 puta nakon 14 dana i 24.23 puta nakon 28 dana.

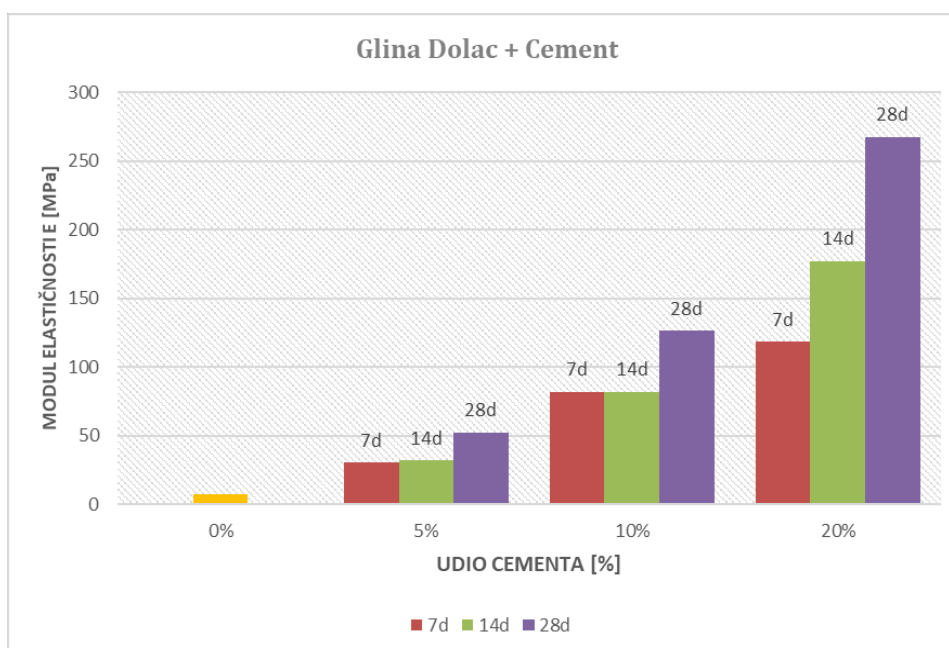
Na slici 8.3. prikazani su rezultati ispitivanja gline iz Krematorija poboljšane s 5% cementa, gdje je zabilježeno značajno povećanje modula elastičnosti. Povećanje je iznosilo 5.60 puta nakon 7 dana, 5.89 puta nakon 14 dana i 13.19 puta nakon 28 dana. Kada je dodano 10% cementa, uzorci gline imali su veći modul stišljivosti za 10.48 puta nakon 7 dana, 15.43 puta nakon 14 dana i 32.97 puta nakon 28 dana. Uzorci s 20% cementa pokazali su najveći porast modula stišljivosti, i to 31.24 puta nakon 7 dana, 36.99 puta nakon 14 dana i 47.07 puta nakon 28 dana.

Na slici 8.4. može se uočiti da kompoziti gline iz Krematorija poboljšani s 5% cementa pokazuju smanjenje vlažnosti, redom za 0.14% nakon 7 dana, 2% nakon 14 dana i 4% nakon 28 dana. Kada je dodano 10% cementa, vlažnost je smanjena za 7% nakon 7 dana, 8% nakon 14 dana i 10% nakon 28 dana. Uzorci s 20% cementa prikazuju najveći i gotovo konstantan pad vlažnosti, koji iznosi 12% nakon 7 dana, 12% nakon 14 dana i 13% nakon 28 dana.

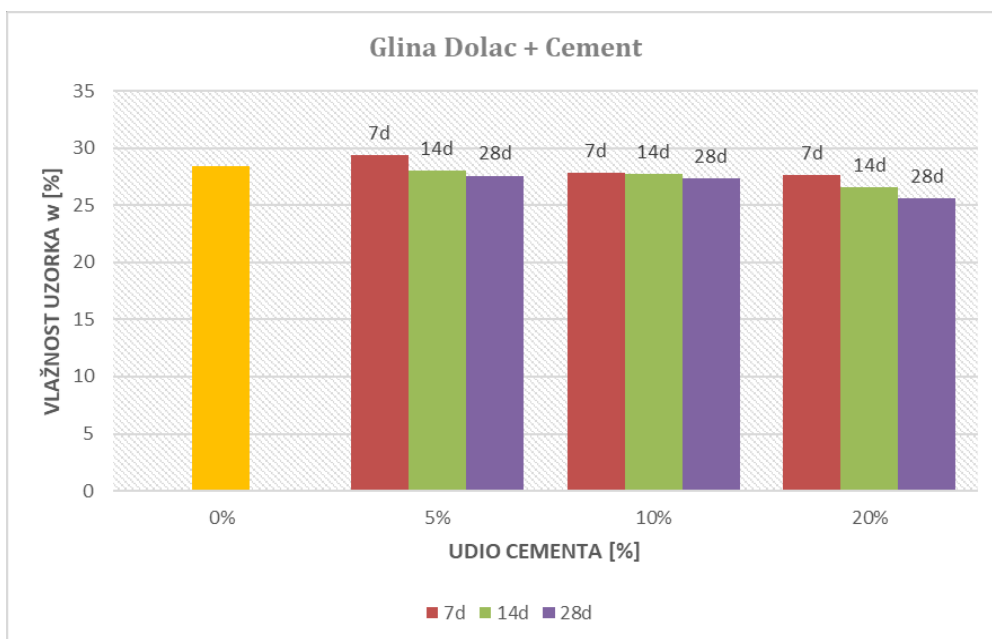
## GLINA DOLAC



Slika 8.5. Rezultat ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac



Slika 8.6. Rezultat ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac



Slika 8.7. Rezultat ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac

Na slici 8.5. vidi se da uzorci kompozita gline s lokaliteta Dolac, poboljšani s 5% cementa, pokazuju značajno povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, redom 2.63 puta (7 dana), 3.47 puta (14 dana) i 4.68 puta (28 dana). Pri dodavanju 10% cementa, jednoosna tlačna čvrstoća raste 4.31 puta (7 dana), 5.91 puta (14 dana) i 8.47 puta (28 dana). Uz dodatak od 20% cementa, jednoosna tlačna čvrstoća povećava se 11.36 puta (7 dana), 12.97 puta (14 dana) i 18.27 puta (28 dana) u odnosu na početnu vrijednost bez veziva.

Na slici 8.6. primjećuje se da uzorci kompozita gline s lokaliteta Dolac poboljšani s 5% cementa pokazuju povećanje modula elastičnosti za 4.29 puta (7 dana), 4.55 puta (14 dana), te 7.47 puta (28 dana). Pri dodavanju 10% cementa, uzorci gline imaju veći modul elastičnosti za 11.67 puta (7 dana), 11.67 puta (14 dana), te 18.01 puta (28 dana). Uzorci s 20% cementa pokazuju najveći porast modula elastičnosti, odnosno 16.85 puta (7 dana), 25.21 puta (14 dana), te 38.09 puta (28 dana).

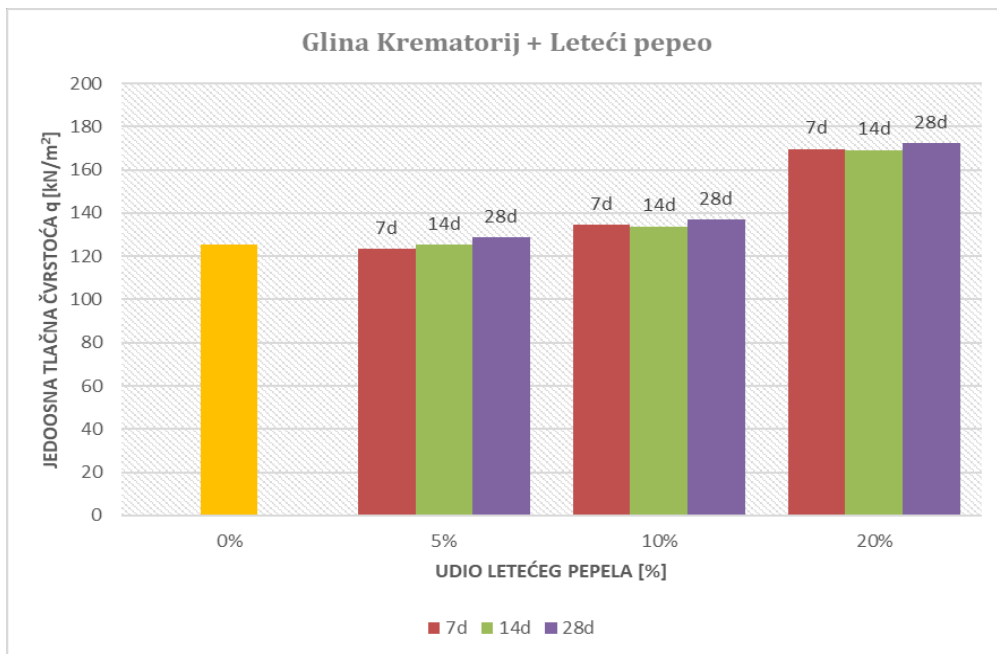
Slika 8.7. prikazuje utjecaj vlažnosti, gdje uzorci kompozita gline s lokaliteta Dolac poboljšani s 5% cementa ne pokazuju smanjenje vlažnosti, već, naprotiv, bilježe povećanje vlažnosti za 3% nakon 7 dana. Nakon toga, vlažnost opada za 1.5% nakon 14 dana i za 3% nakon 28 dana. Pri dodavanju 10% cementa, vlažnost uzorka opada za 2% nakon 7 dana, 2.5% nakon 14 dana, te 4% nakon 28 dana. Uz dodatak 20% cementa, vlažnost pada za 3% nakon 7 dana, 7% nakon 14 dana, te 10% nakon 28 dana u odnosu



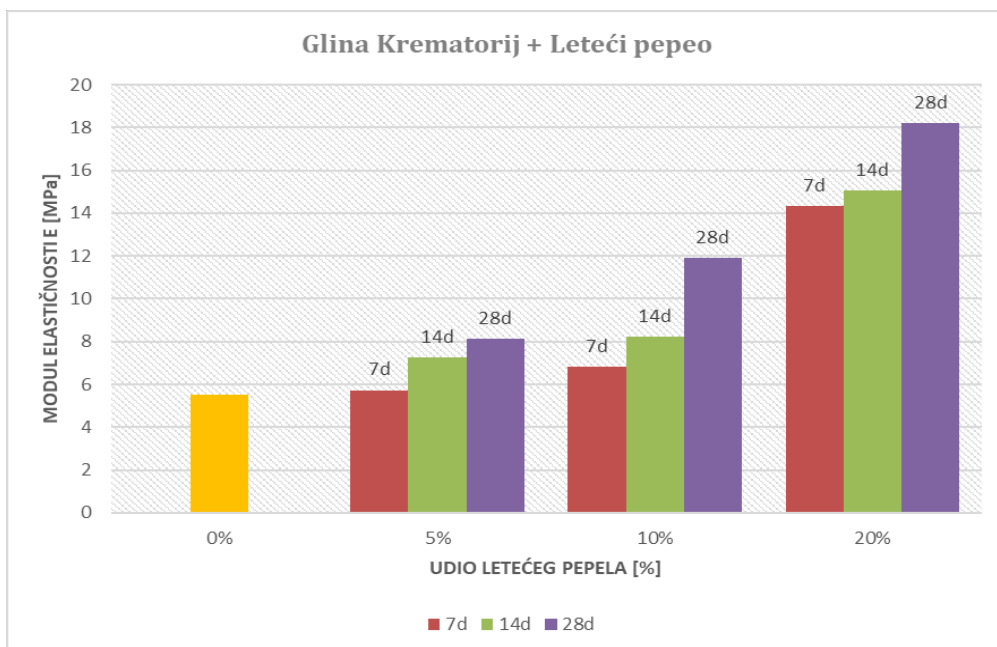
na početnu vlažnost uzorka bez veziva. Uočava se anomalija pri dodavanju 5% cementa, gdje kompozit pokazuje povećanje vlažnosti nakon 7 dana, a zatim vlažnost opada do 28 dana, kada postaje manja u odnosu na početnu vlažnost uzorka bez aditiva.

### 8.3. ISPITIVANJE UZORKA GLINE I LETEĆEG PEPELA

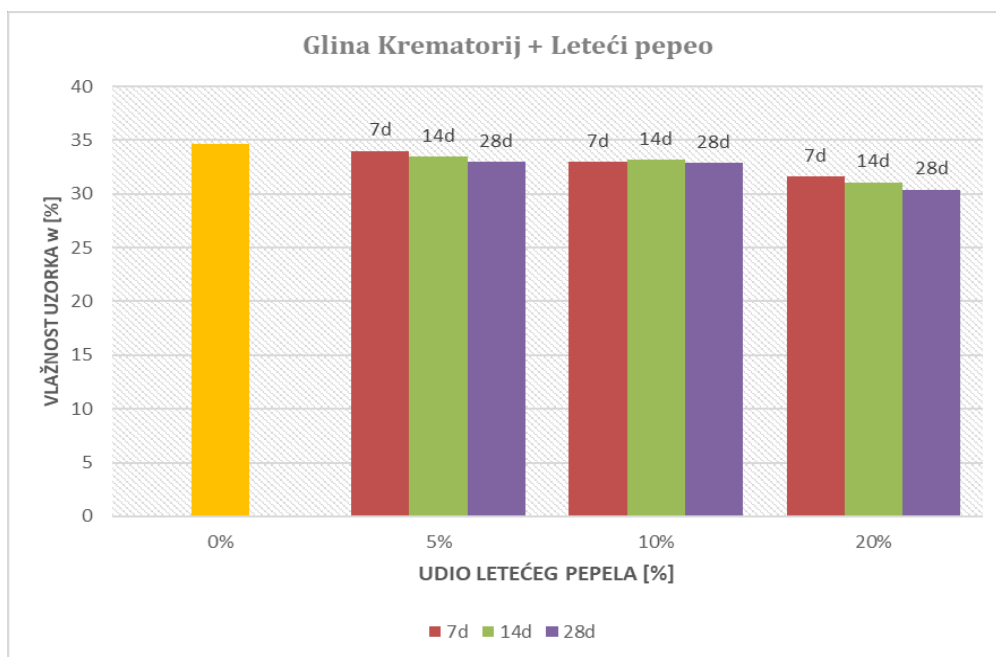
#### GLINA KREMATORIJ



Slika 8.8. Rezultat ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij



Slika 8.9. Rezultat ispitivanja modula stišljivosti uzorka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij



Slika 8.10. Rezultat ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij

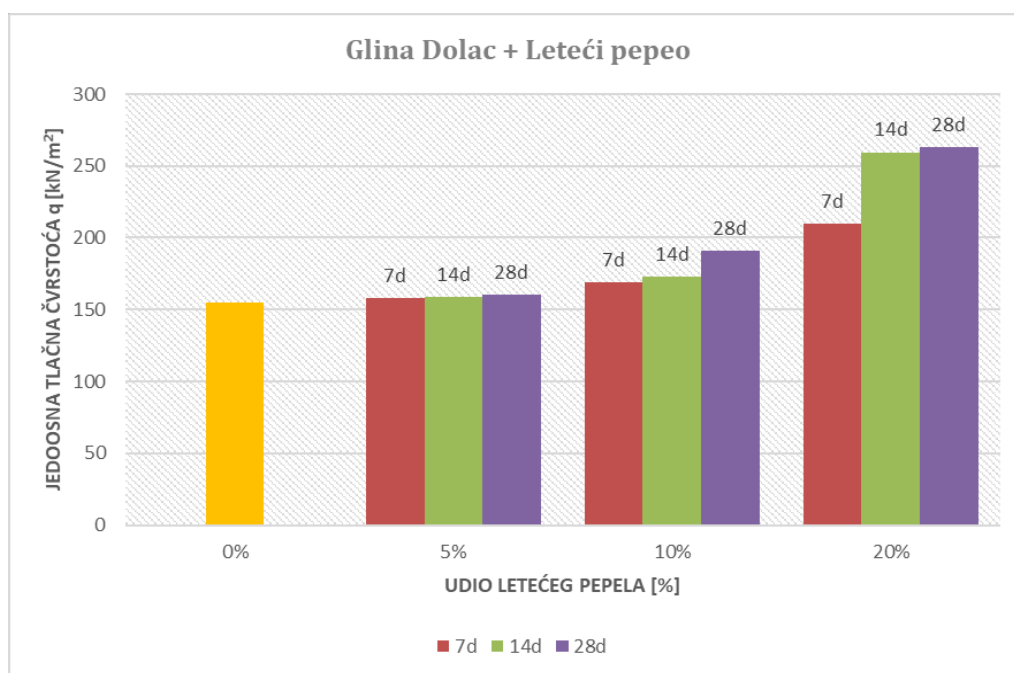
Na slici 8.8. može se primijetiti da kompoziti gline Krematorija poboljšani s 5% letećeg pepela ne pokazuju značajno povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, neovisno o starosti uzorka. Međutim, pri dodavanju 10% letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoća povećava se za 7.20% nakon 7 dana, 6.61% nakon 14 dana i 9.23% nakon 28 dana. Uz dodatak 20% letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoća raste za 35.22% nakon 7 dana, 34.83% nakon 14 dana i 37.28% nakon 28 dana u odnosu na početnu vrijednost bez veziva.

Na slici 8.9. vidljivo je da kompoziti gline Krematorija poboljšani s 5% letećeg pepela pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva, i to za 4.1% nakon 7 dana, 32.05% nakon 14 dana i 47.95% nakon 28 dana. Pri dodavanju 10% letećeg pepela, modul elastičnosti se povećava za 6.80% nakon 7 dana, 49.55% nakon 14 dana i 116.60% nakon 28 dana. Uz dodatak 20% letećeg pepela, modul elastičnosti raste za 14.33% nakon 7 dana, 173.86% nakon 14 dana i 230.91% nakon 28 dana u odnosu na početnu vrijednost bez veziva.

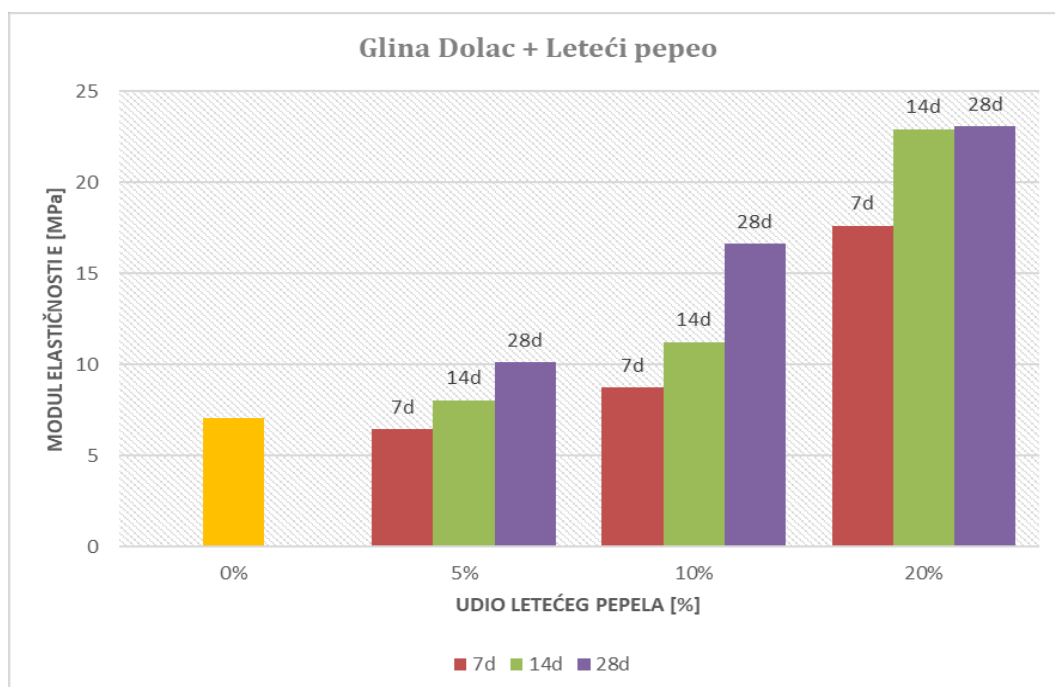
Na slici 8.10. primjećuje se da kompoziti gline Krematorija poboljšani s 5% letećeg pepela gube na vlažnosti za 1.81% nakon 7 dana, 3.31% nakon 14 dana i 4.8% nakon 28 dana. Pri dodavanju 10% letećeg pepela, vlažnost uzorka pada za 4.85% nakon 7 dana, 4.16% nakon 14 dana i 5.12% nakon 28 dana, dok pri dodavanju 20% letećeg pepela vlažnost opada za 8.77% nakon 7 dana, 10.24% nakon 14 dana i 12.21% nakon 28 dana

u odnosu na početnu vlažnost uzorka bez veziva. Uočava se anomalija pri dodavanju 10% letećeg pepela, gdje kompozit pokazuje početno povećanje smanjene vlažnosti do 7 dana, zatim vlažnost raste do 14 dana, da bi ponovno opala do 28 dana, pri čemu ostaje niža u odnosu na početnu vlažnost uzorka bez aditiva.

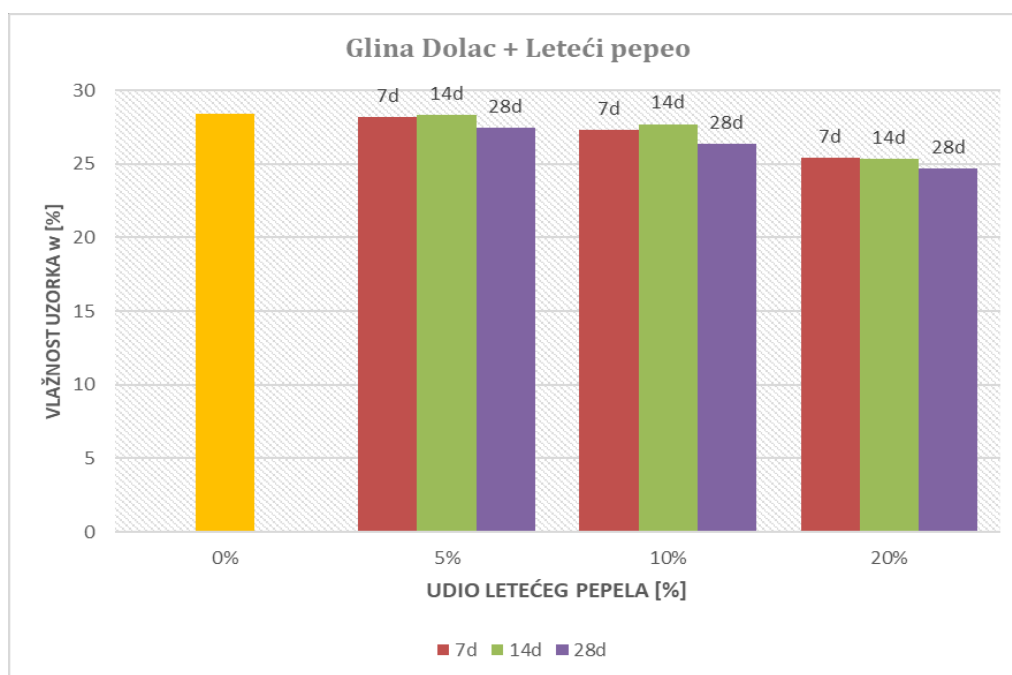
## GLINA DOLAC



Slika 8.11. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline s lokaliteta Dolac



Slika 8.12. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline s lokaliteta Dolac



Slika 8.13. Rezultat ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline s lokaliteta Dolac

Na slici 8.11. može se vidjeti da kompoziti gline Dolac poboljšani s 5% letećeg pepela pokazuju porast jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, i to 1.66% nakon 7 dana, 2.12% nakon 14 dana, te 3.14% nakon 28 dana. Pri dodavanju 10% letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoća povećava se za 9.04% nakon 7 dana, 11.37% nakon 14 dana, i 23.02% nakon 28 dana. Uz dodatak 20% letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoća raste za 35.23% nakon 7 dana, 67.20% nakon 14 dana, te 69.58% nakon 28 dana u odnosu na početnu vrijednost uzorka bez veziva.

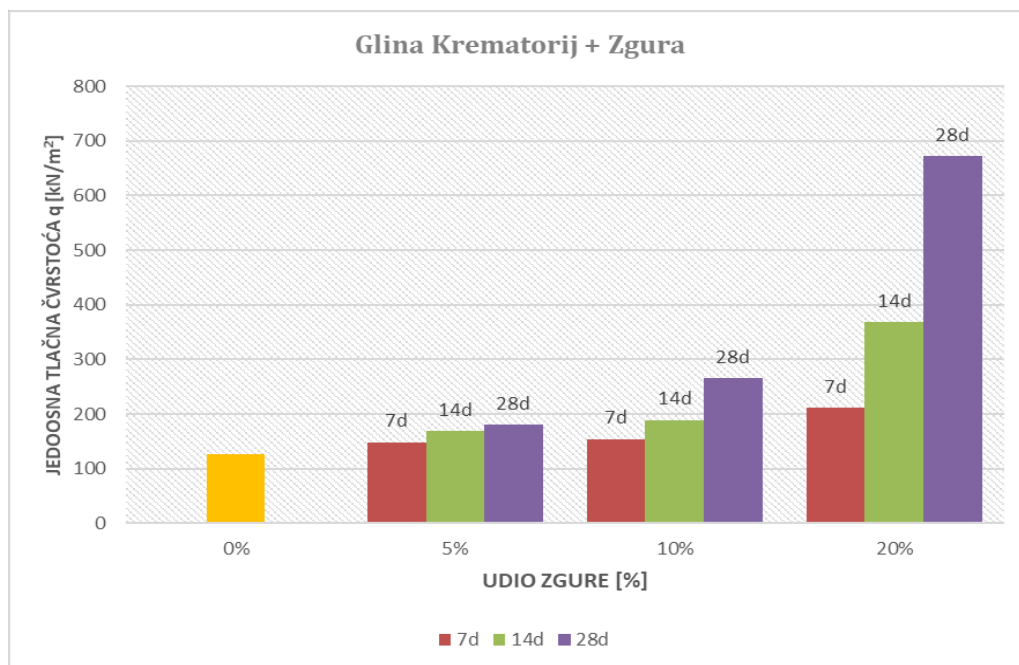
Na slici 8.12. primjećuje se da kompoziti gline Krematorija poboljšani s 5% letećeg pepela pokazuju promjene u modulu elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva, pri čemu se javlja pad od 8.19% nakon 7 dana, a zatim porast za 14.35% nakon 14 dana, te 44.25% nakon 28 dana. Pri dodavanju 10% letećeg pepela, modul elastičnosti se povećava za 24.56% nakon 7 dana, 59.91% nakon 14 dana, i 136.54% nakon 28 dana. Uz dodatak 20% letećeg pepela, modul elastičnosti raste za 150.77% nakon 7 dana, 226.22% nakon 14 dana, te 228.38% nakon 28 dana u odnosu na početnu vrijednost modula elastičnosti uzorka bez veziva.

Slika 8.13. pokazuje da kompoziti gline Krematorija poboljšani s 5% letećeg pepela gube vlažnost za 0.92% nakon 7 dana, 0.43% nakon 14 dana, te 3.43% nakon 28 dana.

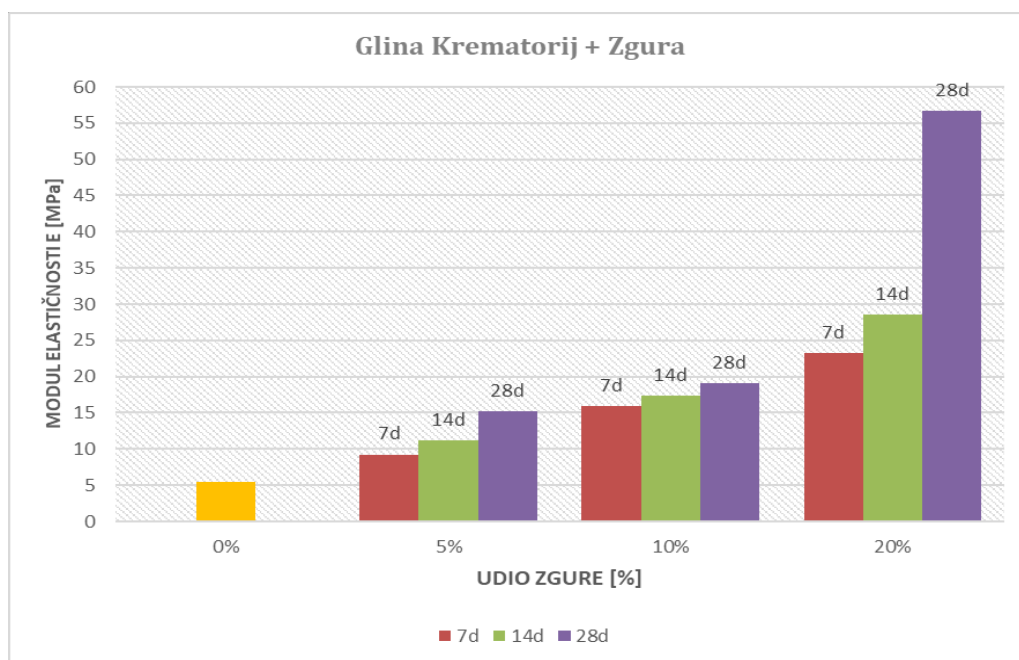
Pri dodavanju 10% letećeg pepela, vlažnost uzorka pada za 4.02% nakon 7 dana, 2.49% nakon 14 dana, i 7.18% nakon 28 dana. Pri dodavanju 20% letećeg pepela vlažnost opada za 10.61% nakon 7 dana, 10.75% nakon 14 dana, te 13.22% nakon 28 dana u odnosu na početnu vlažnost uzorka bez veziva. Uočava se anomalija pri dodavanju 5% i 10% letećeg pepela, gdje kompozit pokazuje smanjenje vlažnosti do 7 dana, nakon čega vlažnost raste do 14 dana, da bi naknadno ponovno opala do 28 dana, pri čemu ostaje manja u odnosu na početnu vlažnost uzorka bez aditiva.

## 8.4. ISPITIVANJE UZORKA GLINE I ZGURE

### GLINA KREMATORIJ

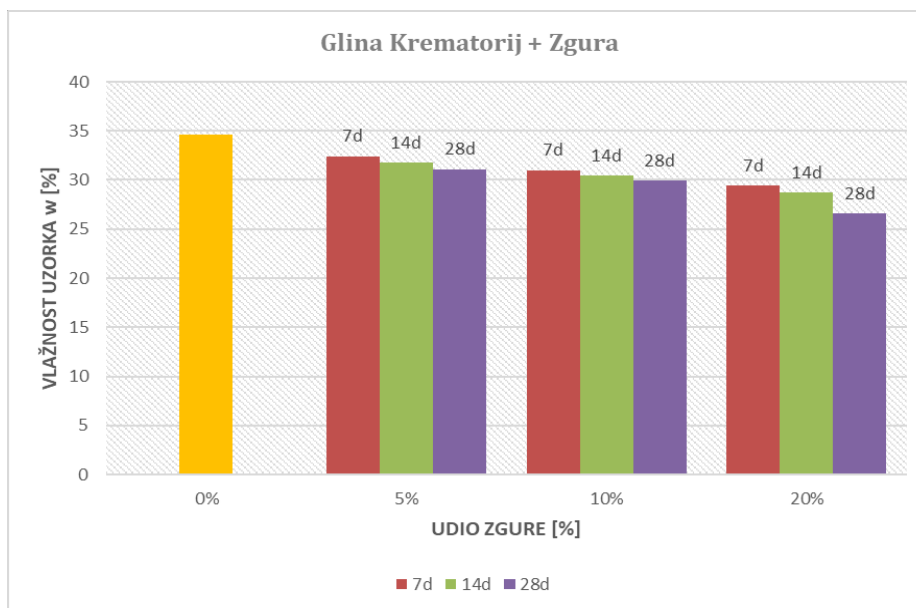


Slika 8.14. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i zgure s lokaliteta Krematorij



Slika 8.15. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline i zgure s lokaliteta Krematorij





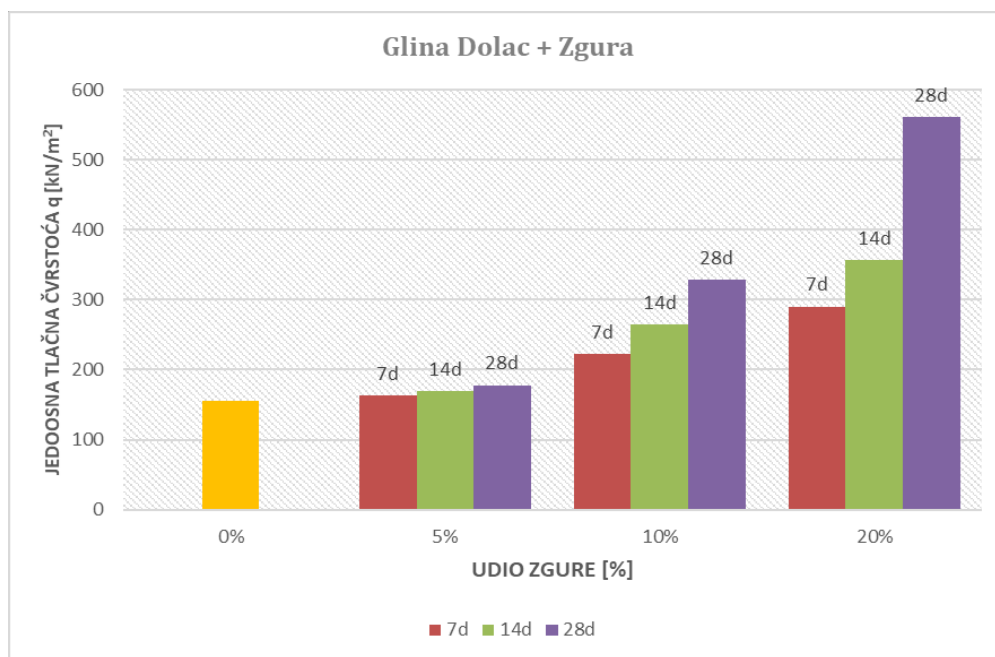
Slika 8.16. Rezultati ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i zgre s lokaliteta Krematorij

Na slici 8.14. prikazano je da kompoziti gline Krematorija poboljšani s 5% zgre pokazuju značajno povećanje jednoosne tlačne čvrstoće, i to za 18.37% nakon 7 dana, 34.83% nakon 14 dana, te 43.53% nakon 28 dana. Pri dodavanju 10% zgre, jednoosna tlačna čvrstoća se povećava za 23% nakon 7 dana, 50.69% nakon 14 dana, te 112.15% nakon 28 dana. Uz dodatak 20% zgre, jednoosna tlačna čvrstoća raste za 68.22% nakon 7 dana, 192.77% nakon 14 dana, te 5.35 puta nakon 28 dana u odnosu na početnu vrijednost uzorka bez veziva.

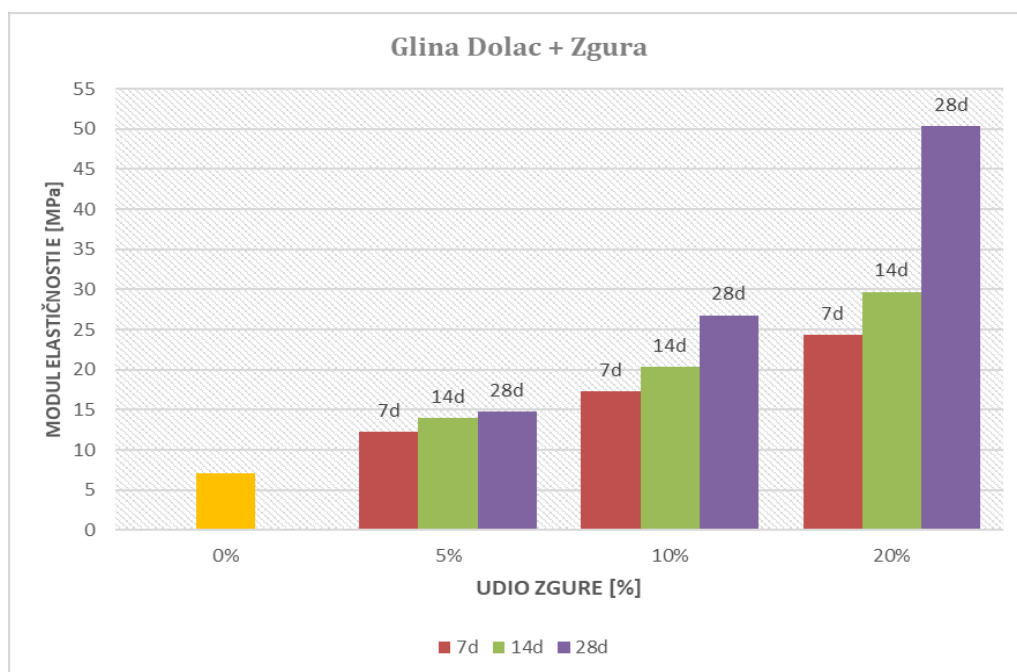
Na slici 8.15. vidljivo je da kompoziti gline Krematorija poboljšani s 5% zgre pokazuju značajan porast modula elastičnosti, i to za 68.27% nakon 7 dana, 103.73% nakon 14 dana, te 176.02% nakon 28 dana. Pri dodavanju 10% zgre, modul elastičnosti se povećava 2.89 puta nakon 7 dana, 3.16 puta nakon 14 dana, te 3.46 puta nakon 28 dana. Uz dodatak 20% zgre, modul elastičnosti raste 4.23 puta nakon 7 dana, 5.19 puta nakon 14 dana, te 10.30 puta nakon 28 dana u odnosu na početnu vrijednost modula elastičnosti uzorka bez veziva.

Slika 8.16. pokazuje da kompoziti gline Krematorija poboljšani s 5% zgre gube vlažnost za 6.36% nakon 7 dana, 8.23% nakon 14 dana, te 10.20% nakon 28 dana. Pri dodavanju 10% zgre, vlažnost uzorka opada za 10.43% nakon 7 dana, 12.01% nakon 14 dana, te 13.51% nakon 28 dana. Pri dodavanju 20% zgre, vlažnost pada za 15.05% nakon 7 dana, 17.15% nakon 14 dana, te 23.22% nakon 28 dana u odnosu na početnu vlažnost uzorka bez veziva.

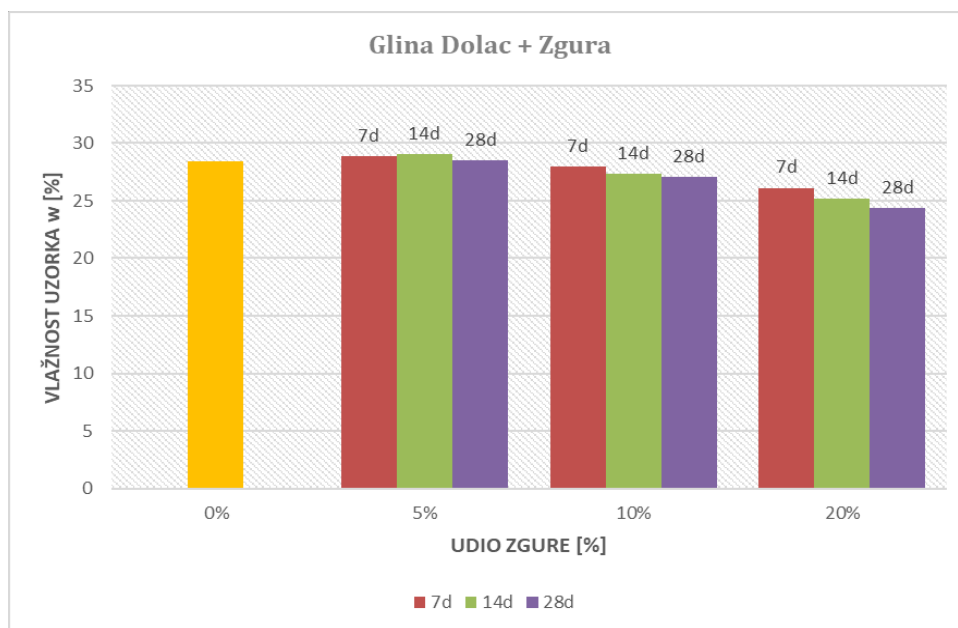
## GLINA DOLAC



Slika 8.17. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzorka kompozita gline i zgre s lokaliteta Dolac



Slika 8.18. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti uzorka kompozita gline i zgre s lokaliteta Dolac



Slika 8.19. Rezultati ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i zgre s lokaliteta Dolac

Na slici 8.17. prikazano je da kompoziti gline Dolca poboljšani s 5% zgre pokazuju značajno povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, i to za 5.05% (7 dana), 9.41% (14 dana), te 14.69% (28 dana). Pri dodavanju 10% zgre, jednoosna tlačna čvrstoća povećava se za 43.14% (7 dana), 70.45% (14 dana), te 111.39% (28 dana). Uz dodatak 20% zgre, jednoosna tlačna čvrstoća poraste za 86.95% (7 dana), 129.35% (14 dana), te 3.61 puta (28 dana) u odnosu na početnu vrijednost uzorka bez veziva.

Na slici 8.18. vidljivo je da kompoziti gline Dolca poboljšani s 5% zgre pokazuju značajan porast modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva, i to za 74.14% (7 dana), 99.05% (14 dana), te 109.49% (28 dana). Pri dodavanju 10% zgre, modul elastičnosti se povećava za 2.46 puta (7 dana), 2.90 puta (14 dana), te 3.81 puta (28 dana). Uz dodatak 20% zgre, modul elastičnosti poraste za 3.46 puta (7 dana), 4.23 puta (14 dana), te 7.17 puta (28 dana) u odnosu na početnu vrijednost bez veziva.

Na slici 8.19. primjećuje se da kompoziti gline Dolca poboljšani s 5% zgre pokazuju povećanje vlažnosti za 1.57% (7 dana), 2.20% (14 dana), te 0.24% (28 dana). Pri dodavanju 10% zgre, kompoziti pokazuju pad vlažnosti od 1.57% (7 dana), 3.91% (14 dana), te 4.85% (28 dana), a pri dodavanju 20% zgre vlažnost pada za 8.12% (7 dana), 11.52% (14 dana), te 14.16% (28 dana) u odnosu na početnu vlažnost uzorka bez veziva.

## 8.5. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja uzoraka zagrebačke gline s lokaliteta groblja Krematorij i tržnice Dolac, poboljšane različitim vezivima: cementom, letećim pepelom i zgurom.

Ukupno je za obje lokacije ispitano 432 uzorka kompozita gline s različitim vezivima, pri čemu su ispitani uzorci starosti 7, 14 i 28 dana. Analizirani su i razmotreni rezultati utjecaja tipa i količine pojedinog veziva, kao i starosti uzorka, na mehanička svojstva jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kompozita, te na fizikalna svojstva vlažnosti uzorka.

Iz rezultata je vidljivo da kompoziti gline i cementa pokazuju najveći prirast jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti s povećanjem udjela cementa. Slijede ih kompoziti gline i zgure, dok kompoziti gline i letećeg pepela pokazuju najmanji prirast jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Također, kod kompozita s cementom najizraženiji je utjecaj starosti uzorka na porast jednoosne tlačne čvrstoće, dok je kod uzoraka s letećim pepelom taj utjecaj najmanji.

Osvrćući se na mjeru krutosti, iz rezultata je vidljivo da kompoziti gline i cementa pokazuju najveći prirast modula elastičnosti s povećanjem udjela cementa. Slijede ih kompoziti gline i zgure, dok kompoziti gline i letećeg pepela imaju najmanji prirast modula elastičnosti. Također, kod kompozita s cementom uočava se i najveći utjecaj starosti uzorka na porast modula elastičnosti, dok je kod uzoraka s letećim pepelom taj utjecaj najmanji.

Vlažnost ispitanih uzoraka dosljedno opada s povećanjem udjela veziva i s produljenjem vremena sazrijevanja uzorka. Rezultati laboratorijskih ispitivanja daju preliminarni uvid u ponašanje osnovnih fizikalno-mehaničkih parametara kompozita gline i različitih veziva.

## **9. ANALIZE REZULTATA I NOVE SPOZNAJE PONAŠANJA ZAGREBAČKE GLINE POBOLJŠANE RAZNIM VEZIVIMA**

### **9.1. UVOD**

U ovom poglavlju su prikazane analize rezultata ispitivanja kompozita zagrebačke gline i veziva uz nove spoznaje ponašanja mehaničkih i fizikalnih karakteristika zagrebačke gline.

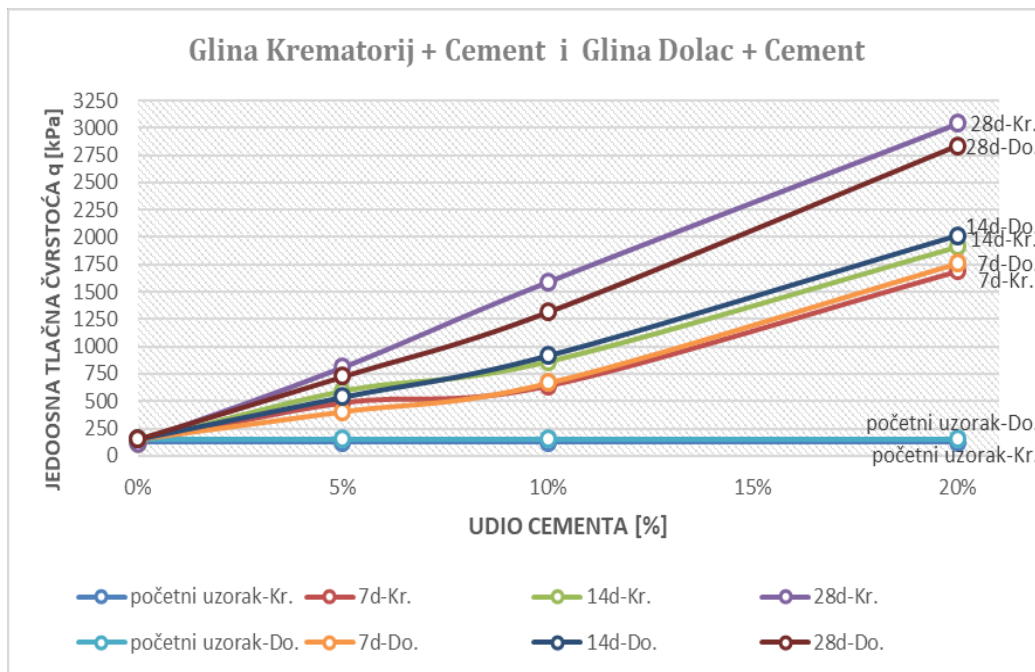
Analizirani su i diskutirani rezultati utjecaja starosti kompozitnog uzorka od 7, 14 i 28 dana zatim vrste i količine veziva od 5%, 10% i 20% u uzorku na mehaničke karakteristike jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti te fizikalno svojstvo vlažnosti.

U prvom dijelu su navedene analize rezultata ispitivanja kompozita zasebno za svako vezivo u pogledu odnosa količine veziva i vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i vlažnosti. Nadalje u posebnom poglavlju je prikazana analiza normalizacijom jednoosne čvrstoće, modula elastičnosti i vlažnosti. Kasnije je u posebnom poglavlju prikazana analiza rezultata u vremenskoj domeni za 7, 14 i 28 dana za svaki kompozit zasebno.

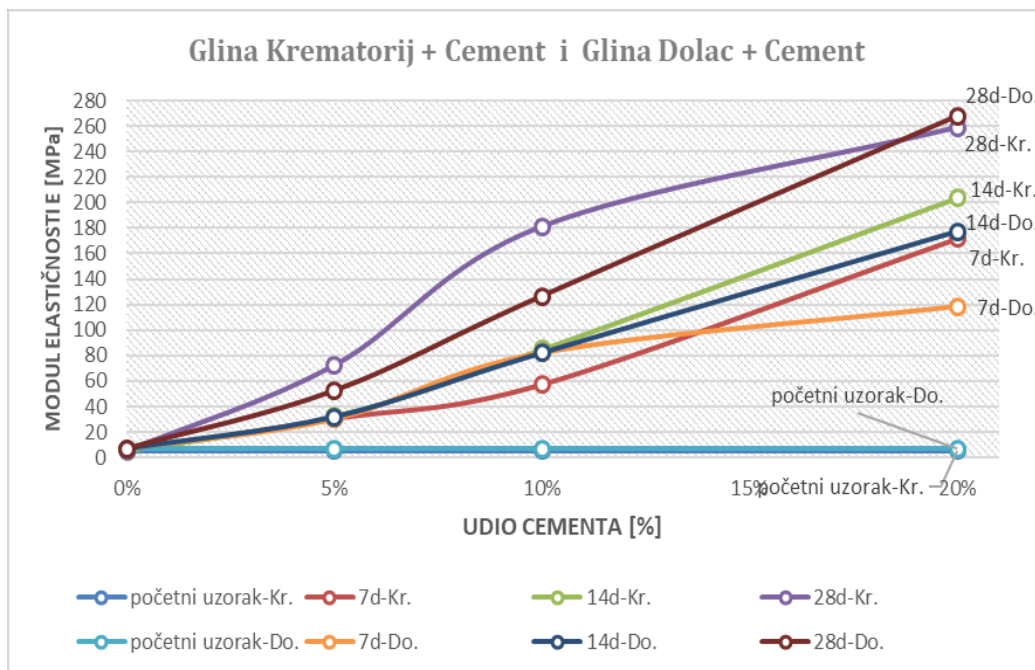
Posebno je prikazana analiza utjecaja vlažnosti kompozit gline i svakog veziva posebno. Na kraju su prikazani rezultati karakterističnog ponašanja čvrstoće i krutosti zagrebačke gline poboljšane raznim vezivima za oba lokaliteta.

## 9.2. ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA KOMPOZITA

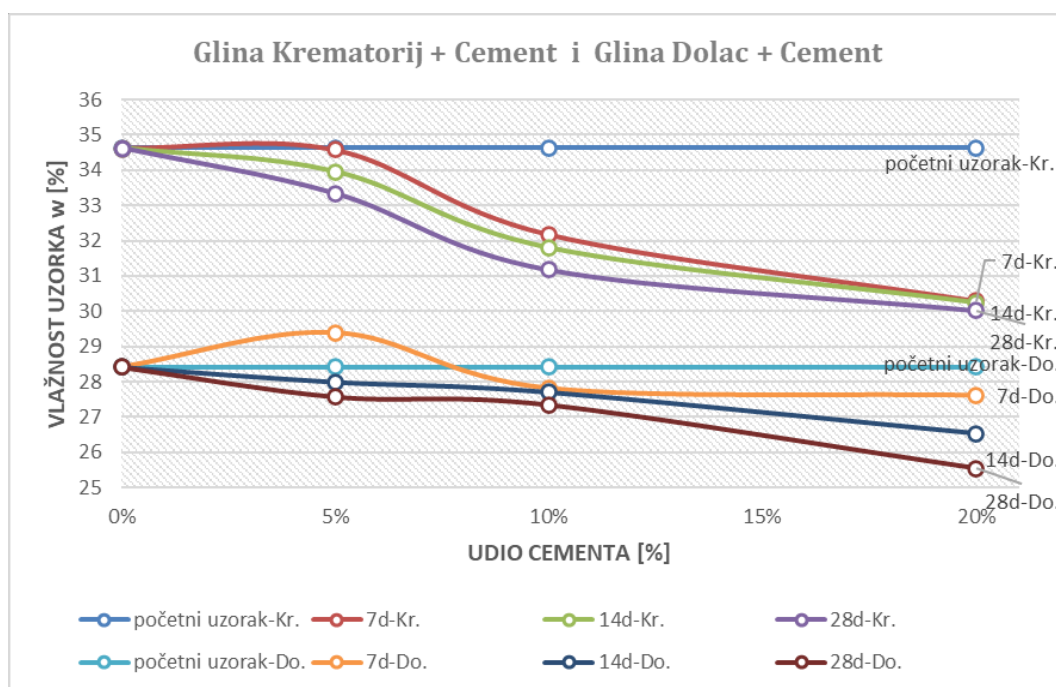
### ANALIZE KOMPOZITA GLINE I CEMENTA



Slika 9.1. Analize ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i cementa, Krematorij i Dolac



Slika 9.2. Analiza ispitivanja modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i cementa, Krematorij i Dolac



Slika 9.3. Analiza ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i cementa, Krematorij i Dolac

Na slici 9.1. može se uočiti da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca pokazuju značajan prirast jednoosne tlačne čvrstoće već pri dodatku 5% veziva dok je pri dodatku 10% cementa prirast evidentan, a najveći prirast se uočava kod dodatka veziva od 20% u odnosu na nepoboljšani uzorak. Prirast jednoosne tlačne čvrstoće se uočava i sa povećanjem starosti uzorka za isti postotak veziva u kompozitu gline za obe lokacije. Također vidljivo je da najveći prirast jednoosne tlačne čvrstoće za kompozite gline Krematorij i gline Dolca se uočava pri 20% veziva nakon 28 dana gdje se kompozit gline Krematorij poveća za 24.23 puta, dok se kompozit gline Dolca poveća za 18.27 puta u odnosu na uzorke bez veziva.

Slika 9.2. prikazuje da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca pokazuju značajan prirast modula elastičnosti već pri dodatku 5% veziva dok je pri dodatku 10% cementa prirast evidentan, a najveći prirast se uočava kod dodatka veziva od 20% u odnosu na nepoboljšani uzorak. Prirast modula elastičnosti se uočava i sa povećanjem starosti uzorka za isti postotak veziva u kompozitu gline za obe lokacije.

Najveći prirast modula elastičnosti za kompozite gline Krematorij i gline Dolca se uočava pri 20% veziva nakon 28 dana gdje se kompozit gline Krematorij poveća za

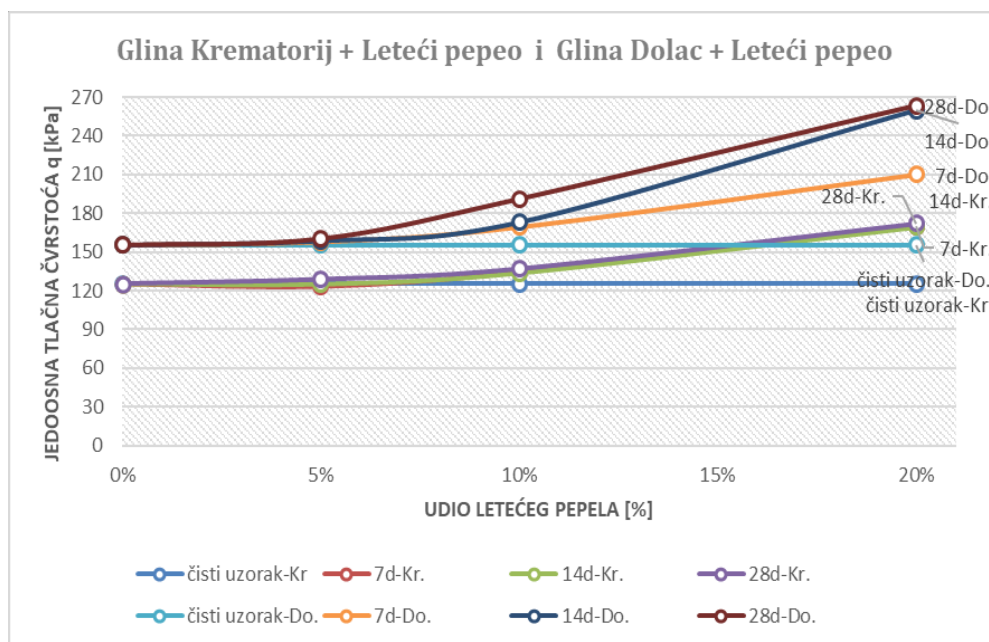
47.07 puta, dok se kompozit gline Dolca poveća za 38.09 puta u odnosu na uzorke bez veziva.

Na slici 9.3. primjećuje se da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca pokazuju redukciju vlažnosti ispitanih uzoraka u odnosu na prirodnu vlažnost uzoraka uslijed mješanja gline sa cementom. Kompoziti gline Krematorij imaju veću redukciju vlažnosti neovisno o starosti uzorka pri svim postotcima dodavanja veziva u odnosu na kompozite gline Dolca kod kojih se pri 5% veziva uočava povećanje vlažnosti od 3% pri starosti od 7 dana, nakon čega vlažnost opada i biva manja nego početna vlažnost uzorka bez veziva.

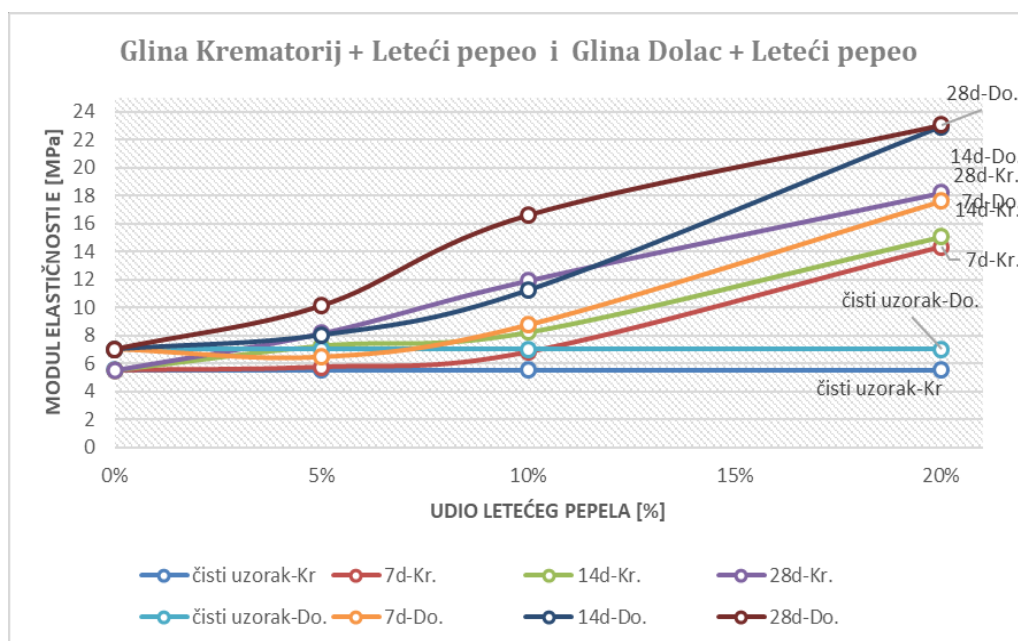
Kod kompozita gline Dolca pri starosti od 7 dana redukcija vlažnosti pri 20% veziva je nešto veća od pola postotka 0.72% u odnosu na vlažnost pri 10% veziva. Uočava se kako je redukcija vlažnosti veća kod kompozita sa lokacije Krematorij.



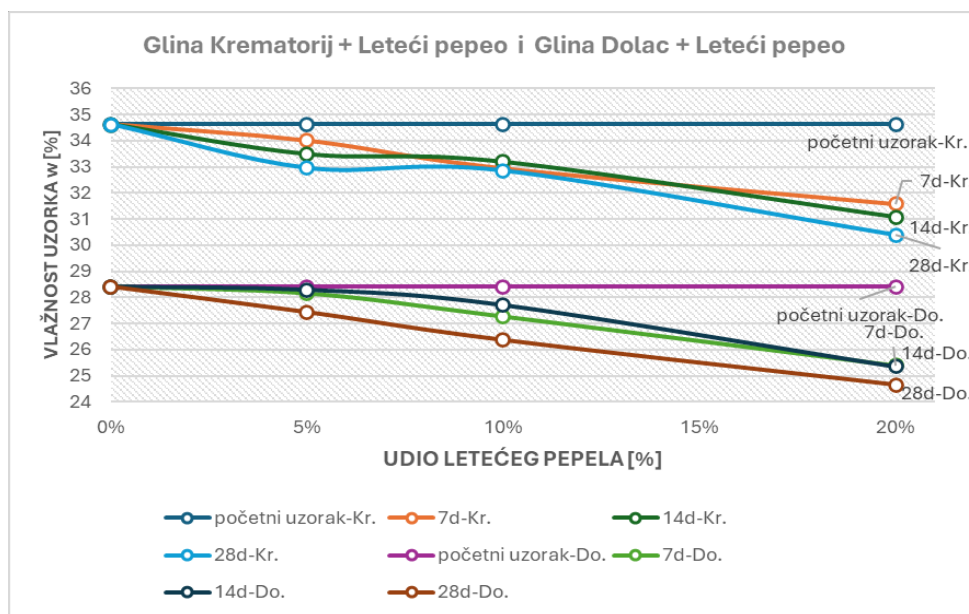
### ANALIZE KOMPOZITA GLINE I LETEĆEG PEPELA



Slika 9.4. Analize ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i letećeg pepela, Krematorij i Dolac



Slika 9.5. Analize ispitivanja modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela, Krematorij i Dolac



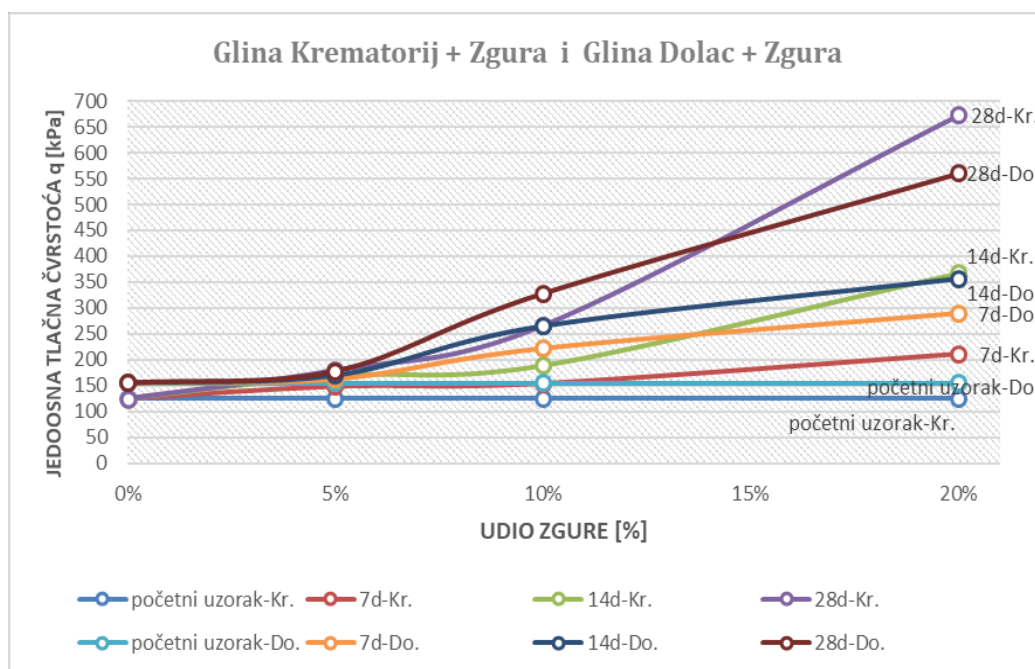
Slika 9.6. Analize ispitivanja vlažnosti uzorka kompozita gline i letećeg pepela, Krematorij i Dolac

Slika 9.4. prikazuje da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca nemaju značajan prirast jednoosne tlačne čvrstoće pri dodatku 5% veziva, prirast se uočava pri dodatku od 10% veziva dok se značajan prirast jednoosne tlačne čvrstoće uočava pri dodatku od 20% veziva neovisno o starosti kompozita. Anomalije koje se mogu uočiti su pad jednoosne tlačne čvrstoće pri 5% veziva kod kompozita gline Krematorij pri starosti uzorka od 7 dana. Također uočava se nejednolik prirast pri 20% veziva kod kompozita gline Dolca za starost uzorka od 7 dana u odnosu na starost uzorka 14 i 28 dana.

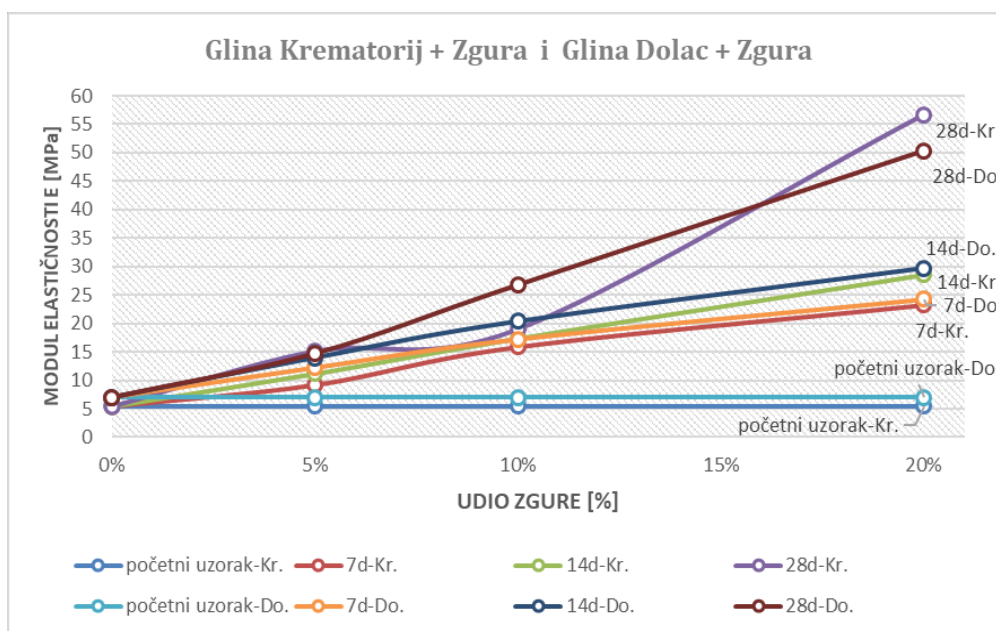
Na slici 9.5. uočava se da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca pokazuju prirast modula elastičnosti pri dodatku 5% veziva, veći prirast se uočava pri dodatku od 10% veziva dok se značajan prirast jednoosne tlačne čvrstoće uočava pri dodatku od 20% veziva neovisno o starosti kompozita. Može se uočiti da kod kompozita gline Dolca pri 20% veziva modul elastičnosti već pri starosti od 14 dana postiže značajnu vrijednost modula elastičnosti stoga je vidljivo kako je prirast modula elastičnosti od 14. do 28. dana minimalan svega 0.66%.

Na slici 9.6. vidljivo je da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca pokazuju redukciju vlažnosti ispitanih uzorka u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka uslijed mješanja gline s letećim pepelom. Kompoziti gline Krematorij imaju veću redukciju vlažnosti neovisno o starosti uzorka pri 5% veziva u odnosu na kompozite gline Dolca, dok za 10% i 20% veziva, redukcija vlažnosti u prosjeku biva slična neovisno o starosti uzorka.

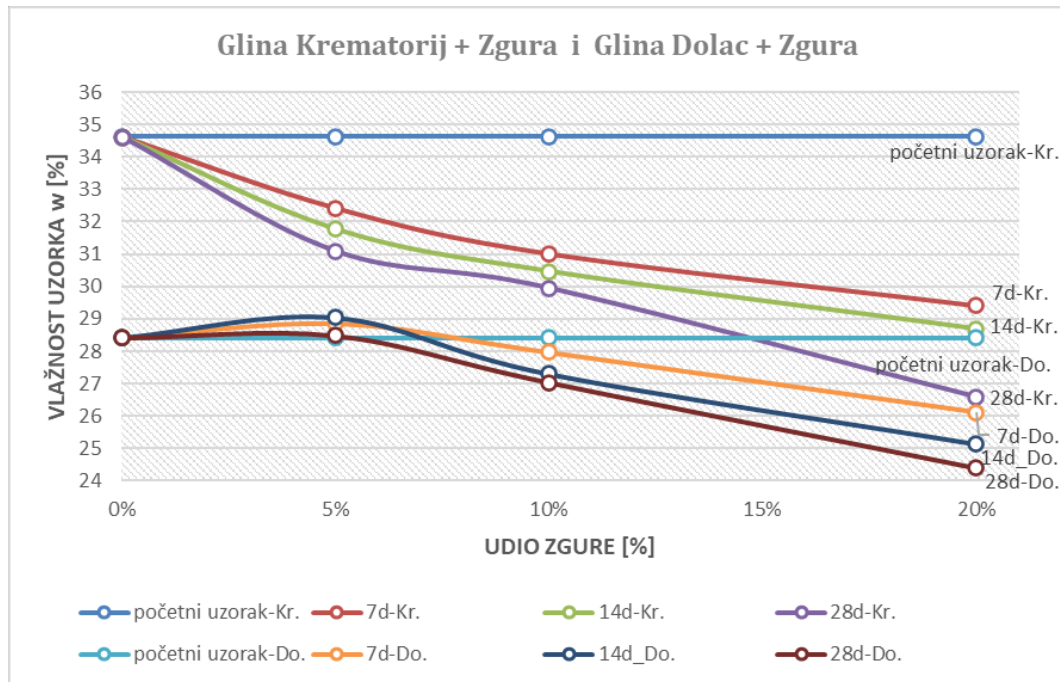
**ANALIZE KOMPOZITA GLINE I ZGURE**



Slika 9.7. Analize ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i zgure, Krematorij i Dolac



Slika 9.8. Analize ispitivanja modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure, Krematorij i Dolac



Slika 9.9. Analize ispitivanja vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure, Krematorij i Dolac

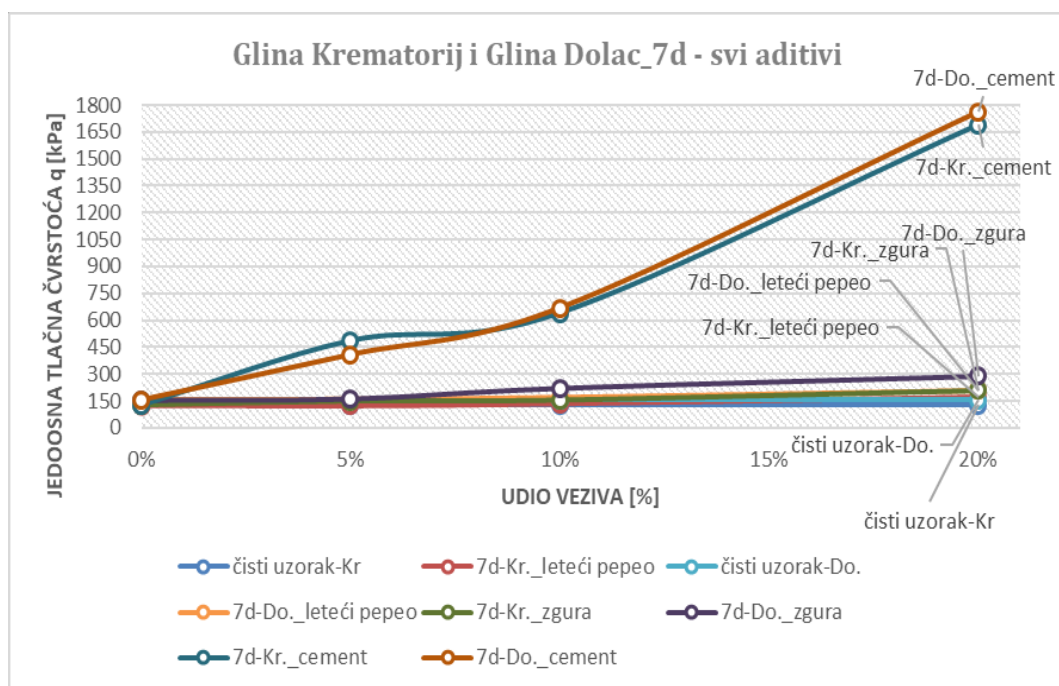
Slika 9.7. prikazuje da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca pokazuju prirast jednoosne tlačne čvrstoće pri dodatku 5% veziva, veći prirast se uočava pri dodatku od 10% veziva za kompozite s oba lokaliteta, dok se značajan prirast jednoosne tlačne čvrstoće uočava pri dodatku od 20% veziva neovisno o starosti kompozita za obadva lokaliteta. Najveći prirast jednoosne tlačne čvrstoće za kompozite gline Krematorij i gline Dolca se uočava pri 20% veziva nakon 28 dana gdje se kompozit gline Krematorij poveća za 4.36 puta, dok se kompozit gline Dolca poveća za 2.61 puta u odnosu na uzorke bez veziva.

Na slici 9.8. evidentno je da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca pokazuju prirast modula elastičnosti pri dodatku 5% veziva, veći prirast se uočava pri dodatku od 10% veziva za kompozite s oba lokaliteta, dok se značajan prirast modula elastičnosti uočava pri dodatku od 20% veziva neovisno o starosti kompozita za oba lokaliteta. Najveći prirast modula elastičnosti za kompozite gline Krematorij i gline Dolca se uočava pri 20% veziva nakon 28 dana gdje se kompozit gline Krematorij poveća za 10.30 puta, dok se kompozit gline Dolca poveća za 7.17 puta u odnosu na uzorke bez veziva.

Na slici 9.9. primjećuje se da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca pokazuju redukciju vlažnosti ispitanih uzoraka u odnosu na prirodnu vlažnost uzoraka uslijed mješanja gline sa zgurom. Kompoziti gline Krematorij imaju veću redukciju vlažnosti neovisno o starosti uzorka pri 5% veziva u odnosu na kompozite gline Dolca kod kojih se pri 5% veziva uočava povećanje vlažnosti pri 7 i 14 dana, nakon čega vlažnost opada do 28 dana gdje biva veća nego početna vlažnost uzorka bez veziva. Pri 10% i 20% veziva vlažnost se reducira za kompozit eglina sa obe lokacije. Uočava se kako je redukcija vlažnosti veća kod kompozita sa lokacije Krematorij.

### 9.3. ANALIZE KOMPOZITA U VREMENSOJ DOMENI

#### ANALIZE U VREMENSKOJ DOMENI ZA 7 DANA – SVA VEZIVA



Slika 9.10. Analize rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće sa udjelom svih veziva za starost od 7 dana, Krematorij i Dolac

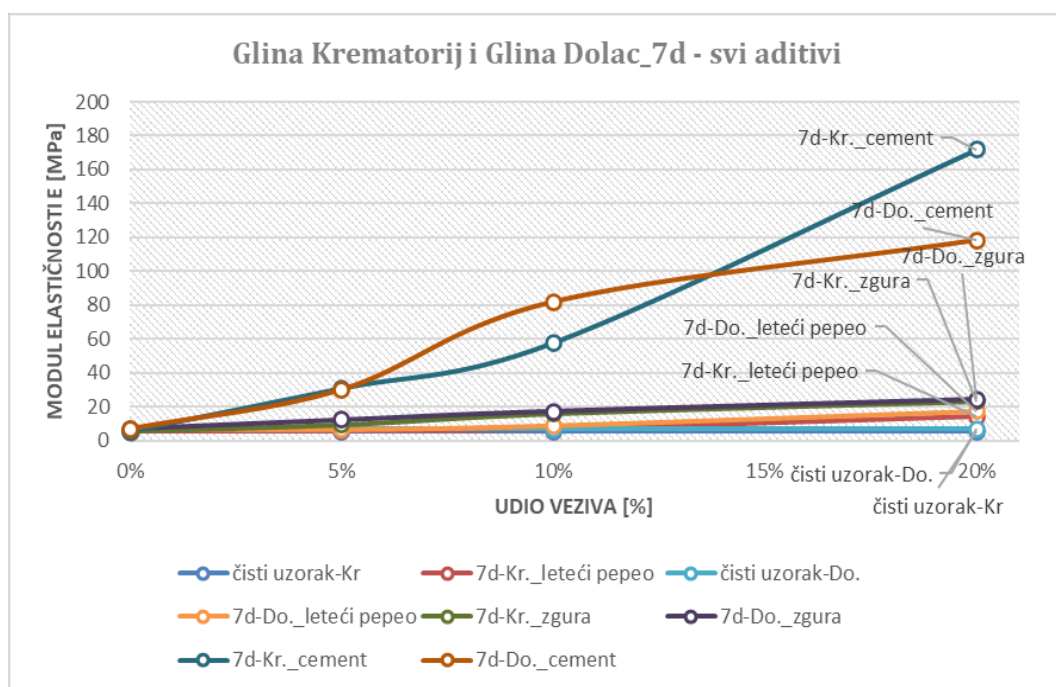
Na slici 9.10. prikazane su analize kompozita gline i svih veziva za starost od 7 dana. Sa slike se može zaključiti da kompoziti gline Krematorij i gline Dolca poboljšani letećim pepelom kao vezivom pri 5% veziva za starost od 7 dana pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, pri 10% veziva uočava se povećanje od 7-10% dok se pri 20% veziva jednoosna tlačna čvrstoća poveća do 35%.

Kompoziti gline s obe lokacije (Krematorij i Dolac) poboljšani zgurom kao vezivom pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, pri 5% veziva uočava se povećanje od 18% (Krematorij) i 5% (Dolac), pri 10% veziva povećanje iznosi 23% (Krematorij) i 43% (Dolac) dok se pri 20% veziva jednoosna tlačna čvrstoća poveća do 68% (Krematorij) i 86% (Dolac).

Kompoziti gline s obe lokacije poboljšani cementom kao vezivom pokazuju značajno povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva i uzorke sa prethodnim vezivima (leteći pepeo i zgura), pri 5% veziva uočava se povećanje 3.9 puta (Krematorij) i 2.63 puta (Dolac), pri 10% veziva povećanje iznosi 5.1 (Krematorij) i

4.31 puta (Dolac) dok se pri 20% veziva jednoosna tlačna čvrstoća poveća do 13.48 puta (Krematorij) i 11.36 puta (Dolac).

Nakon sedam (7) dana, uočava se značajan porast jednoosne tlačne čvrstoće kompozita gline sa obe lokacije sa cementom kao vezivom, a najveći porast čvrstoće se uočava sa dodatkom veziva od 20%.



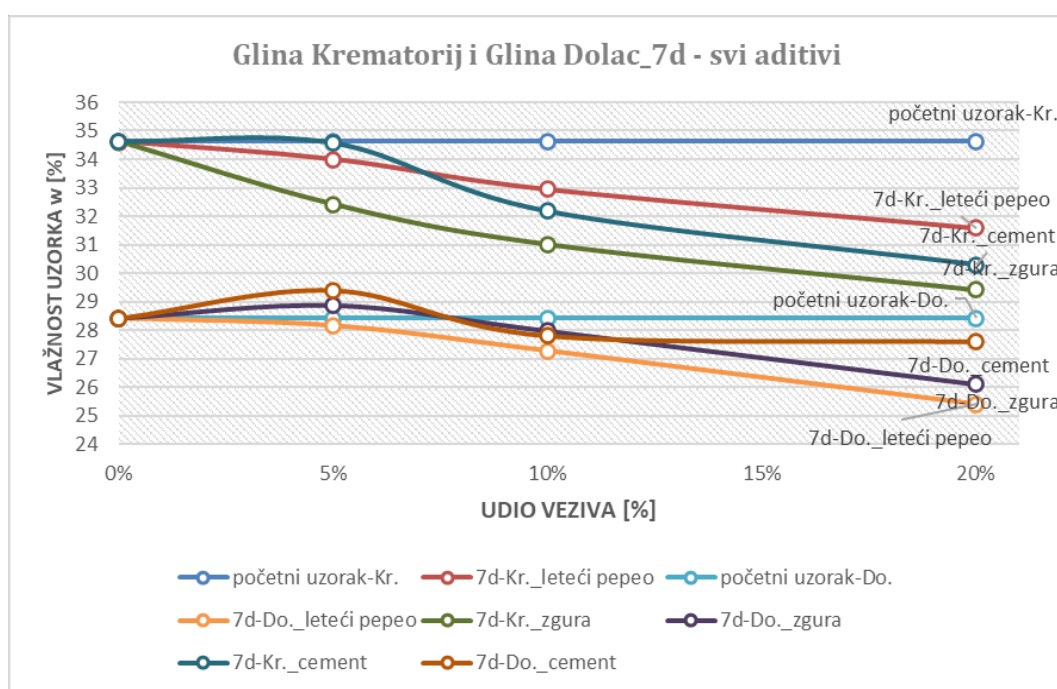
Slika 9.11. Analize rezultata ispitivanja modula elastičnosti sa udjelom svih veziva za starost od 7 dana, Krematorij i Dolac

Na slici 9.11. prikazani su rezultati kompoziti gline s oba lokaliteta (Krematorij i Dolac) gdje gline s lokaliteta Krematorij poboljšane letećim pepelom kao vezivom od 5% kod starosti od 7 dana pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva dok kompoziti gline Dolca pokazuju pad modula elastičnosti do 8 %. Pri 10% veziva uočava se povećanje od 20-24 % dok se pri 20 % veziva modul elastičnosti jednoosna tlačna čvrstoća poveća do 150 %.

Analizom rezultata s iste slike (9.11.) kompoziti gline s obe lokacije poboljšani zgurom kao vezivom pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva, pri 5% veziva uočava se povećanje od 68.27 % (Kremeatorij) i 74.14 % (Dolac), pri 10% veziva povećanje iznosi 189 % (Krematorij) i 145.5 % (Dolac) dok se pri 20% veziva jednoosna tlačna čvrstoća poveća do 4.23 puta (Krematorij) i 3.46 puta (Dolac).

Kompoziti gline s obe lokacije poboljšani cementom kao vezivom pokazuju značajno povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva i uzorke sa prethodnim vezivima (leteći pepeo i zgura), pri 5% veziva uočava se povećanje 5.6 puta (Krematorij) i 4.3 puta (Dolac), pri 10% veziva povećanje iznosi 10.48 (Krematorij) i 11.67 puta (Dolac) dok se pri 20% veziva jednoosna tlačna čvrstoća poveća do 31.23 puta (Krematorij) i 16.84 puta (Dolac).

Nakon sedam (7) dana, uočava se značajan porast jednoosne tlačne čvrstoće kompozita gline sa obe lokacije sa cementom kao vezivom, a najveći sa dodatkom veziva od 20%.



Slika 9.12. Analize rezultata ispitivanja vlažnosti sa udjelom svih veziva za starost od 7 dana, Krematorij i Dolac

Na slici 9.12. analizom rezultata zaključuje se da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka i to 1.81% leteći pepeo, 6.36% zgura te 0.14% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 0.92% leteći pepeo, dok se kod preostalih veziva uočava povećanje vlažnosti i to 1.57% zgura te 3.43% cement.

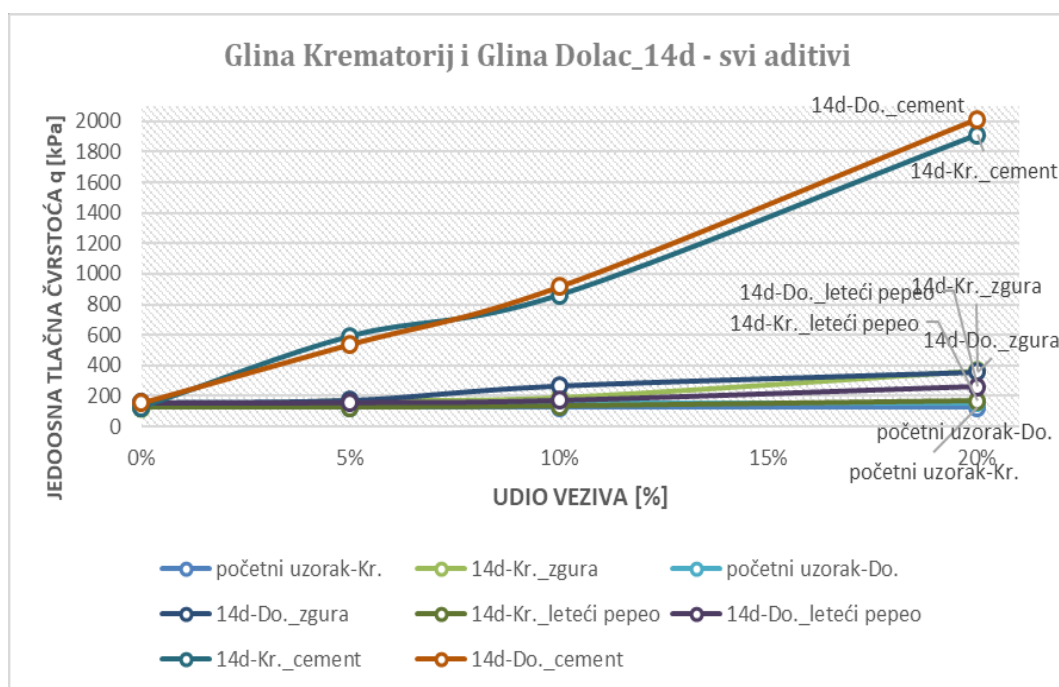
Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 10% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 4.85% leteći pepeo, 10.43% zgura te 7.06% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 10% veziva pokazuju



smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 4.02% leteći pepeo, 1.57% zgura te 2.13% cement.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 20% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 8.77% leteći pepeo, 15.05% zgura te 12.50% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 20% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti od 10.61% leteći pepeo, 8.12% zgura te 2.84% cement u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka.

## ANALIZE U VREMENSKOJ DOMENI ZA 14 DANA – SVA VEZIVA

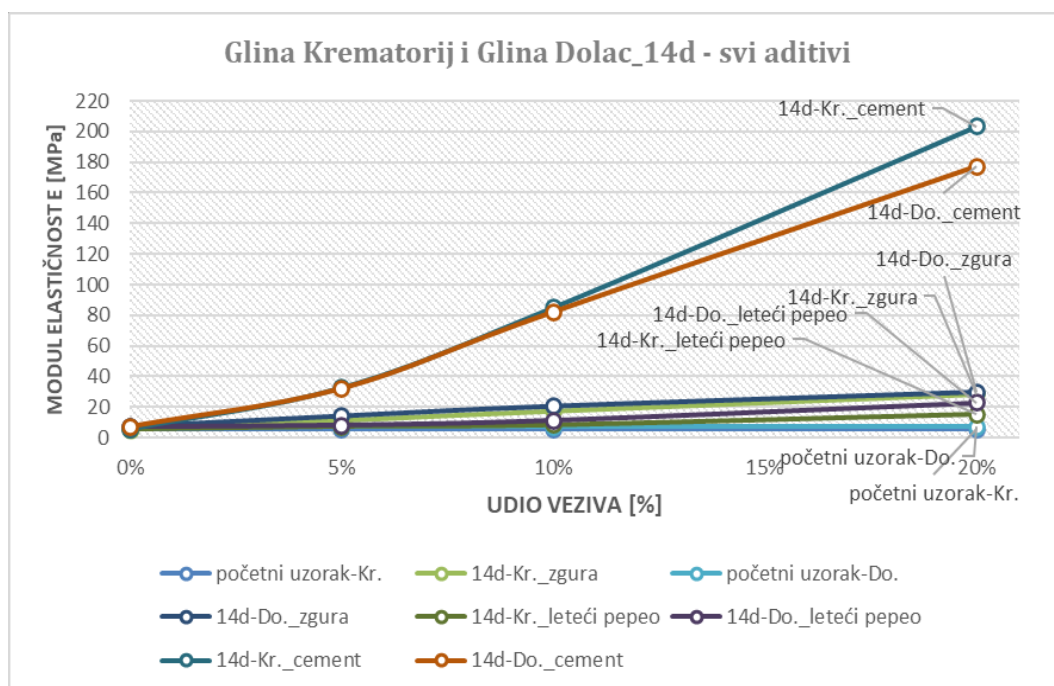


Slika 9.13. Analize rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće sa udjelom svih veziva za starost od 14 dana, Krematorij i Dolac

Na slici 9.13. prikazana je analiza rezultata jednoosne tlačne čvrstoće kompozita gline i svih veziva pri starosti od 14 dana. Iz slike se može zaključiti da gline s lokaliteta Krematorij poboljšani sa 5% veziva pri starosti od 14 dana pokazuju promjene jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, i to smanjenje od 0.23% leteći pepeo, povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 34.83% zgura te značajno povećanje od 4.72 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% veziva pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 2.12% leteći pepeo, 9.41% zgura te značajno povećanje od 3.47 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 10% veziva pri starosti od 14 dana pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva od 6.61% leteći pepeo, 50.69% zgura te značajno povećanje od 6.86 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 10% veziva pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 11.37% leteći pepeo, 70.45% zgura te značajno povećanje od 5.91 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 20% veziva pri starosti od 14 dana pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva od 34.83% leteći pepeo, 192.77% zgura te značajno povećanje od 15.24 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 20% veziva pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 67.20% leteći pepeo, 129.35% zgura te značajno povećanje od 12.97 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.



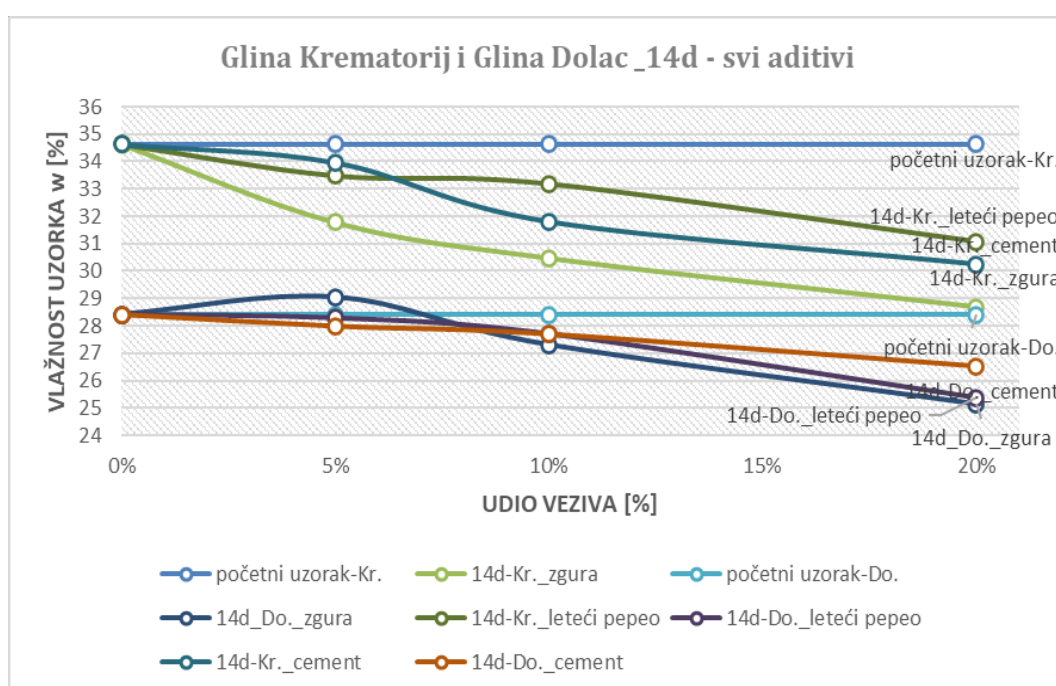
Slika 9.14. Analize rezultata ispitivanja modula elastičnosti sa udjelom svih veziva za starost od 14 dana, Krematorij i Dolac

Sa slike 9.14. može se zaključiti da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% veziva pri starosti od 14 dana pokazuju promjene modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva, i to povećanje od 32.05 % leteći pepeo, povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 103.72% zgura te značajno povećanje od 5.89 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% veziva pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 14.35% leteći pepeo, 99.05% zgura te značajno povećanje od 4.55 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 10% veziva pri starosti od 14 dana pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva od 49.54% leteći pepeo, 215.84% zgura te značajno povećanje od 15.43 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 10% veziva pokazuju povećanje modula

elastičnosti za 59.90% leteći pepeo, 189.68% zgura te značajno povećanje od 11.67 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 20% veziva pri starosti od 14 dana pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva od 173.86% leteći pepeo, 419.11% zgura te značajno povećanje od 36.99 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 20% veziva pokazuju povećanje modula elastičnosti za 226.22% leteći pepeo, 322.54% zgura te značajno povećanje od 25.21 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.



Slika 9.15. Analize rezultata ispitivanja vlažnosti sa udjelom svih veziva za starost od 14 dana, Krematorij i Dolac

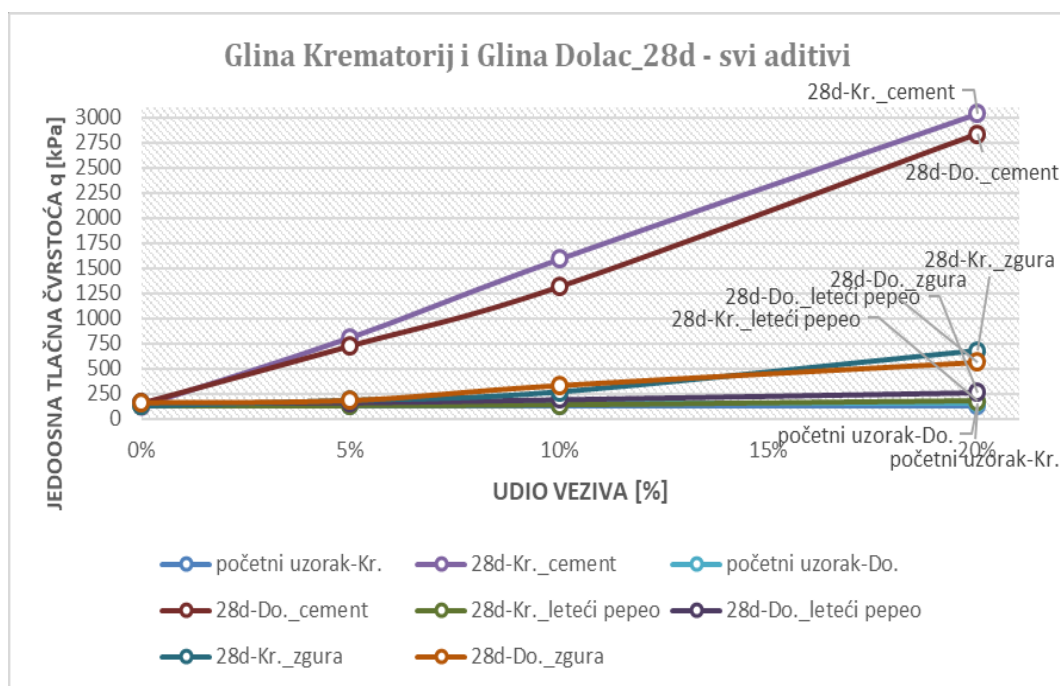
Analizom rezultata sa slike 9.15. zaključuje se da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka i to 3.31% leteći pepeo, 8.23% zgura te 1.94% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 0.43% leteći pepeo, 1.49% cement dok se kod zgure kao veziva uočava povećanje vlažnosti i to 2.20% pri starosti od 14 dana.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 10% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 4.16% leteći pepeo, 12.01% zgura te 8.17% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 10% veziva pokazuju

smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 2.49% leteći pepeo, 3.91% zgura te 2.51% cement.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 20% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 10.24% leteći pepeo, 17.15% zgura te 12.66% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 20% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti od 10.75% leteći pepeo, 11.52% zgura te 6.36% cement u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka.

## ANALIZE U VREMENSKOJ DOMENI ZA 28 DANA – SVA VEZIVA



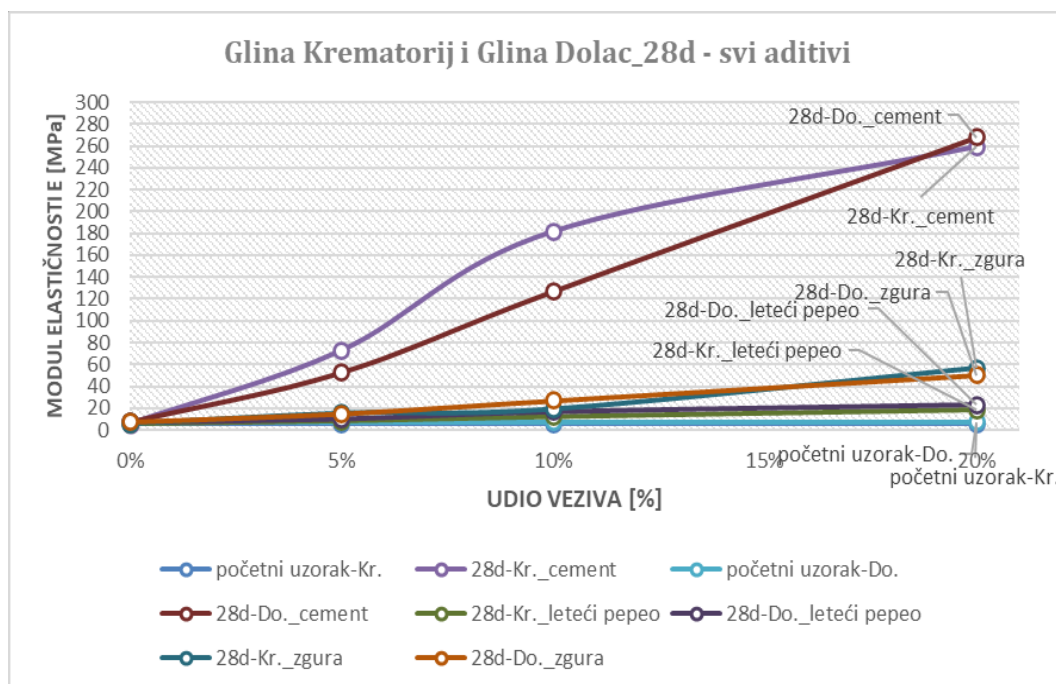
Slika 9.16. Analize rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće sa udjelom svih veziva za starost od 28 dana, Krematorij i Dolac

Na slici 9.16. prikazana je analiza rezultata komozita gline i svih veziva za starost od 28 dana. Iz slike se može zaključiti da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% veziva pri starosti od 28 dana pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva od 2.69% leteći pepeo, 43.53% zgura te značajno povećanje od 6.44 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% veziva pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 3.14% leteći pepeo, 14.69% zgura te značajno povećanje od 4.68 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 10% veziva pri starosti od 28 dana pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva od 9.23% leteći pepeo, 112.15% zgura te značajno povećanje od 12.67 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 10% veziva pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 23.02% leteći pepeo, 111.39% zgura te značajno povećanje od 8.47 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 20% veziva pri starosti od 28 dana pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva od 37.28% leteći

pepeo, 435.89% zgura te značajno povećanje od 24.23 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 20% veziva pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za 69.58% leteći pepeo, 260.98% zgura te značajno povećanje od 18.27 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

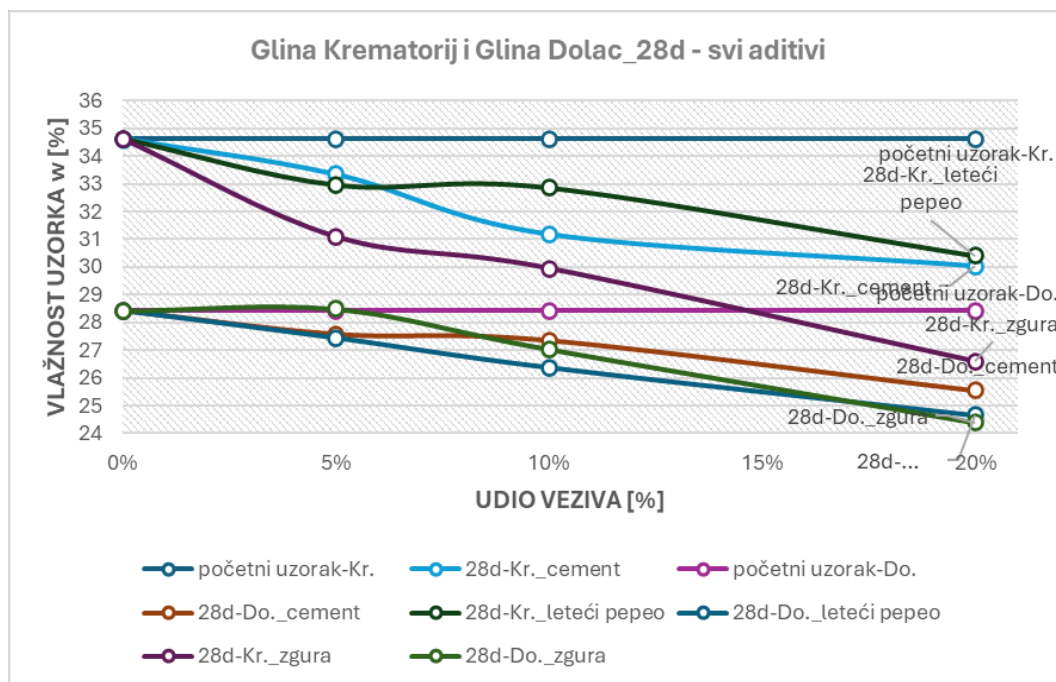


Slika 9.17. Analize rezultata ispitivanja modula elastičnosti sa udjelom svih veziva za starost od 28 dana, Krematorij i Dolac

Sa slike 9.17. može se primjetiti da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% veziva pri starosti od 28 dana pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva od 47.95% leteći pepeo, 176.02% zgura te značajno povećanje od 13.19 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% veziva pokazuju povećanje modula elastičnosti za 44.25% leteći pepeo, 109.49% zgura te značajno povećanje od 7.47 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 10% veziva pri starosti od 28 dana pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva od 116.59% leteći pepeo, 246.31% zgura te značajno povećanje od 32.97 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 10% veziva pokazuju povećanje modula elastičnosti za 136.54% leteći pepeo, 218.02% zgura te značajno povećanje od 18.01 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.

Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 20% veziva pri starosti od 28 dana pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva od 230.91% leteći pepeo, 10.29 puta zgura te značajno povećanje od 47.07 puta kod cementa kao veziva, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 20% veziva pokazuju povećanje modula elastičnosti za 228.37% leteći pepeo, 7.16 puta zgura te značajno povećanje od 38.09 puta kod cementa kao veziva u odnosu na uzorke bez veziva.



Slika 9.18. Analize rezultata ispitivanja vlažnosti sa udjelom svih veziva za starost od 28 dana, Krematorij i Dolac

Na slici 9.18. uočava se da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka i to 4.82% leteći pepeo, 10.20% zgura te 3.72% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 3.43% leteći pepeo, 2.97% cement dok se kod zgure kao veziva uočava povećanje vlažnosti i to 0.24% pri starosti od 28 dana.

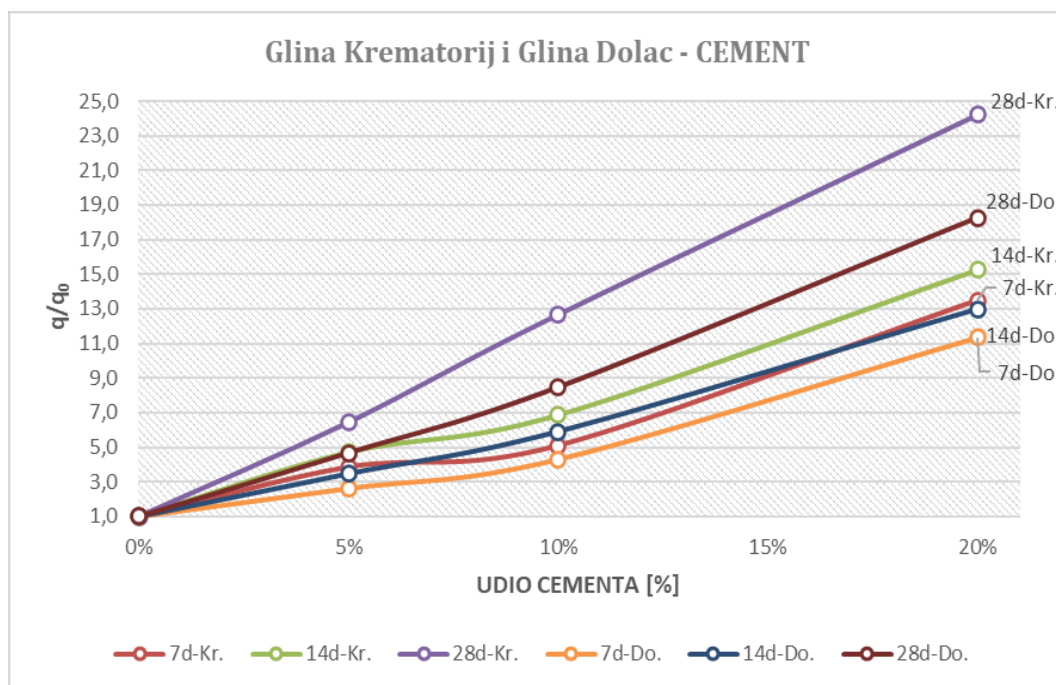
Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 10% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 5.12% leteći pepeo, 13.51% zgura te 9.97% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 10% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 7.18% leteći pepeo, 4.85% zgura te 3.76% cement.



Kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 20% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka od 12.21% leteći pepeo, 23.22% zgura te 13.29% cement, s druge strane kompoziti gline Dolca poboljšani sa 20% veziva pokazuju smanjenje vlažnosti od 13.22% leteći pepeo, 14.16% zgura te 10.07% cement u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka.

## 9.4. ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA NORMALIZACIJOM

### NORMALIZACIJA REZULTATA KOMPOZITA GLINE I CEMENTA



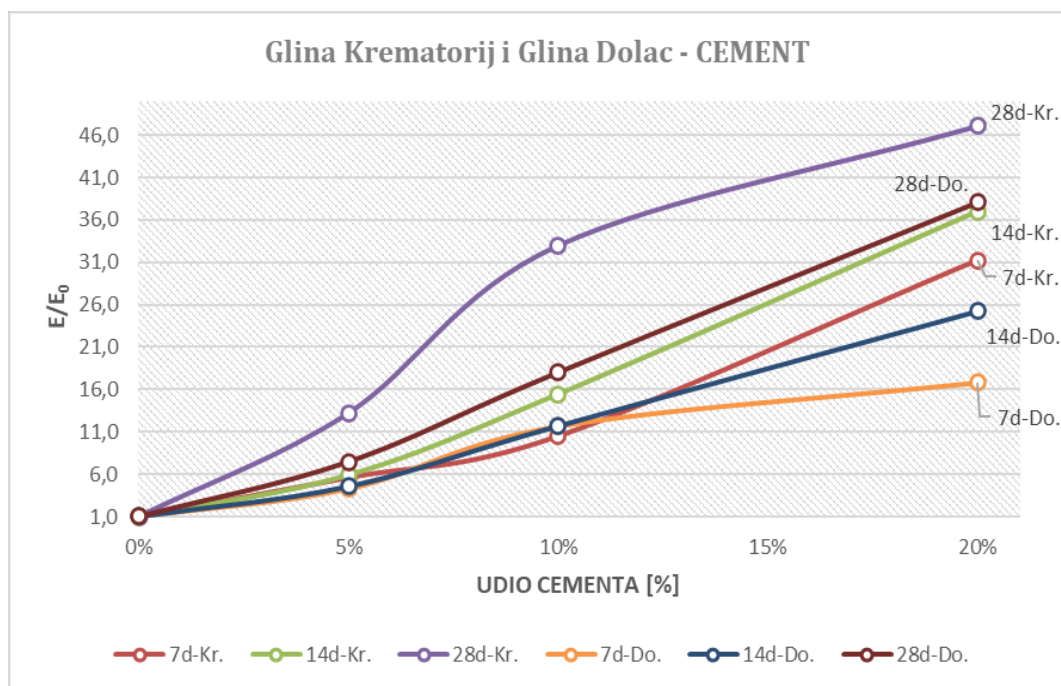
Slika 9.19. Normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitete Krematorij i Dolac

Slika 9.19. prikazuje normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i cementa za oba lokaliteta (Krematorij i Dolac). Iz slike je vidljivo da kompoziti gline s Krematorija i Dolca, pri poboljšanju cementom, pokazuju značajan porast jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na nepoboljšane uzorke, pri čemu se povećanje bilježi već pri manjim količinama dodanog cementa, a porast se nastavlja s povećanjem starosti uzorka.

Za uzorke kompozita Krematorija, jednoosna tlačna čvrstoća raste 3.87 puta (7 dana), 4.72 puta (14 dana) i 6.44 puta (28 dana) za uzorke s 5 % cementa. S 10 % cementa, porast iznosi 5.1 puta (7 dana), 6.86 puta (14 dana) i 12.67 puta (28 dana), dok uzorci s 20 % cementa pokazuju povećanje od 13.48 puta (7 dana), 15.24 puta (14 dana) i 24.23 puta (28 dana).

Za uzorke kompozita Dolca, porast jednoosne tlačne čvrstoće je 2.63 puta (7 dana), 3.47 puta (14 dana) i 4.68 puta (28 dana) za uzorke s 5 % cementa. Uz 10 % cementa, porast iznosi 4.31 puta (7 dana), 5.91 puta (14 dana) i 8.47 puta (28 dana), dok uzorci s 20 % cementa pokazuju povećanje od 11.36 puta (7 dana), 11.97 puta (14 dana) i 18.27 puta

(28 dana). Rezultati jasno pokazuju da uzorci s cementom doživljavaju značajan porast jednoosne tlačne čvrstoće s vremenom sazrijevanja.



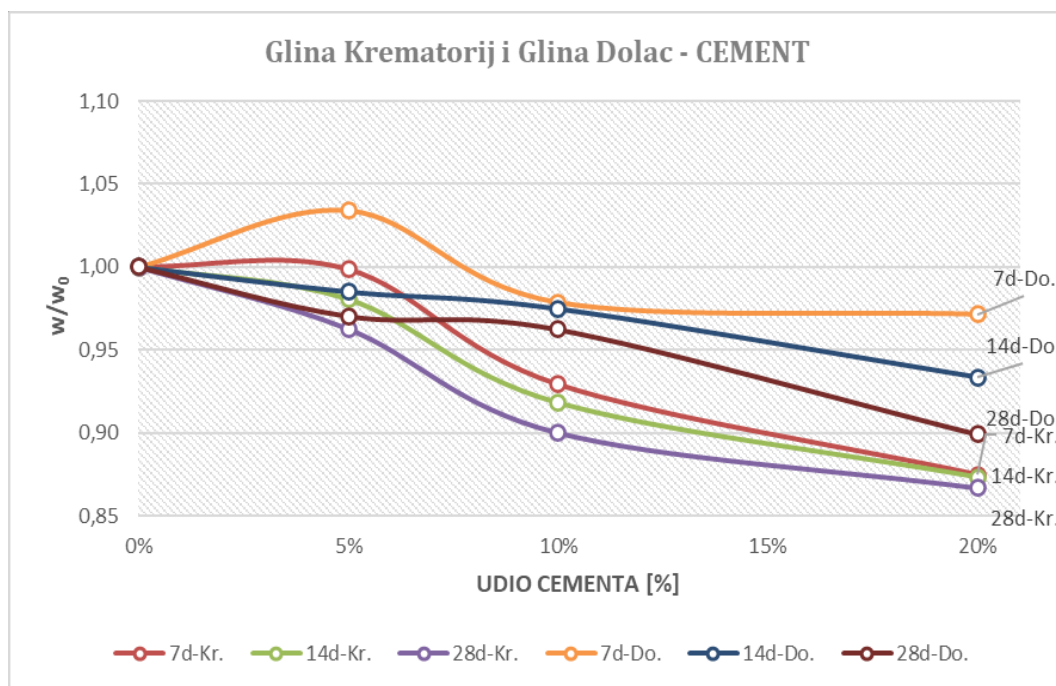
Slika 9.20. Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitete Krematorij i Dolac

Slika 9.20. prikazuje normalizirane vrijednosti modula elastičnosti kompozita gline s udjelom cementa. Iz slike je jasno da kompoziti gline Krematorija i gline Dolca, pri poboljšanju cementom, pokazuju značajan porast modula elastičnosti u odnosu na nepoboljšane uzorke, pri čemu se porast bilježi već s malim količinama dodanog cementa, a povećava se i s vremenom sazrijevanja uzorka.

Za uzorke kompozita Krematorija, modul elastičnosti raste 5.60 puta (7 dana), 5.90 puta (14 dana) i 13.19 puta (28 dana) za uzorke s 5 % cementa. S 10 % cementa, porast iznosi 10.48 puta (7 dana), 15.43 puta (14 dana) i 32.97 puta (28 dana), dok uzorci s 20 % cementa pokazuju povećanje od 31.24 puta (7 dana), 36.99 puta (14 dana) i 47.07 puta (28 dana).

Za uzorke kompozita Dolca, porast modula elastičnosti je 4.29 puta (7 dana), 4.55 puta (14 dana) i 7.47 puta (28 dana) za uzorke s 5 % cementa. Uz 10 % cementa, porast iznosi 11.67 puta (7 dana), 11.67 puta (14 dana) i 18.01 puta (28 dana), dok uzorci s 20 % cementa pokazuju povećanje od 16.85 puta (7 dana), 25.21 puta (14 dana) i 38.09

puta (28 dana). Ovi rezultati jasno pokazuju da uzorci s cementom bilježe značajan porast modula elastičnosti s vremenom sazrijevanja.



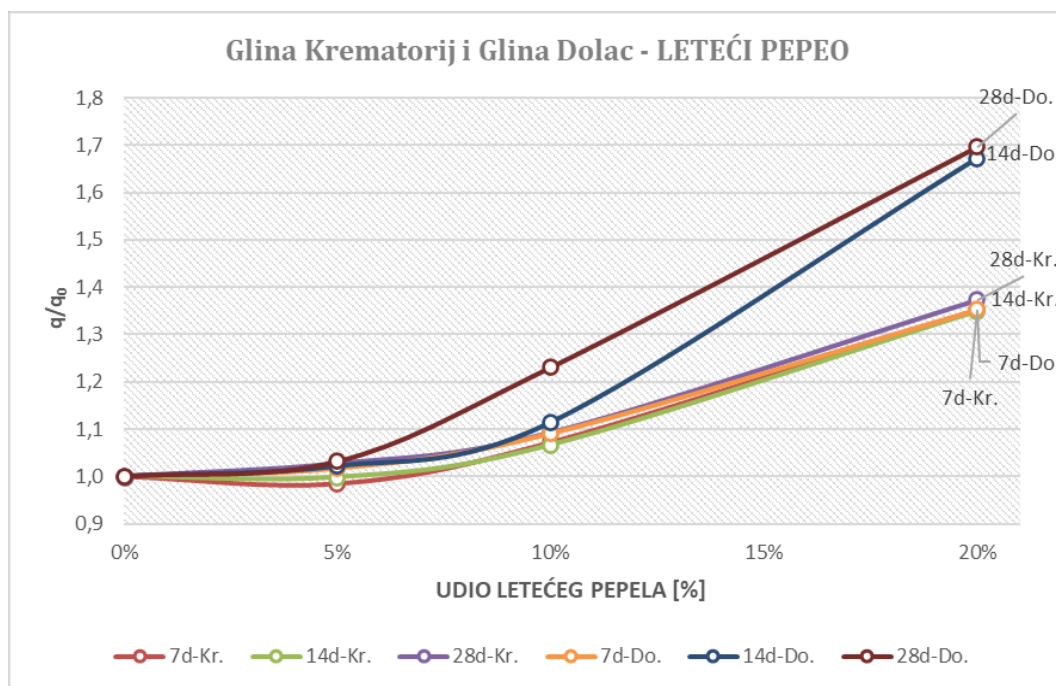
Slika 9.21. Normalizirane vrijednosti vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitete Krematorij i Dolac

Sa slike 9.21. može se primijetiti da kompoziti gline Krematorija i gline Dolca, poboljšani cementom, pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na nepoboljšane uzorke, pri čemu je smanjenje prisutno čak i pri malim količinama cementa, a smanjenje je veće s povećanjem starosti uzorka.

Za uzorke kompozita Krematorija, smanjenje vlažnosti iznosi 0.14 % (7 dana), 1.94 % (14 dana) i 3.72 % (28 dana) za uzorke s 5 % cementa. Za uzorke s 10 % cementa, smanjenje vlažnosti je 7.1 % (7 dana), 8.17 % (14 dana) i 9.97 % (28 dana), dok uzorci s 20 % cementa pokazuju smanjenje vlažnosti od 12.5 % (7 dana), 12.66 % (14 dana) i 13.29 % (28 dana).

Za uzorke kompozita Dolca, početno povećanje vlažnosti iznosi 3.43 % (7 dana) za uzorke s 5 % cementa, nakon čega dolazi do smanjenja vlažnosti za 1.49 % (14 dana) i 2.97 % (28 dana). Pri dodavanju 10 % cementa, smanjenje vlažnosti iznosi 2.13 % (7 dana), 2.51 % (14 dana) i 3.76 % (28 dana), dok uzorci s 20 % cementa pokazuju smanjenje vlažnosti od 2.84 % (7 dana), 6.63 % (14 dana) i 10.07 % (28 dana).

## NORMALIZACIJA REZULTATA KOMPOZITA GLINE I LETEĆG PEPELA

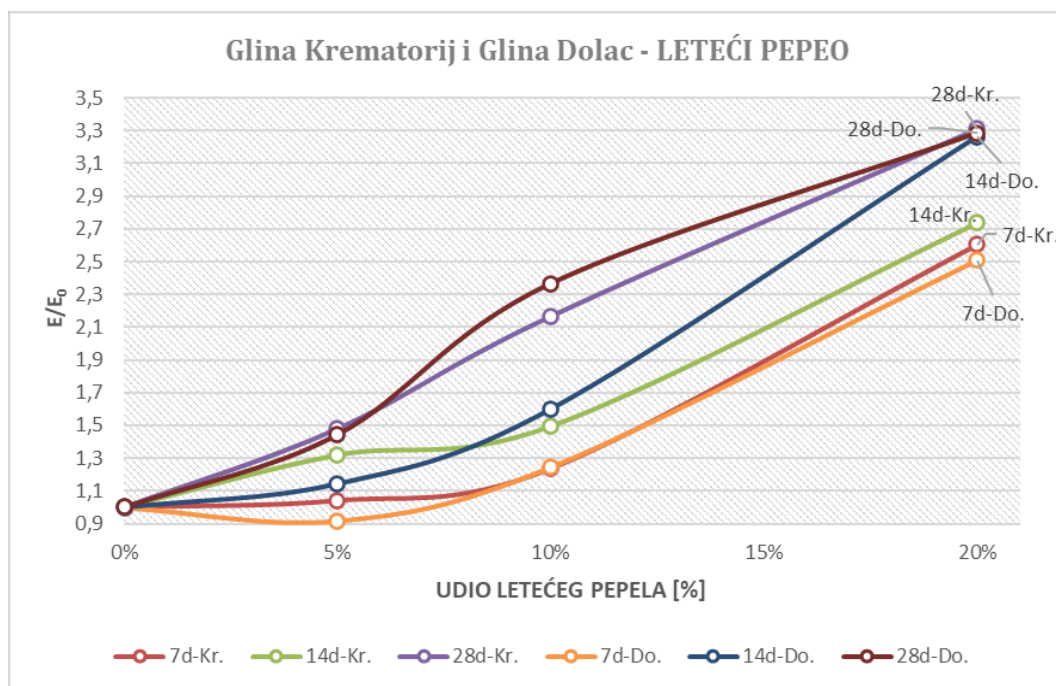


Slika 9.22. Normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitete Krematorij i Dolac

Slika 9.22. prikazuje analizu normalizacije jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na udio letećeg pepela u kompozitnim uzorcima za obje lokacije (Krematorij i Dolac). S iznesenih rezultata može se zaključiti da kompoziti gline Krematorija i gline Dolca, poboljšani s 5 % letećeg pepela, ne pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, bez obzira na starost uzorka.

Pri dodavanju 10 % letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoća povećala se za oko 7-10 % u odnosu na uzorke bez letećeg pepela, dok su uzorci s lokacije Dolac nakon 28 dana imali povećanje od 23 %.

Za uzorke poboljšane s 20 % letećeg pepela, kompoziti gline Krematorija postigli su povećanje tlačne čvrstoće od oko 35 %, gdje starost uzorka nije imala značajan utjecaj na povećanje čvrstoće. S druge strane, uzorci gline Dolca postigli su sljedeće rezultate: za 7-dnevne uzorke s 20 % letećeg pepela povećanje čvrstoće iznosilo je oko 35 %, za 14-dnevne uzorke 67 %, a za 28-dnevne uzorke 70 % veće vrijednosti u odnosu na uzorke bez letećeg pepela.



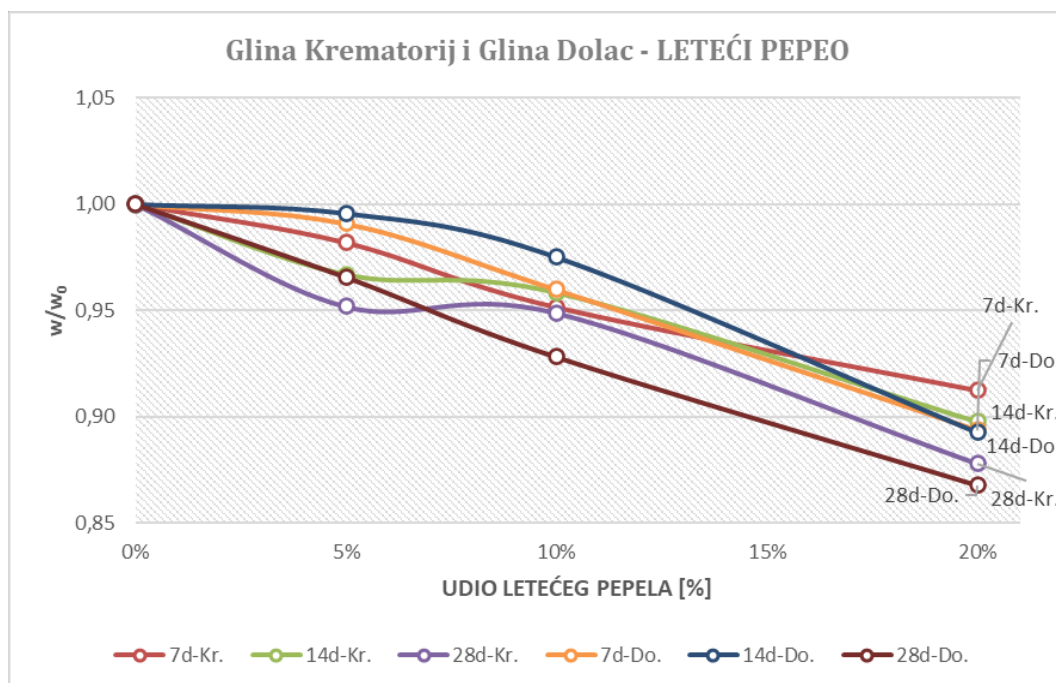
Slika 9.23. Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitete Krematorij i Dolac

Slika 9.23. prikazuje analizu normalizacije modula elastičnosti u odnosu na udio letećeg pepela u kompozitnim uzorcima za obje lokacije (Krematorij i Dolac). Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da kompoziti gline Krematorija i gline Dolca, pri poboljšanju uzoraka gline letećim pepelom, pokazuju porast modula elastičnosti u odnosu na nepoboljšani uzorak. Ovaj porast je prisutan već pri malim količinama dodanog letećeg pepela, a također se povećava s vremenom sazrijevanja uzorka.

Za uzorke kompozita Krematorija, povećanje modula elastičnosti iznosi 1.04 puta (7 dana), 1.32 puta (14 dana) i 1.48 puta (28 dana) za uzorke s 5 % letećeg pepela. Za uzorke s 10 % letećeg pepela, povećanje iznosi 1.24 puta (7 dana), 1.50 puta (14 dana) i 2.17 puta (28 dana). Uz uzorke s 20 % letećeg pepela, porast je 2.60 puta (7 dana), 2.74 puta (14 dana) i 3.31 puta (28 dana).

Za uzorke kompozita Dolca, pri 5 % letećeg pepela, uočava se pad modula elastičnosti za 0.92 puta, a potom porast za 1.14 puta (14 dana) i 1.44 puta (28 dana). Za uzorke s 10 % letećeg pepela, povećanje iznosi 1.25 puta (7 dana), 1.60 puta (14 dana) i 2.37 puta (28 dana). Na kraju, za uzorke s 20 % letećeg pepela, porast modula elastičnosti je 2.51 puta (7 dana), 3.26 puta (14 dana) i 3.28 puta (28 dana).

Iz rezultata je očito da uzorci s letećim pepelom imaju značajan prirast modula elastičnosti tijekom vremena sazrijevanja uzorka.



Slika 9.24. Normalizirane vrijednosti vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitete Krematorij i Dolac

Slika 9.24. prikazuje analizu normalizacije vlažnosti i udjela letećeg pepela u kompozitnim uzorcima za obje lokacije (Krematorij i Dolac). Slikovni rezultati pokazuju da kompoziti gline Krematorija i gline Dolca, poboljšani letećim pepelom, pokazuju smanjenje vlažnosti u odnosu na nepoboljšane uzorke. Smanjenje vlažnosti uočava se već i pri malim količinama dodanog letećeg pepela, a također se povećava s vremenom sazrijevanja uzorka.

Za uzorke kompozita Krematorija, smanjenje vlažnosti iznosi 1.81 % (7 dana), 3.31 % (14 dana) i 4.82 % (28 dana) za uzorke s 5 % letećeg pepela. Za uzorke s 10 % letećeg pepela, vlažnost se smanjuje za 4.85 % (7 dana), 4.16 % (14 dana) i 5.12 % (28 dana). Uz uzorke s 20 % letećeg pepela, smanjenje vlažnosti je 8.78 % (7 dana), 10.24 % (14 dana) i 12.21 % (28 dana).

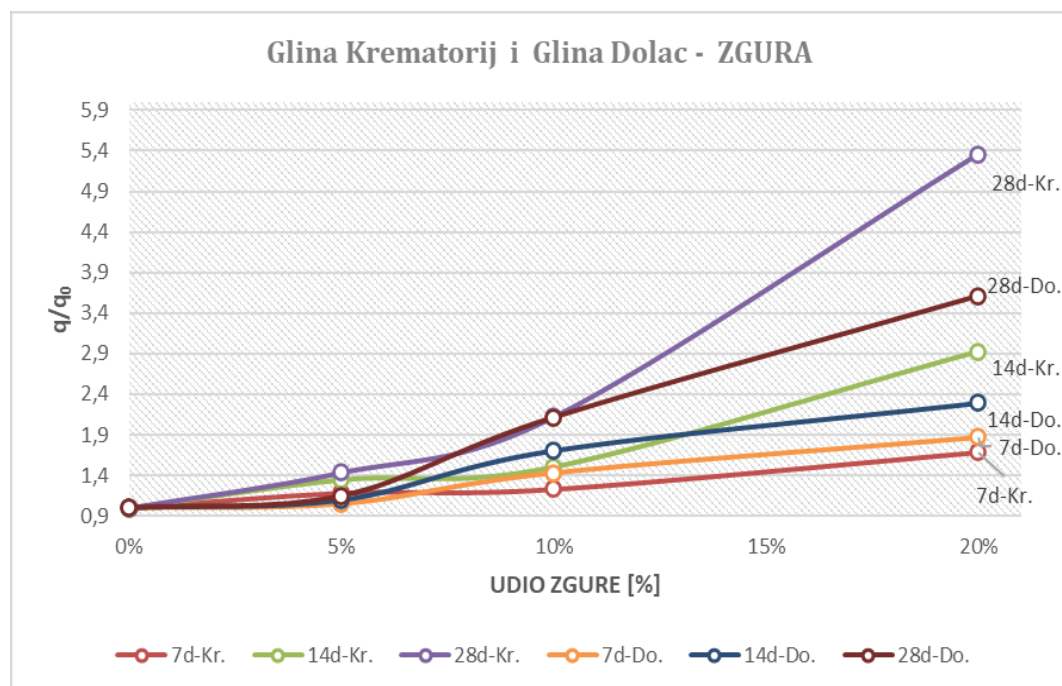
Za uzorke kompozita Dolca, smanjenje vlažnosti iznosi 0.92 % (7 dana), 0.43 % (14 dana) i 3.43 % (28 dana) za uzorke s 5 % letećeg pepela. Pri dodavanju 10 % letećeg pepela, smanjenje vlažnosti je 4.02 % (7 dana), 2.50 % (14 dana) i 7.18 % (28 dana). Za

uzorke s 20 % letećeg pepela, smanjenje vlažnosti iznosi 10.61 % (7 dana), 10.75 % (14 dana) i 13.22 % (28 dana).

Iz rezultata je očito da se vlažnost uzoraka smanjuje s povećanjem udjela letećeg pepela i vremenom sazrijevanja uzorka.



## NORMALIZACIJA REZULTATA KOMPOZITA GLINE I ZGURE



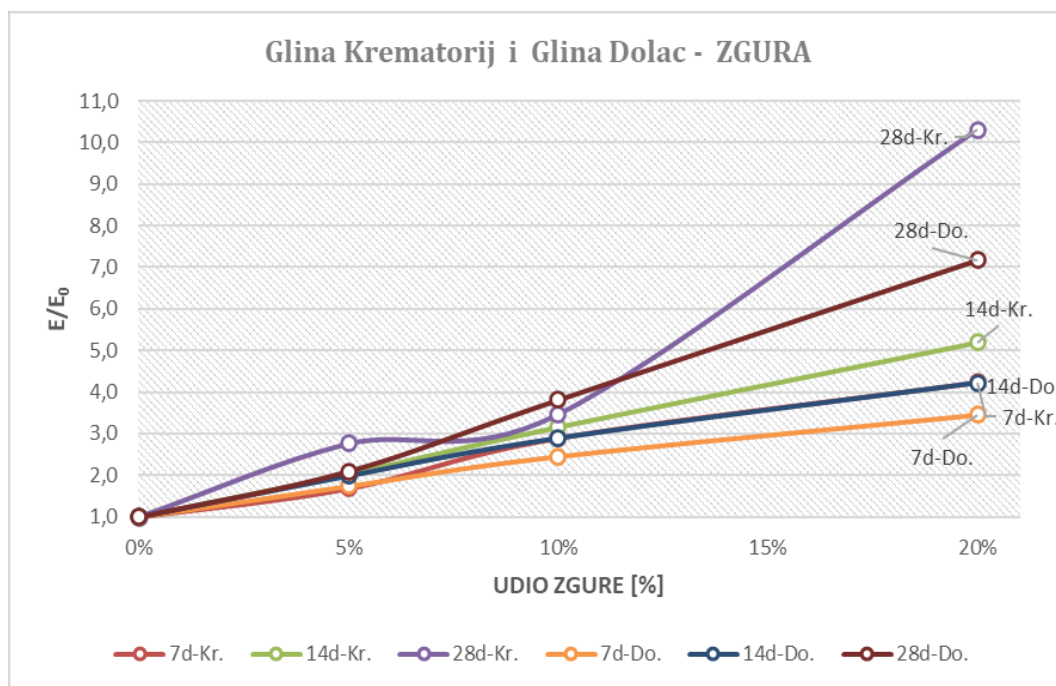
Slika 9.25. Normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitete Krematorij i Dolac

Slika 9.25. prikazuje analizu normalizacijom jednoosne tlačne čvrstoće i udjela zgure u kompozitnom uzorku za obe lokacije (Krematorij i Dolac). Sa slike se može zaključiti da kompoziti gline Krematorija i Dolca, poboljšane s 5 % zgure, za razliku od uzoraka s istim postotkom letećeg pepela, pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva. Pri tome je povećanje evidentno s većom starosti uzorka, gdje uzorci gline Krematorija imaju veću jednoosnu tlačnu čvrstoću za 18 % (7 dana), 35 % (14 dana) te 44 % (28 dana), dok uzorci gline Dolca pokazuju nešto manji porast jednoosne tlačne čvrstoće od 5 % (7 dana), 9 % (14 dana) te 15 % (28 dana), sve u odnosu na jednoosnu tlačnu čvrstoću uzoraka bez veziva.

Pri dodavanj u 10 % zgure, uzorci gline Krematorija imaju veću jednoosnu tlačnu čvrstoću za 23 % (7 dana), 51 % (14 dana) te 112 % (28 dana), dok uzorci gline Dolca imaju veću jednoosnu tlačnu čvrstoću za 43 % (7 dana), 70 % (14 dana) te 111 % (28 dana), sve u odnosu na jednoosnu tlačnu čvrstoću uzoraka bez veziva.

Jednako kao i kod poboljšanja letećim pepelom, uzorci s najvećim postotkom zgure (20 %) pokazuju i najveći porast jednoosne tlačne čvrstoće 68 % (7 dana), 193 % (14 dana)

te 436 % (28 dana) za uzorke Krematorija, odnosno 87 % (7 dana), 129 % (14 dana) te 261 % (28 dana) za uzorke gline Dolca.



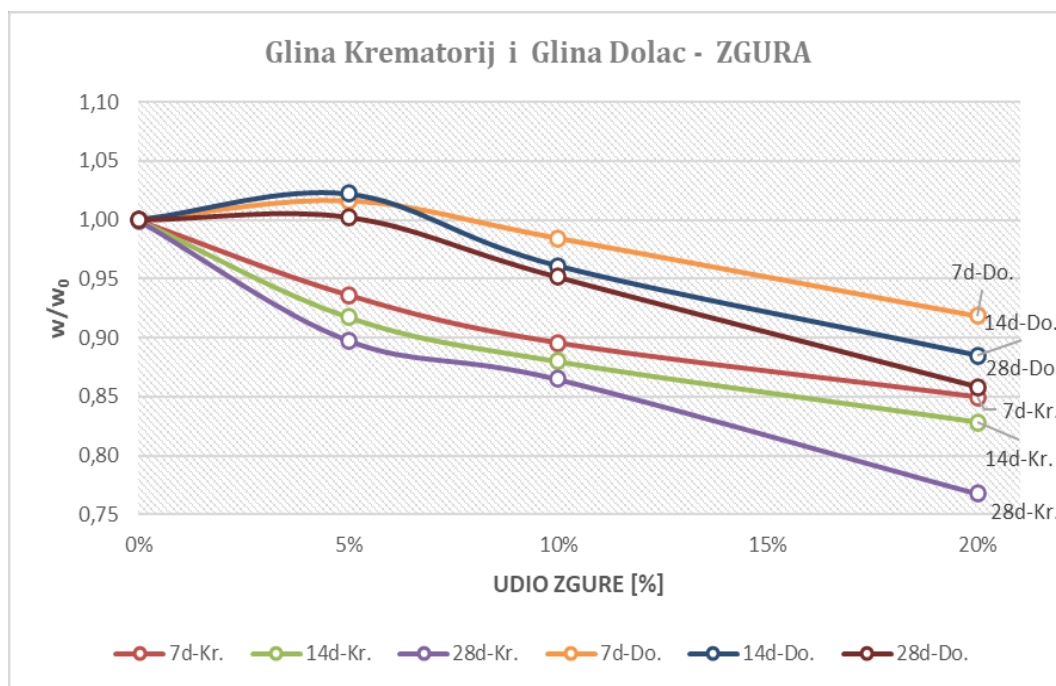
Slika 9.26. Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitete Krematorij i Dolac

Slika 9.26. prikazuje analizu rezultata normalizacijom iz kojih se može zaključiti da kompoziti gline Krematorija i Dolca, poboljšane s 5 % zgure, za razliku od uzoraka s istim postotkom letećeg pepela, pokazuju povećanje modula elastičnosti u odnosu na uzorke bez veziva. Pri tome je povećanje evidentno s većom starosti uzorka, gdje uzorci gline Krematorija imaju veći modul elastičnosti za 1.68 puta (7 dana), 2.04 puta (14 dana) te 2.76 puta (28 dana), dok uzorci gline Dolca pokazuju nešto manji porast modula elastičnosti od 1.74 puta (7 dana), 1.99 puta (14 dana) te 2.09 puta (28 dana), sve u odnosu na modul elastičnosti uzoraka bez veziva.

Pri dodavanju u 10 % zgure, uzorci gline Krematorija imaju veći modul elastičnosti za 2.89 puta (7 dana), 3.16 puta (14 dana) te 3.46 puta (28 dana), dok uzorci gline Dolca imaju veći modul elastičnosti za 2.46 puta (7 dana), 2.90 puta (14 dana) te 3.81 puta (28 dana), sve u odnosu na modul elastičnosti uzoraka bez veziva.

Jednako kao i kod poboljšanja letećim pepelom i cementom, uzorci s najvećim postotkom zgure (20 %) pokazuju i najveći porast modula elastičnosti 4.23 puta (7

dana), 5.19 puta (14 dana) te 10.30 puta (28 dana) za uzorke Krematorija, odnosno 3.46 puta (7 dana), 4.23 puta (14 dana) te 7.17 puta (28 dana) za uzorke gline Dolca.



Slika 9.27. Normalizirane vrijednosti vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgurom za lokalitete Krematorij i Dolac

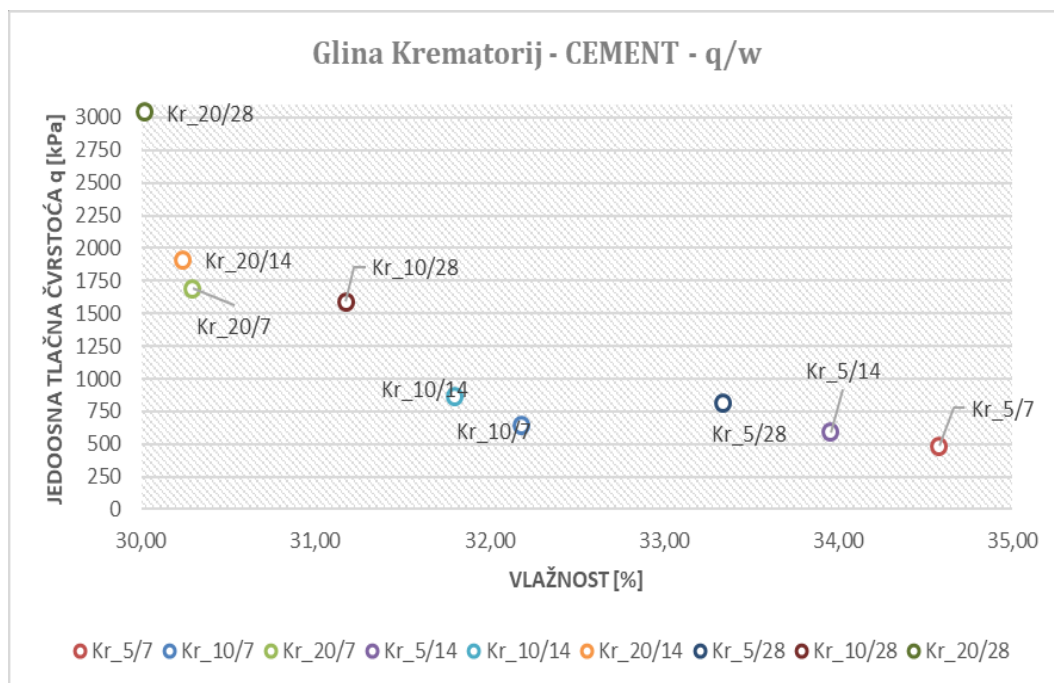
Slika 9.27. prikazuje analizu normalizacijom vlažnosti iz koje se može zaključiti da kompoziti gline Krematorija i gline Dolca pri poboljšanju uzoraka zgurom, pokazuju redukciju vlažnosti u odnosu na nepoboljšani uzorak, već i pri malim količinama dodane zgurom, a redukcija se uočava i s većom starosti uzorka.

Tako za uzorke kompozita Krematorija redukcija vlažnosti iznosi 6.36 % (7 dana), 8.23 % (14 dana) te 10.20 % (28 dana) za uzorke s 5 % zgurom, nadalje 10.43 % (7 dana), 12.01 % (14 dana) te 13.51 % (28 dana), za uzorke s 10 % cementa, te na posljedku 15.05 % (7 dana), 17.15 % (14 dana) i 23.22 % (28 dana) za uzorke s 20 % cementa.

Za uzorke kompozita Dolca uočava se porast vlažnosti pri dodatku 5% veziva i to za 1.57 % (7 dana), 2.20 % (14 dana) te 0.24 % (28 dana). Pri dodatku 10 % veziva pokazuje se reduciranje vlažnosti od 1.57 % (7 dana), 3.91 % (14 dana) te 4.85 % (28 dana), te na posljedku 8.12 % (7 dana), 11.52 % (14 dana) te 14.16 % (28 dana) za uzorke s 20 % cementa. Uočava se da glina sa lokaliteta Dolca pri malom postotku dodatka od 5% veziva, rezultira povećanjem vlažnosti do starosti od 14 dana, nakon čega vlažnost opada do 28 dana.

## 9.5. UTJECAJ VLAŽNOSTI NA MEHANIČKE KARAKTERISTIKE KOMPOZITA GLINE I VEZIVA

### ODNOS VLAŽNOSTI I MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA KOMPOZITA GLINE I CEMENTA



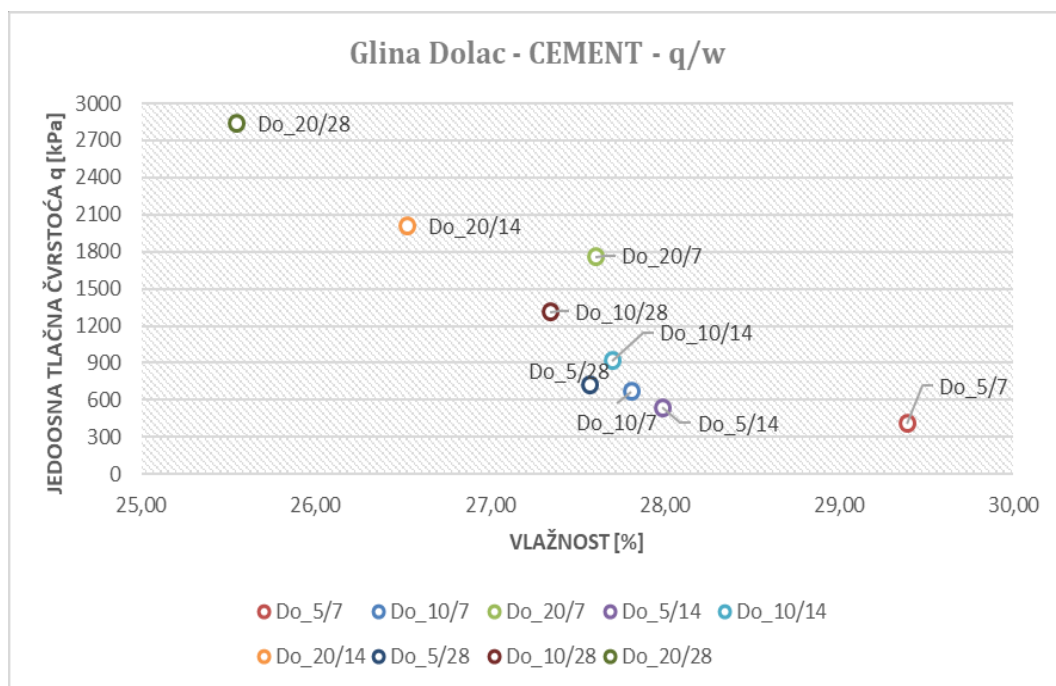
Slika 9.28. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij

Anlizom rezultata na slici 9.28. primjećuje se da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5 % cementa kao veziva imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom: 485.00 kPa (7 dana), 591.88 kPa (14 dana), 808.75 kPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 34.58 % (7 dana), 33.96 % (14 dana), 33.34 % (28 dana).

Pri dodatku od 10 % cementa, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 640.00kPa (7 dana), 861.25 kPa (14 dana), 1590.00 kPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 32.18 % (7 dana), 31.80 % (14 dana), 31.17 % (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20 % cementa kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoću značajno raste i to 1691.25 kPa (7 dana), 1912.50 kPa (14 dana), 3040.00 kPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 30.30 % (7 dana), 30.24 % (14 2dana), 30.02 % (28 dana).

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



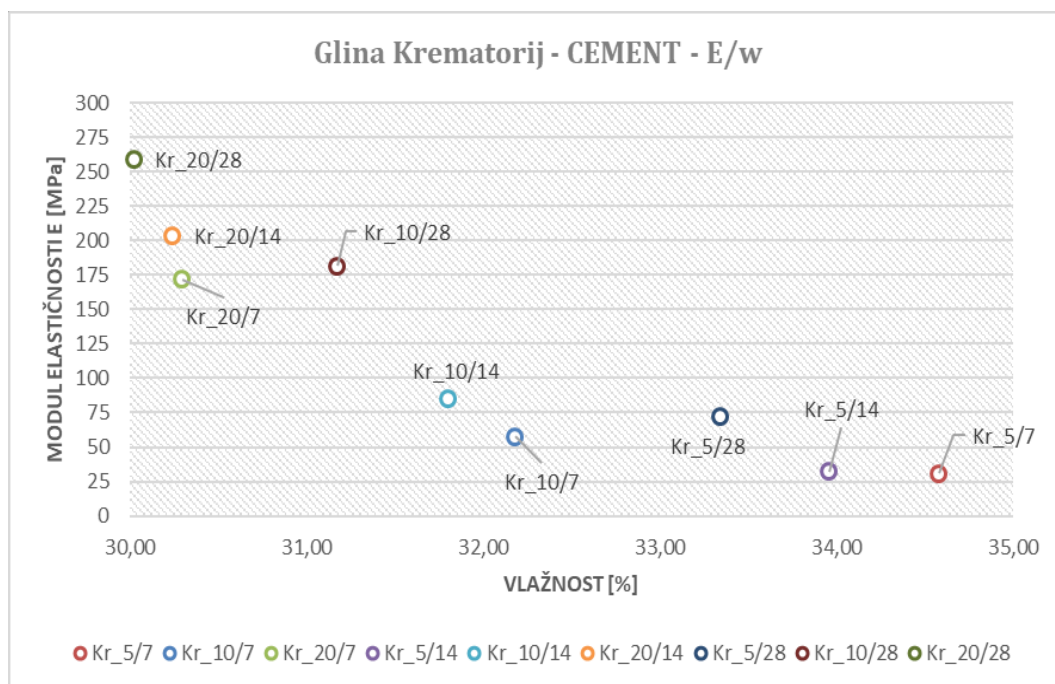
Slika 9.29. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac

Na slici 9.29. primjećuje se da kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% cementa kao veziva imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 407.67 kPa (7 dana), 539.17 kPa (14 dana), 725.83 kPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 29.39 % (7 dana), 27.99 % (14 dana), 27.57 % (28 dana).

Pri dodatku od 10 % cementa, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 668.50 kPa (7 dana), 916.67 kPa (14 dana), 1315.00 kPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 27.81 % (7 dana), 27.70 % (14 dana), 27.34 % (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% cementa kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoću značajno raste i to 1763.00 kPa (7 dana), 2013.33 kPa (14 dana), 2835.00 kPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 27.61 % (7 dana), 26.53 % (14 dana), 25.55 % (28 dana).

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



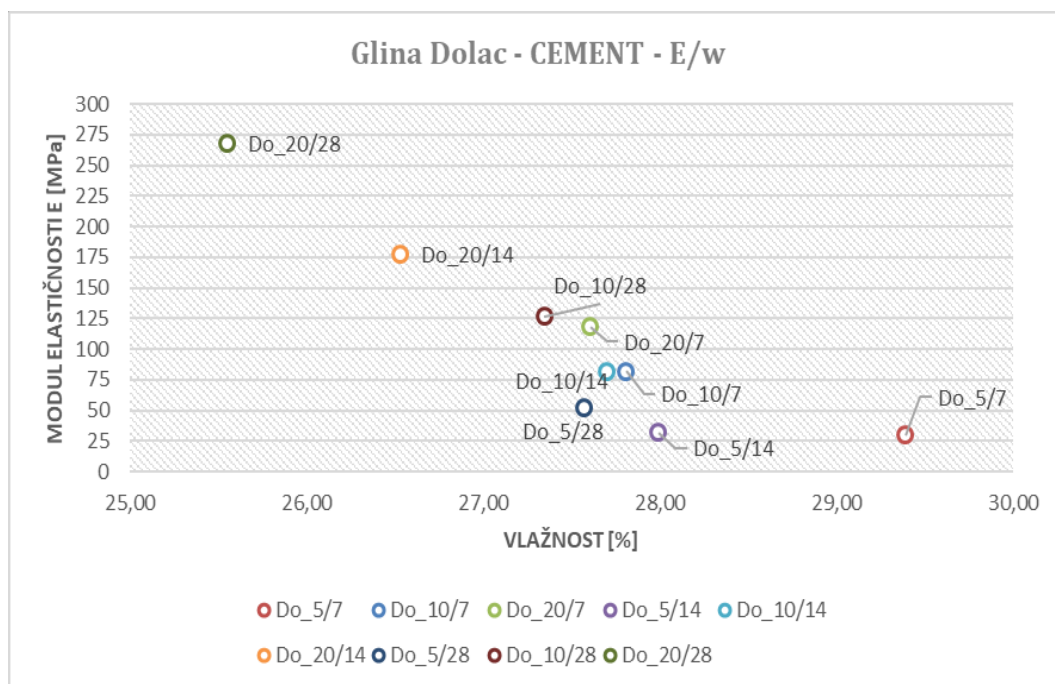
Slika 9.30. Prikaz odnosa modula elastičnosti i vlažnosti uzorka kompozita gline i cementa s lokaliteta Krematorij

Na slici 9.30. uočava se da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% cementa kao veziva imaju modul elastičnosti redom 30.78 MPa (7 dana), 32.42 MPa (14 dana), 77.53 MPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 34.58 % (7 dana), 33.96 % (14 dana), 33.34 % (28 dana).

Pri dodatku od 10% cementa, modul elastičnosti raste redom 57.64 MPa (7 dana), 84.88 MPa (14 dana), 181.35 MPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 32.18 % (7 dana), 31.80% (14 dana), 31.17% (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% cementa kao veziva, modul elastičnosti značajno raste i to 171.80 MPa (7 dana), 203.43 MPa (14 dana), 258.88 MPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 30.30% (7 dana), 30.24% (14 2dana), 30.02% (28 dana).

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste modul elastičnosti dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast modula elastičnosti i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem modula elastičnosti kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



Slika 9.31. Prikaz odnosa modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i cementa s lokaliteta Dolac

Na slici 9.31. uočava se da kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% cementa kao veziva imaju modul elastičnosti redom 30.15 MPa (7 dana), 31.99 MPa (14 dana), 52.47 MPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 29.39 % (7 dana), 27.99 % (14 dana), 27.57 % (28 dana).

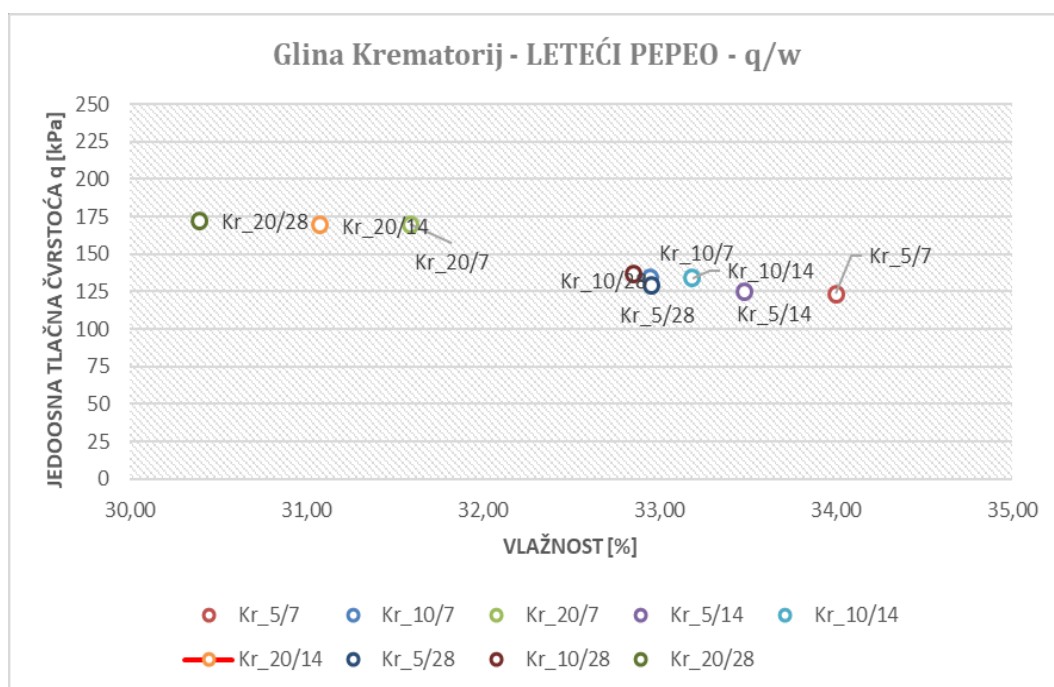
Pri dodatku od 10% cementa, modul elastičnosti raste redom 82.00 MPa (7 dana), 82.00 MPa (14 dana), 126.53 MPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 27.81 % (7 dana), 27.70 % (14 dana), 27.34 % (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% cementa kao veziva, modul elastičnosti značajno raste i to 118.36 MPa (7 dana), 177.11 MPa (14 dana), 267.56 MPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 27.61 % (7 dana), 26.53 % (14 dana), 25.55 % (28 dana).

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste modul elastičnosti dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast modula elastičnosti i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem modula elastičnosti kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



## ODNOS VLAŽNOSI I MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA KOMPOZITA GLINE I LETEĆEG PEPELA



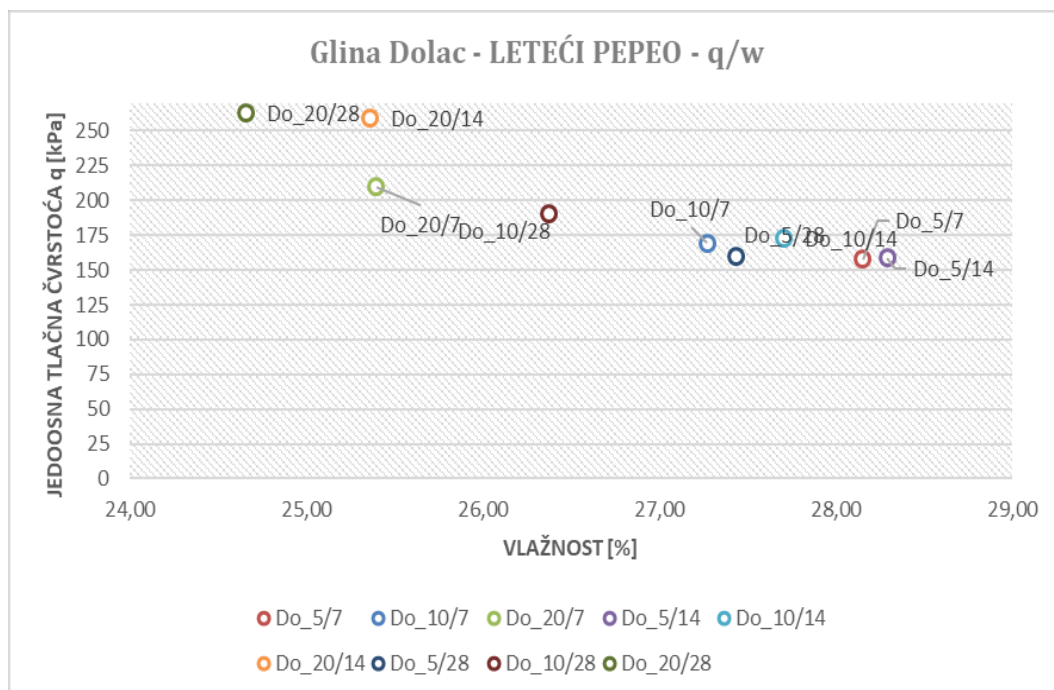
Slika 9.32. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzorka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij

Na slici 9.32. primjećuje se da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% letećeg pepela kao veziva imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 123.56 kPa (7 dana), 125.20 kPa (14 dana), 128.86 kPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 34.00 % (7 dana), 33.48 % (14 dana), 32.96 % (28 dana).

Pri dodatku veziva od 10% letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 134.51 kPa (7 dana), 133.77 kPa (14 dana), 137.07 kPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 32.95 % (7 dana), 33.19 % (14 dana), 32.85 % (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% letećeg pepela kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoću značajnije raste 169.68 kPa (7 dana), 169.19 kPa (14 dana), 172.27 kPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 31.59 % (7 dana), 31.08 % (14 dana), 30.40 % (28 dana).

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



Slika 9.33. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzorka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Dolac

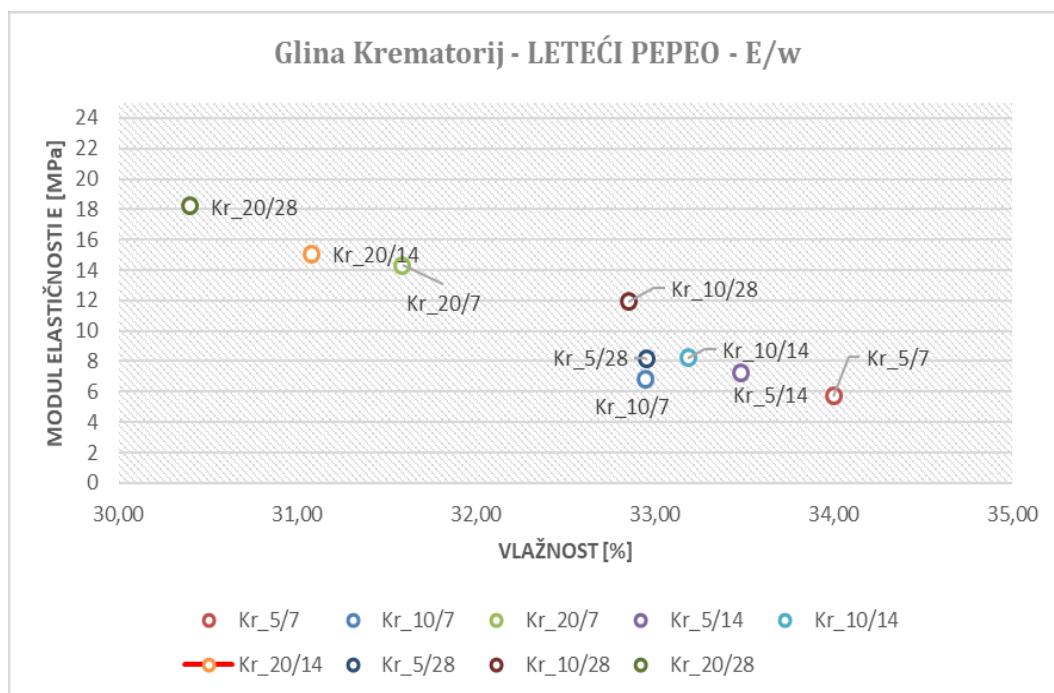
Analizom rezultata sa slike 9.33. vidljivo je da kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% letećeg pepela kao veziva imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 157.76kPa (7 dana), 158.47 kPa (14 dana), 160.06 kPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 28.15% (7 dana), 28.29% (14 dana), 27.44% (28 dana).

Pri dodatku veziva od 10% letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 169.22kPa (7 dana), 172.83 kPa (14 dana), 190.90 kPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 27.27% (7 dana), 27.71% (14 dana), 26.37% (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% letećeg pepela kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoću značajnije raste 209.86kPa (7 dana), 259.47 kPa (14 dana), 263.17 kPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 25.40% (7 dana), 25.36% (14 dana), 24.66% (28 dana).

Valja uočiti anomaliju kod 5% i 10% veziva u odnosu na starost uzorka i opadanje vlažnosti, kod 5% veziva vlažnost opada do 7 dana nakon čega raste do 14 dana za 0.5% te kasnije do 28 dana ponovno opada, ista anomalija se može primjetiti i kod 10% veziva, vlažnost opada do 7 dana nakon čega ima porast za 1.6% do 14 dana i na poslijetku ponovno pada do 28 dana.

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



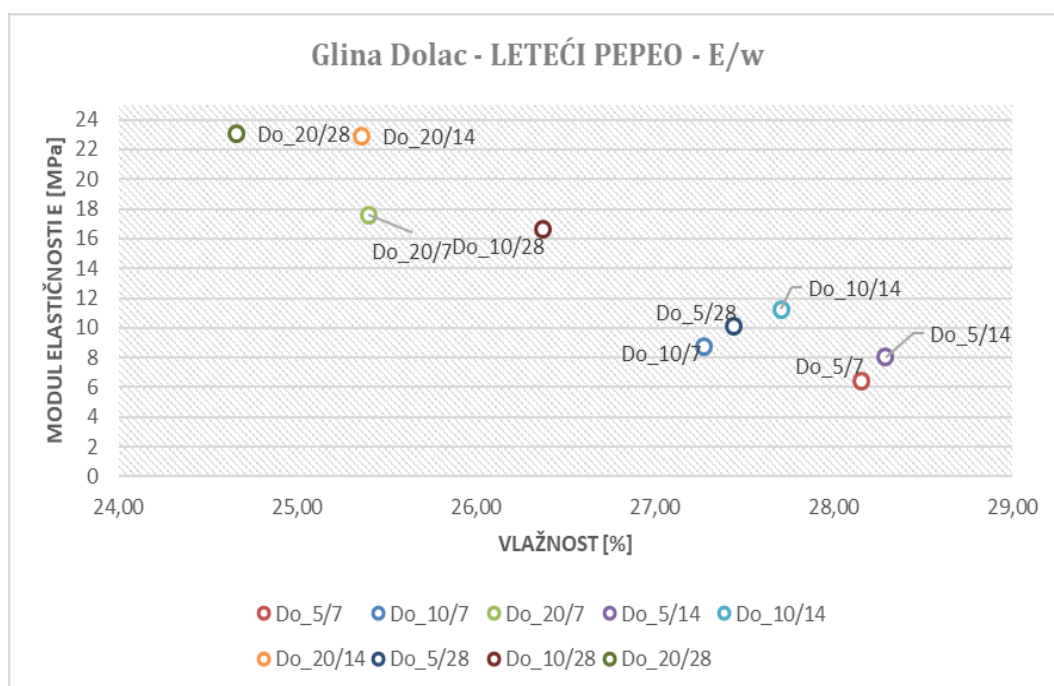
Slika 9.34. Prikaz odnosa modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Krematorij

Na slici 9.34. dati su rezultati analize kompozita gline Krematorij poboljšani sa 5 % letećeg pepela kao veziva koji imaju modul elastičnosti redom: 5.73 MPa (7 dana), 7.26 MPa (14 dana), 8.14 MPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 34.00 % (7 dana), 33.48 % (14 dana), 32.96 % (28 dana).

Pri dodatku veziva od 10 % letećeg pepela, modul elastičnosti raste redom 6.80 MPa (7 dana), 8.23 MPa (14 dana), 11.91 MPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 32.95 % (7 dana), 33.19 % (14 dana), 32.85 % (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20 % letećeg pepela kao veziva, modul elastičnosti značajnije raste 14.33 MPa (7 dana), 15.06 MPa (14 dana), 18.20 MPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 31.59 % (7 dana), 31.08 % (14 dana), 30.40 % (28 dana).

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste modul elastičnosti dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast modula elastičnosti i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem modula elastičnosti kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



Slika 9.35. Prikaz odnos modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela s lokaliteta Dolac

Na slici 9.35. prikazana je analiza rezultata kompozita gline Dolca poboljšane sa 5 % letećeg pepela kao veziva, te se uočava modul elastičnosti redom 6.45 MPa (7 dana), 8.03 MPa (14 dana), 10.13 MPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 28.15 % (7 dana), 28.29 % (14 dana), 27.44 % (28 dana).

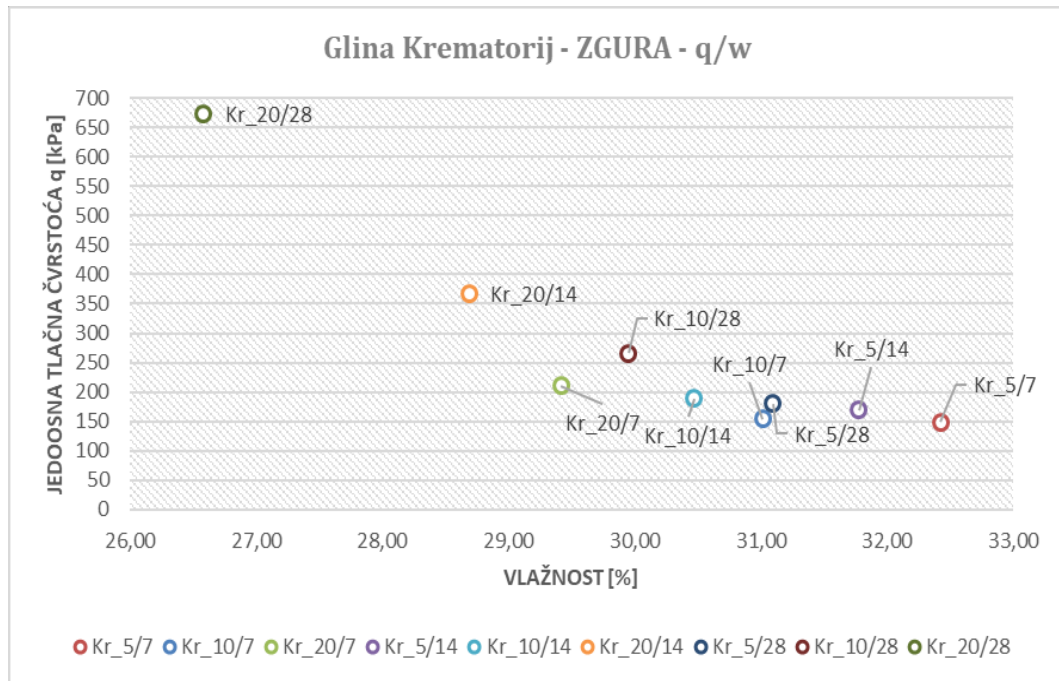
Pri dodatku veziva od 10% letećeg pepela, modul elastičnosti redom 8.75 MPa (7 dana), 11.23 MPa (14 dana), 16.62 MPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 27.27 % (7 dana), 27.71 % (14 dana), 26.37 % (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% letećeg pepela kao veziva, modul elastičnosti značajnije raste 17.62 MPa (7 dana), 22.92 MPa (14 dana), 23.07 MPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 25.40 % (7 dana), 25.36 % (14 dana), 24.66 % (28 dana).

Valja uočiti anomaliju u vrijednosti modula elastičnosti kod 5% veziva, vidimo da za starost od 7 dana modul elastičnosti opada te biva manji od početne vrijednosti te se naknadno povećava i biva veći od vrijednosti modula elastičnosti kod uzorka bez dodanog veziva. Također, uočava se anomalija kod 5% i 10% veziva u odnosu na starost uzorka i opadanje vlažnosti, kod 5% veziva vlažnost opada do 7 dana nakon čega raste do 14 dana za 0.5% te kasnije do 28 dana ponovno opada, ista anomalija se može primjetiti i kod 10% veziva, vlažnost opada do 7 dana nakon čega ima porast za 1.6% do 14 dana i na poslijetku ponovno pada do 28 dana.

Nakon analize rezultata istraživanja može se zaključiti da s povećanjem postotka veziva raste modul elastičnosti dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast modula elastičnosti i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanjem starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem modula elastičnosti kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.

## ODNOS VLAŽNOSI I MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA KOMPOZITA GLINE I ZGURE



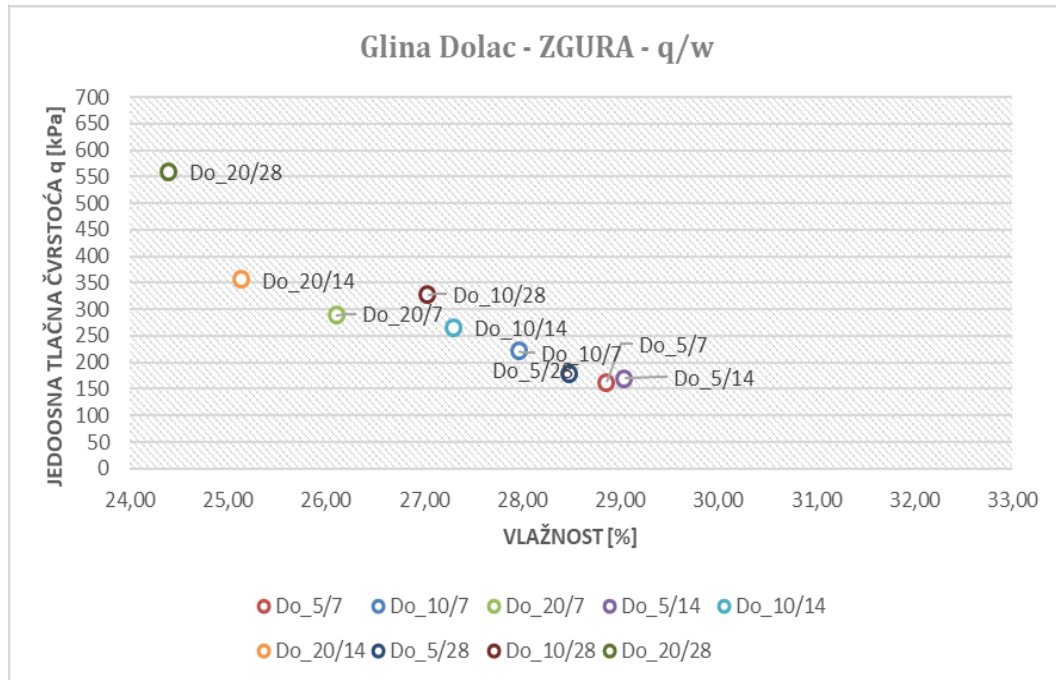
Slika 9.36. Prikaz odnos jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure s lokaliteta Krematorij

Na slici 9.36. prikazani su rezultati analize ispitivanja kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% zgure kao veziva koji imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 148.53kPa (7 dana), 169.19 kPa (14 dana), 180.10 kPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 32.42% (7 dana), 31.77% (14 dana), 31.09% (28 dana).

Pri dodatku od 10% zgure, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 154.34kPa (7 dana), 189.09 kPa (14 dana), 266.22 kPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 31.01% (7 dana), 30.47% (14 2dana), 29.95% (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% zgure kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoću značajnije raste 211.09kPa (7 dana), 367.39 kPa (14 dana), 672.46 kPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 29.41% (7 dana), 28.69% (14 2dana), 26.58% (28 dana).

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



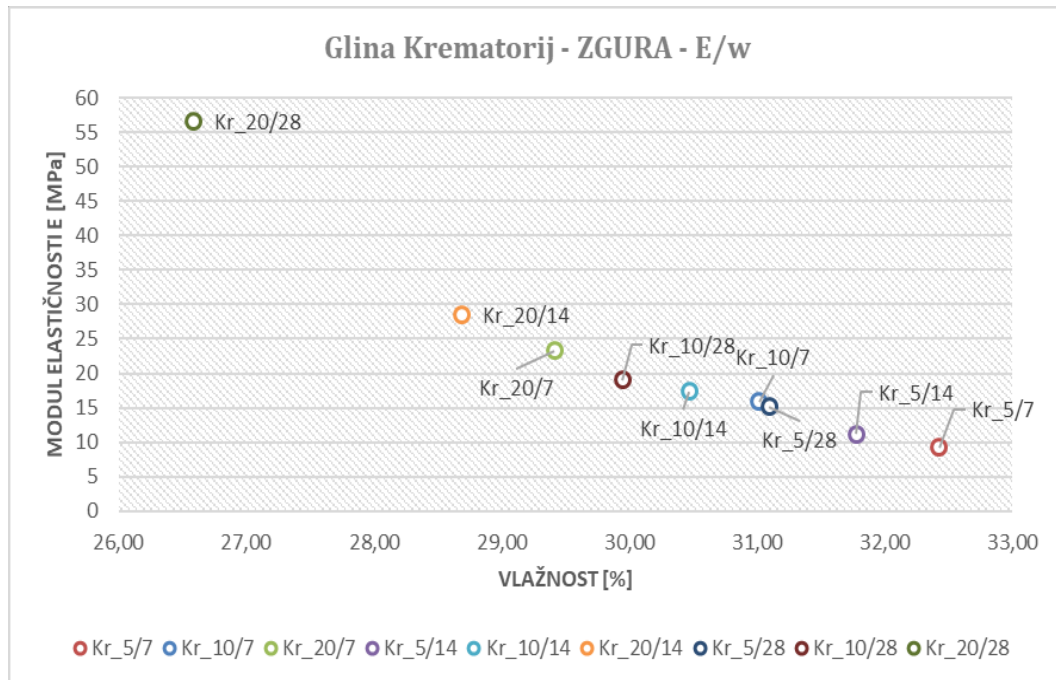
Slika 9.37. Prikaz odnos jednoosne tlačne čvrstoće i vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure s lokaliteta Dolac

Na slici 9.37. primjećuje se da kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% zgure kao veziva imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 163.02kPa (7 dana), 169.79kPa (14 dana), 177.98 kPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 28.86% (7 dana), 29.04% (14 dana), 28.48% (28 dana). Pri dodatku od 10% zgure, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 222.13kPa (7 dana), 264.52 kPa (14 dana), 328.04 kPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 27.97% (7 dana), 27.30% (14 dana), 27.04% (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% zgure kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoću značajnije raste 290.12kPa (7 dana), 355.92 kPa (14 dana), 560.19 kPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 26.11% (7 dana), 25.14% (14 dana), 24.39% (28 dana).

Valja uočiti anomaliju kod 5% veziva u odnosu na starost uzorka i opadanje vlažnosti, kod 5% veziva vlažnost opada do 7 dana nakon čega raste do 14 dana za 0.62% te na poslijetku ponovno opada do 28 dana.

Također, vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka, izuzevši anomaliju kod 5% veziva. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.



Slika 9.38. Prikaz odnos modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgre s lokaliteta Krematorij

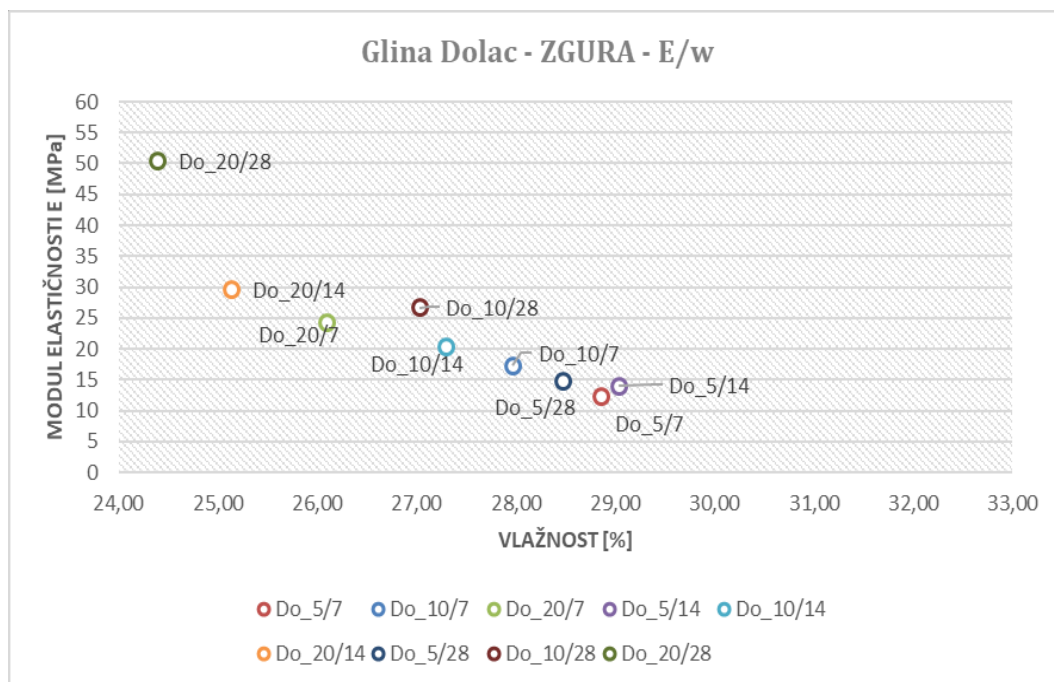
Analizom rezultata na slici 9.38. primjećuje se da kompoziti gline Krematorija poboljšani sa 5% zgre kao veziva imaju modul elastičnosti redom 9.26 MPa (7 dana), 11.21 MPa (14 dana), 15.18 MPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 32.42 % (7 dana), 31.77 % (14 dana), 31.09 % (28 dana).

Pri dodatku od 10% zgre, modul elastičnosti raste redom 15.91 MPa (7 dana), 17.37 MPa (14 dana), 19.05 MPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 31.01 % (7 dana), 30.47 % (14 dana), 29.95 % (28 dana).

Pri poboljšanju gline sa 20% zgre kao veziva, modul elastičnosti značajnije raste 23.27 MPa (7 dana), 28.55 MPa (14 dana), 56.63 MPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 29.41 % (7 dana), 28.69 % (14 dana), 26.58 % (28 dana).

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste modul elastičnosti dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast modula elastičnosti i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem modula elastičnosti kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.





Slika 9.39. Prikaz odnosa modula elastičnosti i vlažnosti uzoraka kompozita gline i zgure s lokaliteta Dolac

Analizom rezultata na slici 9.39. primjećuje se da kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5 % zgure kao veziva imaju modul elastičnosti redom 12.23 MPa (7 dana), 13.98 MPa (14 dana), 14.72 MPa (28 dana), dok vlažnost uzorka iznosi 28.86 % (7 dana), 29.04 % (14 dana), 28.48 % (28 dana). Pri dodatku od 10 % zgure, modul elastičnosti raste redom 17.25 MPa (7 dana), 20.35 MPa (14 dana), 26.77 MPa (28 dana), dok se vlažnost reducira od 27.97 % (7 dana), 27.30 % (14 dana), 27.04 % (28 dana).

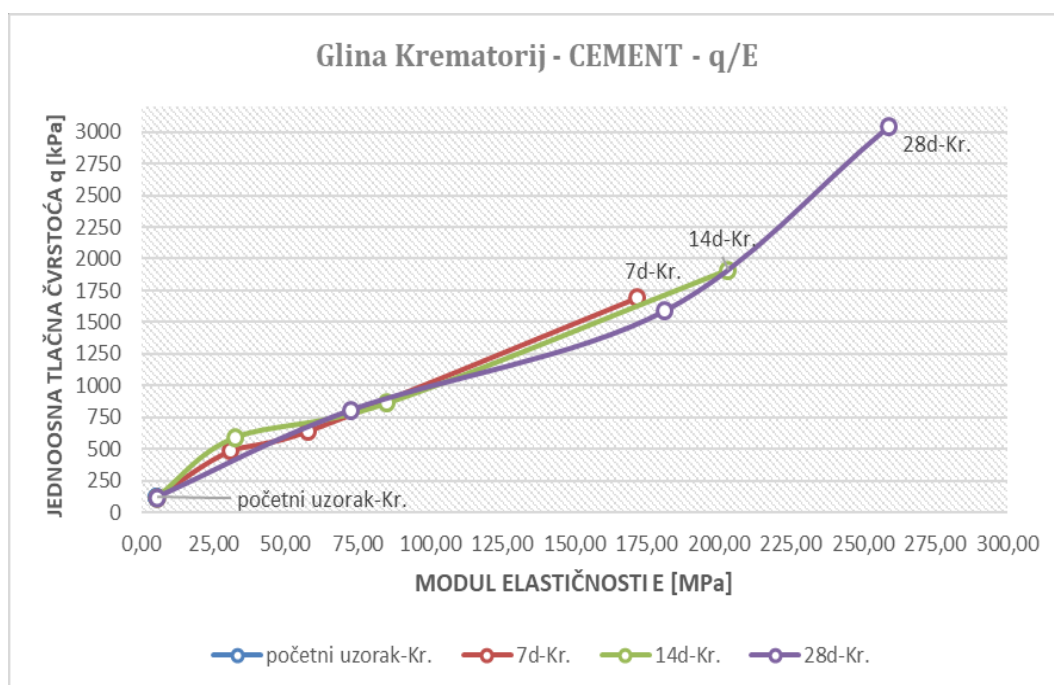
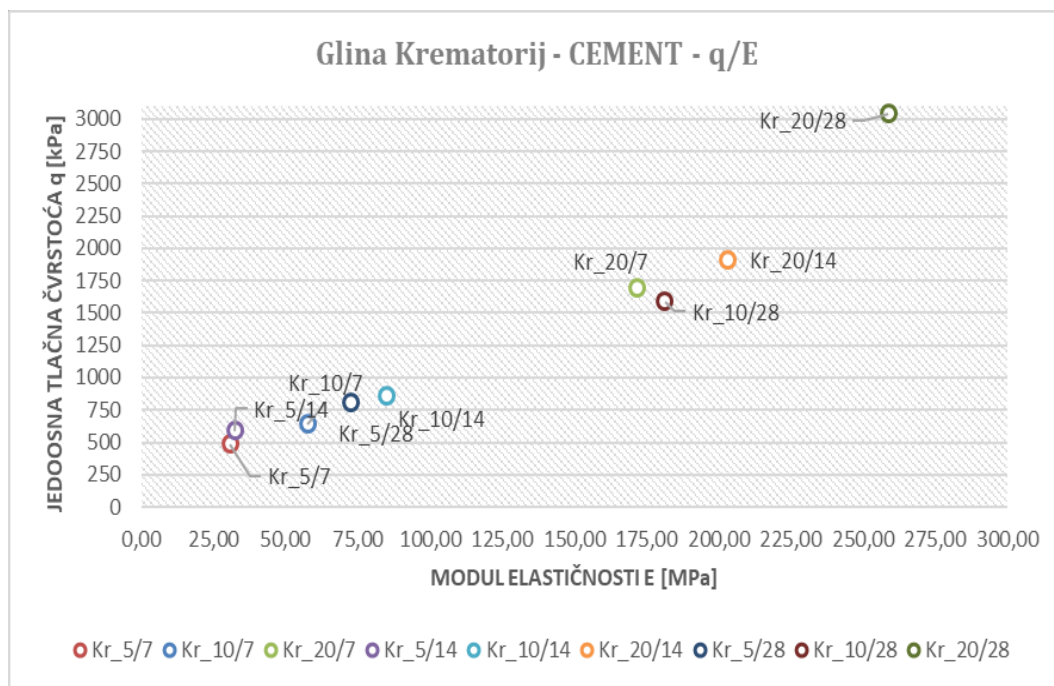
Pri poboljšanju gline sa 20 % zgure kao veziva, modul elastičnosti značajnije raste 24.29 MPa (7 dana), 29.68 MPa (14 dana), 50.35 MPa (28 dana), dok se vlažnost uzorka reducira te iznosi 26.11 % (7 dana), 25.14 % (14 dana), 24.39 % (28 dana).

Valja uočiti anomaliju kod 5% veziva u odnosu na starost uzorka i opadanje vlažnosti, kod 5% veziva vlažnost opada do 7 dana nakon čega raste do 14 dana za 0.62 % te na poslijetku ponovno opada do 28 dana.

Zaključno sa slike 9.39. može se potvrditi da s povećanjem postotka veziva raste modul elastičnosti dok vlažnost uzorka biva reducirana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast modula elastičnosti i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka, izuzevši anomaliju kod 5% veziva. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem modula elastičnosti kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.

## 9.6. KARAKTERISTIČNA PONAŠANJA ČVRSTOĆE I KRUTOSTI ZAGREBAČKE GLINE POBOLJŠANE RAZLIČITIM VEZIVIMA

### KRUTOST KOMPOZITA GLINE I CEMENTA



Slika 9.40. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kompozita gline i cementa za lokalitet Krematorij

Uzorak gline Krematorij bez veziva ima jednoosnu tlačnu čvrstoću 125.49 kPa te modul stišljivosti od 5.50 MPa.

Na slici 9. 40. prikazana je analiza krutost zagrebačke gline, tj. odnos jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kompozita gline cementa za lokalitet gline Krematorij. Sa slike se može primjetiti da kompoziti gline Krematorij poboljšani sa 5% cementa kao veziva imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 485.00 kPa (7 dana), 591.88 kPa (14 dana), 808.75 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 30.78 MPa (7 dana), 32.42 MPa (14 dana), 72.53 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste za 286.50 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 18.06 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 26.82 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 459.64 % do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 5.06 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 55.30 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stišljivosti značajna za starost uzorka do 7 dana, nakon čega intenzitet rasta opada od 7 do 14 dana te se ponovno nakon 14 dana intenzitet rasta povećava do 28 dana starosti uzorka.

Pri dodatku od 10% cementa, jednoosna tlačna čvrstoća raste redom 640.00 kPa (7 dana), 861.25 kPa (14 dana), 1590.00 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 57.64 MPa (7 dana), 84.88 MPa (14 dana), 181.35 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 410.02 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 25.69 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 45.83 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 947.91 % do 7. dana, od 7. do 14. dana rast iznosi 32.10 % te na poslijetku od 14. do 28. dana povećanje modula iznosi 53.20 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i modula elastičnosti najveći za starost uzorka od 7 dana zatim intenzitet povećanja opada do 14 dana te se nakon 14 dana intenzitet ponovno povećava do starosti od 28 dana. Vidljivo je da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stišljivosti značajna za sve starosti uzorka od kojih moramo izdvojiti povećanje modula elastičnosti za starost uzorka od 7 dana koji pri 10% veziva iznosi 947.91 % ili 10.48 puta u odnosu na početnu vrijednosti modula elastičnosti kod uzorka bez veziva.

Također kod starosti uzorka od 28 dana pri 10% veziva, jednoosna tlačna čvrstoća se povećala 12.67 puta dok se modul stišljivosti povećao 32.97 puta u odnosu na vrijednosti istih parametara kod uzorka bez veziva što će reći da sa 10% cementa kao

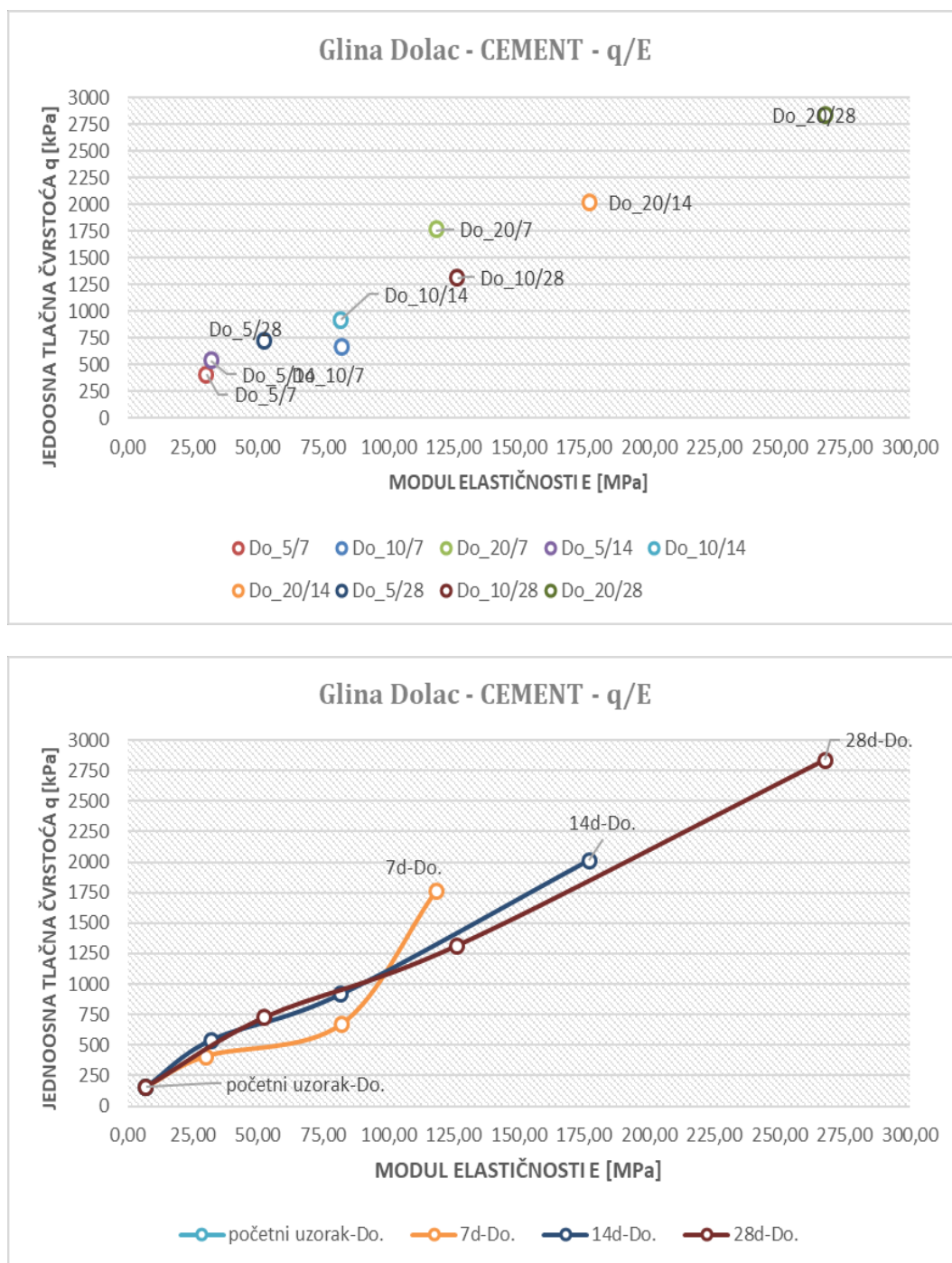
vezivom, značajno utječemo na povećanje parametara čvrstoće kao i parametara deformabilnosti.

Pri poboljšanju gline sa 20% cementa kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoća značajno raste i to 1691.25 kPa (7 dana), 1912.50 kPa (14 dana), 3040.00 kPa (28 dana), dok se modul elastičnosti uzorka poveća na 171.80 MPa (7 dana), 203.43 MPa (14 dana), 258.88 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste za 13.48 puta za starost uzorka do 7 dana, od 7. do 14. dana raste za 11.57 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 37.09 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast za 31.24 puta za starost uzorka do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 15.55 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 21.42 %.

Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i modula elastičnosti najveći za starost uzorka od 7 dana zatim intenzitet povećanja opada do 14. dana te se nakon 14. dana intenzitet ponovno povećava do starosti od 28 dana. Vidljivo je da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stišljivosti značajna za sve starosti uzorka od kojih moramo izdvojiti povećanje modula elastičnosti za starost uzorka od 7 dana koji pri 20% veziva iznosi 31.23 puta ili 3023.55 % dok povećanje jednoosne tlačne čvrstoće iznosi 13.48 puta ili 1247.77 % u odnosu na početnu vrijednost istih parametara kod uzorka bez veziva.

Također kod starosti uzorka od 28 dana pri 20% veziva, jednoosna tlačna čvrstoća se povećala 24.23 puta dok se modul stišljivosti povećao 47.07 puta u odnosu na vrijednosti istih parametara kod uzorka bez veziva što će reći da sa 20% cementa kao vezivom, vrlo značajno se utječe na povećanje parametara čvrstoće kao i parametara deformabilnosti.

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća kao i modul elastičnosti. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanje modula elastičnosti uzorka sa povećanjem starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanjem modula elastičnosti uzorka za isti postotak veziva.



Slika 9.41. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitet Dolac

Uzorak gline Dolca bez veziva ima jednoosnu tlačnu čvrstoću 155.19 kPa te modul elastičnosti od 7.03 MPa.

Na slici 9. 41. prikazana je analiza krutost zagrebačke gline, tj. odnos jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kompozita gline i cementa za lokalitet Dolac. Na temelju rezultata istraživanja i analize može se iščitati da kompoziti gline Dolca poboljšani sa

5% cementa kao veziva imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 407.67 kPa (7 dana), 539.17 kPa (14 dana), 725.83 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 30.15 MPa (7 dana), 31.99 MPa (14 dana), 52.47 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste za 162.70 % do 7 dana, od 7. do 14. dana raste za 24.39 % te od 14. do 28. dana imamo povećanje od 25.72 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 329.18 % do 7 dana, od 7. do 14. dana rast iznosi 5.76 % te na poslijetku od 14. do 28. dana povećanje modula iznosi 39.02 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stižljivosti značajna za starost uzorka do 7 dana, nakon čega intenzitet rasta opada od 7 do 14 dana te se ponovno nakon 14 dana intenzitet rasta povećava do 28 dana starosti uzorka.

Pri dodatku od 10% cementa, jednoosna tlačna čvrstoća raste redom 668.50 kPa (7 dana), 916.67 kPa (14 dana), 1315.00 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 82.00 MPa (7 dana), 81.98 MPa (14 dana), 126.53 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 330.78 % do 7 dana, od 7. do 14. dana raste za 27.07 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 30.29 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast za 11.67 puta za starost uzorka od 7 dana, od 7. do 14. dana očituje se pad modula stižljivosti za 0.03 % te na poslijetku od 14. do 28. dana imamo ponovno povećanje modula stižljivosti za 35.21 %.

Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i modula elastičnosti najveći za starost uzorka od 7 dana zatim intenzitet povećanja opada do 14 dana gdje uočavamo pad u vidu smanjenja modula elastičnosti, te se nakon 14. dana intenzitet ponovno povećava do starosti od 28 dana. Vidljivo je da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stižljivosti značajna za sve starosti uzorka od kojih moramo izdvojiti povećanje modula elastičnosti za starost uzorka od 7 dana koji pri 10% veziva iznosi 1067.31 % ili 11.67 puta u odnosu na početnu vrijednosti modula elastičnosti kod uzorka bez veziva.

Također kod starosti uzorka od 28 dana pri 10% veziva, jednoosna tlačna čvrstoća se povećala 8.47 puta dok se modul stižljivosti povećao 18.01 puta u odnosu na vrijednosti istih parametara kod uzorka bez veziva što će reći da sa 10% cementa kao vezivom, značajno utječemo na povećanje parametara čvrstoće kao i parametara deformabilnosti.

Pri poboljšanju gline sa 20% cementa kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoća značajno raste i to 1763.00 kPa (7 dana), 2013.33 kPa (14 dana), 2835.00 kPa (28 dana), dok se modul elastičnosti uzorka poveća na 118.36 MPa (7 dana), 177.11 MPa (14 dana),

267.56 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste za 11.36 puta za starost uzorka do 7 dana, od 7. do 14. dana raste za 12.43 % te od 14. do 28. dana imamo povećanje od 28.98 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast za 16.85 puta za starost uzorka do 7 dana, od 7. do 14. dana rast iznosi 33.17 % te na poslijetku od 14. do 28. dana povećanje modula iznosi 33.80 %.

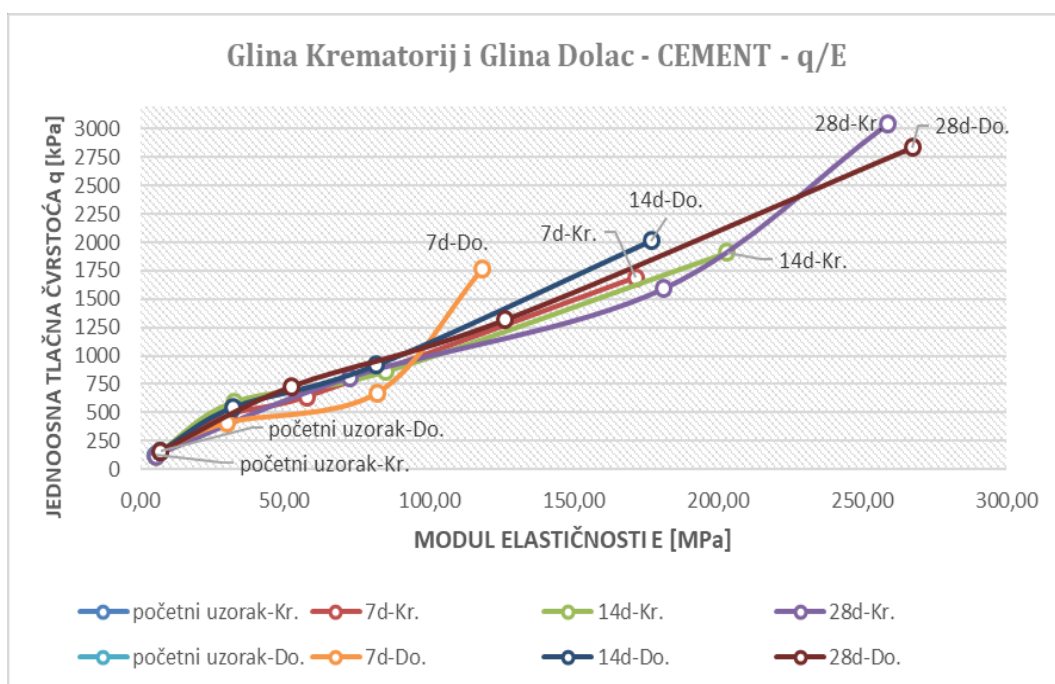
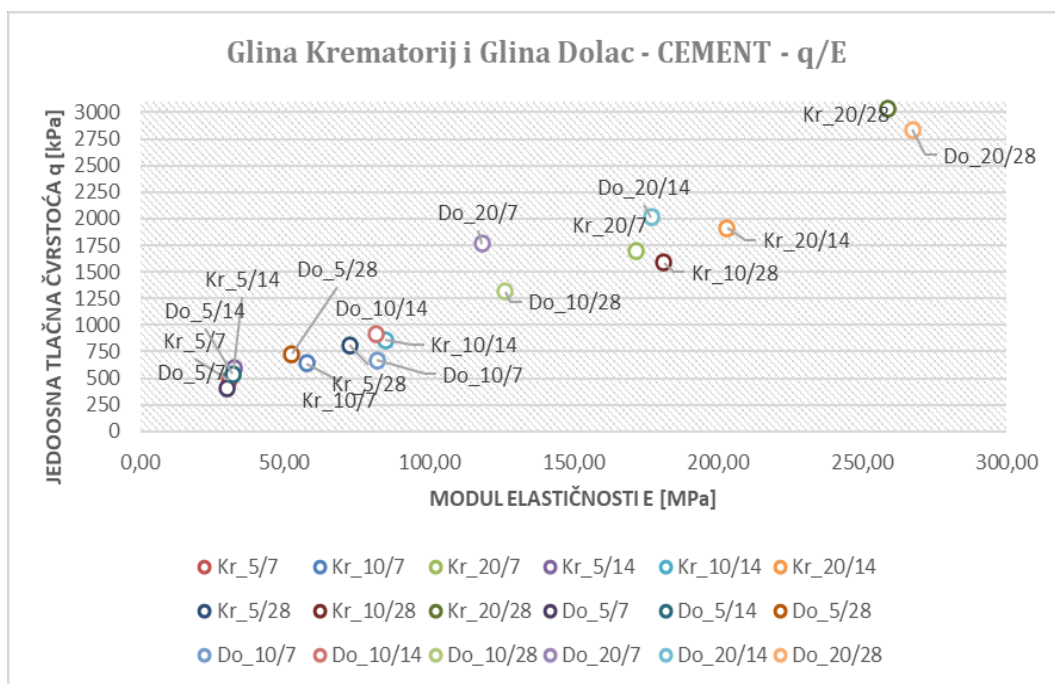
Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i modula elastičnosti najveći za starost uzorka od 7 dana zatim intenzitet povećanja opada do 14. dana te se nakon 14. dana intenzitet ponovno povećava do starosti od 28 dana. Vidljivo je da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stišljivosti značajna za sve starosti uzorka od kojih moramo izdvojiti povećanje modula elastičnosti za starost uzorka od 7 dana koji pri 20% veziva iznosi 16.85 puta ili 1584.89 % dok povećanje jednoosne tlačne čvrstoće iznosi 11.36 puta ili 1036.06 % u odnosu na početnu vrijednost istih parametara kod uzorka bez veziva.

Također kod starosti uzorka od 28 dana pri 20% veziva, jednoosna tlačna čvrstoća se povećala 18.27 puta dok se modul stišljivosti povećao 38.09 puta u odnosu na vrijednosti istih parametara kod uzorka bez veziva.

Zaključno na slici 9. 42. prikazana je krutost zagrebačke gline, tj. odnos jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kompozita gline i cementa za oba lokaliteta Krematorij i Dolac. Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća kao i modul elastičnosti. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanje modula elastičnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka.

Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanjem modula elastičnosti uzorka za isti postotak veziva.

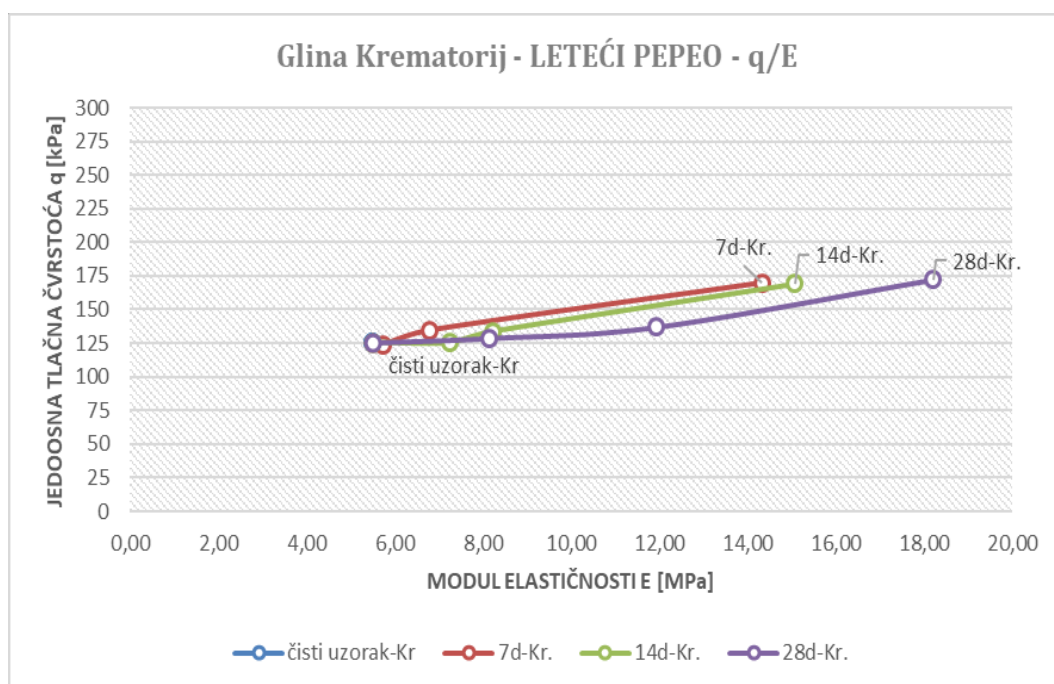
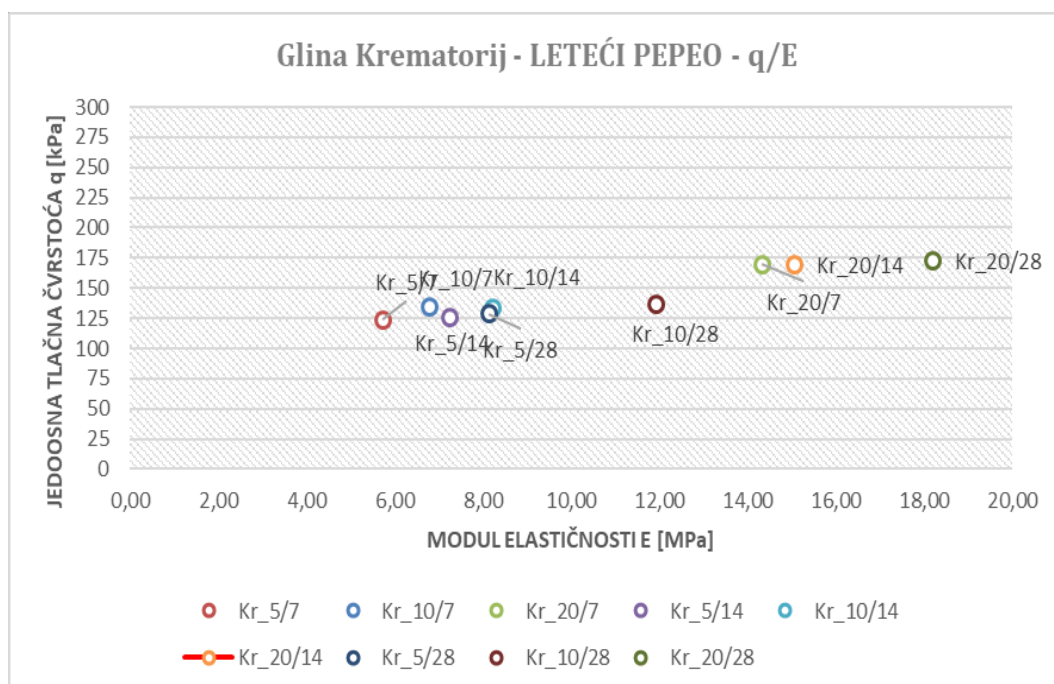
Generalno može se reći da s povećanjem postotka veziva u uzorku gline povećavamo i jednoosnu tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti gdje je intenzitet povećanja modula elastičnosti skoro 2 puta veći u odnosu na intenzitet povećanja jednoosne tlačne čvrstoće pri 20% veziva za starost uzorka od 28 dana (slika 9.42.)



Slika 9.42. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i cementa za lokalitet Krematorij i Dolac



## KRUTOST KOMPOZITA GLINE I LETEĆEG PEPELA



Slika 9.43. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitet Krematorij

Uzorak gline Krematorij bez veziva ima jednoosnu tlačnu čvrstoću 125.49 kPa te modul elastičnosti od 5.50 MPa.

Na slici 9. 43. prikazana je analiza krutost zagrebačke gline, tj. odnos jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kompozita gline i letećeg pepela za lokalitet gline

Krematorij. Sa slike se može zaključiti da kompoziti poboljšani 5% letećem pepelom kao vezivom koji imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 123.56kPa (7 dana), 125.20kPa (14 dana), 128.86 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 5.73MPa (7 dana), 7.26MPa (14 dana), 8.14MPa (28 dana).

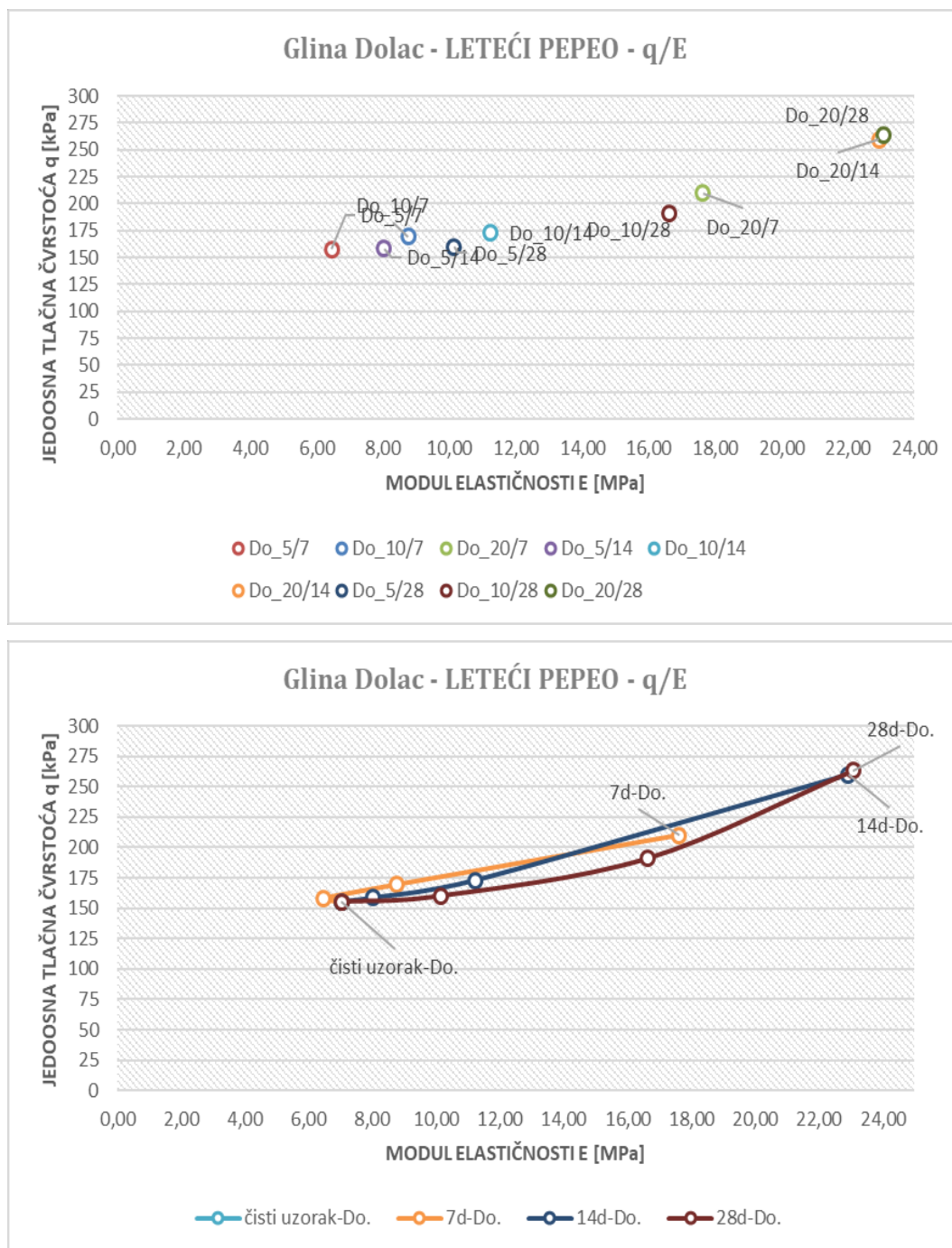
Nakon 7 dana jednoosna tlačna čvrstoća uzorka opada za 1.54% dok modul elastičnosti raste za 4.1%, za starost uzorka 14 dana imamo opadanje čvrstoće za 0.23% dok modul raste za 32.05%, u konačnici za starost uzorka od 28 dana imamo rast jednoosne tlačne čvrstoće za 2.69% dok istovremeno porast modula stišljivosti iznosi 47.95%. Dok jednoosna tlačna čvrstoća pri 5% veziva počinje rasti nakon 7 dana starosti te tek nakon 14 dana postaje veća od početne čvrstoće uzorka bez veziva, modul elastičnosti raste neovisno o opadanju jednoosne tlačne čvrstoće.

Pri dodatku od 10% letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoća raste redom 134.51 kPa (7 dana), 133.77 kPa (14 dana), 137.07 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 6.80 MPa (7 dana), 8.23 MPa (14 dana), 11.91 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste do 7 dana, od 7 do 14 dana opada te biva manja za 0.56% nego 7 dan, od 14 do 28 dana imamo povećanje od 2.4% u odnosu na vrijednost čvrstoće 14 dana, za isti vremeniski period modul elastičnosti ima konstantan rast 4.1% do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 21.17% te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 10.75% .

Pri poboljšanju gline sa 20% letećeg pepela kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoća značajnije raste i to 169.68 kPa (7 dana), 169.19 kPa (14 dana), 172.27 kPa (28 dana), dok se modul elastičnosti uzorka povećava za 14.33 MPa (7 dana), 15.06 (14 dana), 18.20 (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 35.22% do 7 dana, od 7 do 14 dana opada te biva manja za 0.29% nego 7 dan, od 14 do 28 dana imamo povećanje od 1.79% u odnosu na vrijednost čvrstoće 14 dana, za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 160.45% do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 4.89% te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 17.23% .

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća kao i modul elastičnosti. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanje modula elastičnosti uzorka sa povećanjem starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanjem modula elastičnosti uzorka za isti postotak veziva.

Valja primjetiti kako sa povećanjem postotka veziva u uzorku gline povećanje modula elastičnosti biva veće u odnosu na povećanje jednoosne tlačne čvrstoće, što će reći kako letećim pepelom kao vezivom značajnije utječemo na povećanje deformabilnih karakteristika u odnosu na parametre čvrstoće u odnosu na uzorak bez veziva.



Slika 9.44. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzorka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitet Dolac

Uzorak gline Dolca bez veziva ima jednoosnu tlačnu čvrstoću 155.19 kPa te modul elastičnosti od 7.03 MPa.

Na slici 9.44. prikazana je analiza krutosti zagrebačke gline s lokaliteta Dolac poboljšane letećim pepelom. Sa slike je vidljivo da kompoziti gline Dolca poboljšani sa 5% letećeg pepela kao veziva imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 157.76 kPa (7 dana), 158.47 kPa (14 dana), 160.06 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 6.45 MPa (7 dana), 8.03 MPa (14 dana), 10.13 MPa (28 dana). Vidljivo je da nakon 7 dana jednoosna tlačna čvrstoća uzorka raste za 1.66% dok modul elastičnosti opada za 8.19% u odnosu na uzorak bez veziva. Za starost uzorka od 14 dana imamo porast jednoosne tlačne čvrstoće za 0.45% dok modul raste za 19.71 %, u odnosu na vrijednosti nakon 7 dana, dok u konačnici za starost uzorka od 28 dana imamo rast jednoosne tlačne čvrstoće za 0.99 % te istovremeno porast modula stišljivosti iznosi 20.72% u odnosu na vrijednosti uzorka od 14 dana starosti.

Pri dodatku od 10% letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 169.22 kPa (7 dana), 172.83 kPa (14 dana), 190.90 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 8.75 MPa (7 dana), 11.23 MPa (14 dana), 16.62 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 9.04% do 7 dana, 2.1% od 7 do 14 dana te 9.46% od 14 do 28 dana. Modul elastičnosti raste za 24.56% do 7 dana, 22.11% od 7 do 14 dana te 32.40% od 14 do 28 dana. Uočava se značajan porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti do 7 dana te od 14 do 28 dana, dok je porast od 7 do 14 dana nešto manji.

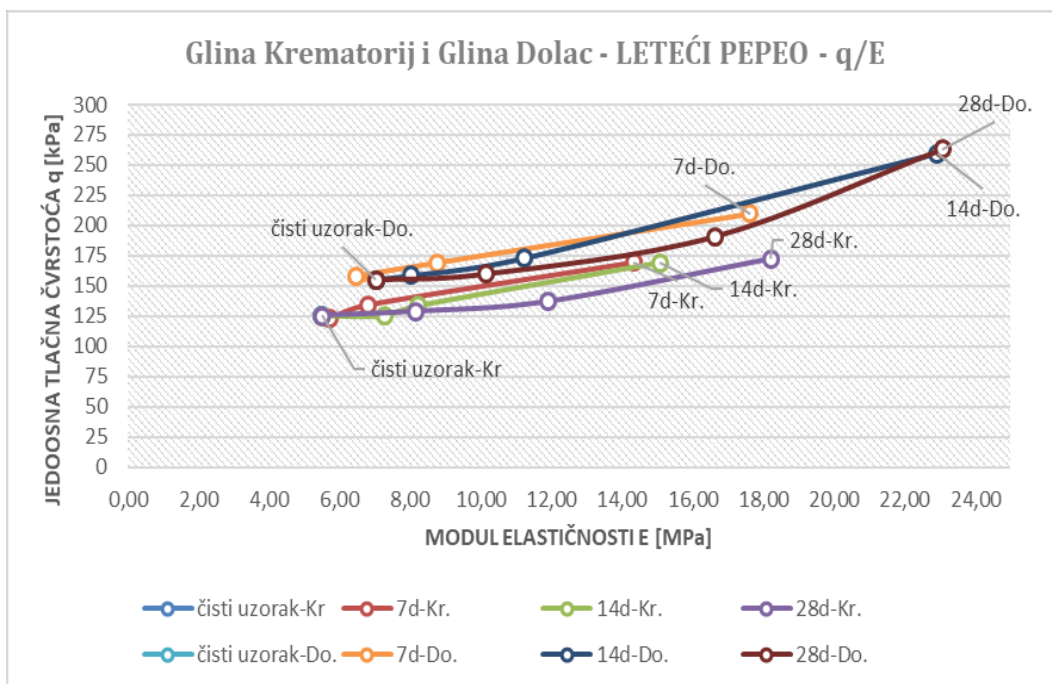
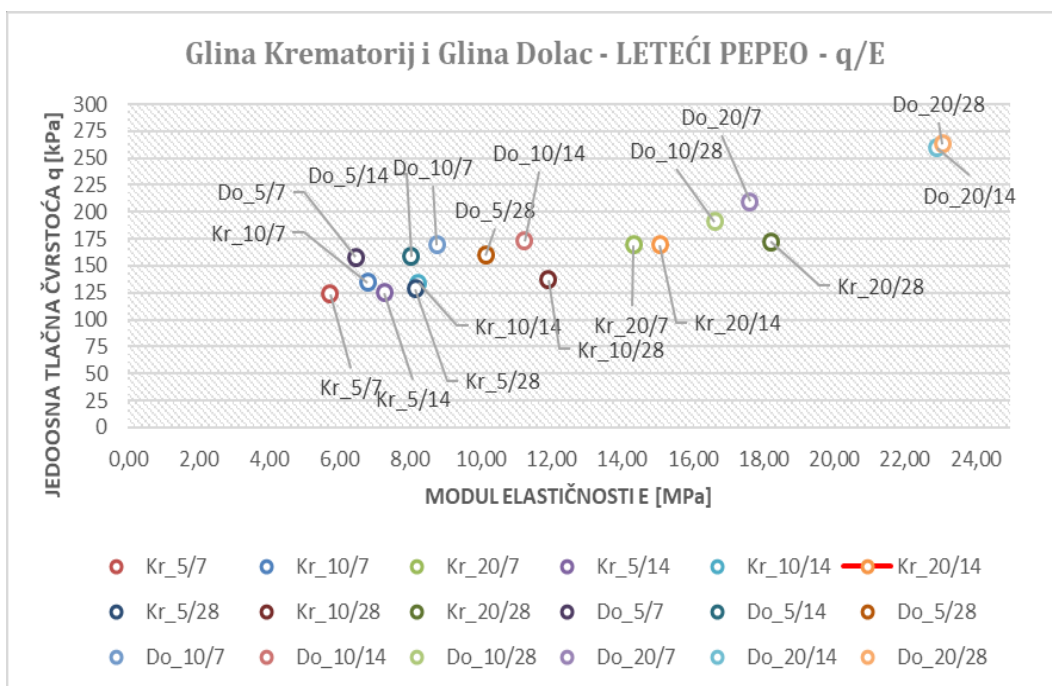
Pri poboljšanju gline sa 20% letećeg pepela kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoću značajnije raste i to 209.86 kPa (7 dana), 259.47 kPa (14 dana), 263.17 kPa (28 dana), dok se modul elastičnosti uzorka povećava na 17.62 MPa (7 dana), 22.92 (14 dana), 23.07 (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 35.23 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 19.12 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 1.41 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 150.77 % do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 23.13 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 0.66 %.

Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stišljivosti značajna do 14 dana, a nakon 14 dana uočava se „zasićenje“ uzorka što za posljedicu ima smanjeni porast (vrijednosti su približne) jednoosne tlačne čvrstoće kao i modula elastičnosti kompozita sa 20% veziva.

Zaključno na slici 9.45. prikazana je analiza krutosti zagrebačke gline sa oba lokaliteta (Krematorij i Dolac) poboljšana vezivom letećeg pepela iz koje je vijivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća kao i modul elastičnosti izuzevši anomaliju vrijednosti modula stišljivosti kod 5% veziva za starost uzorka od 7 dana. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanje modula elastičnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka.

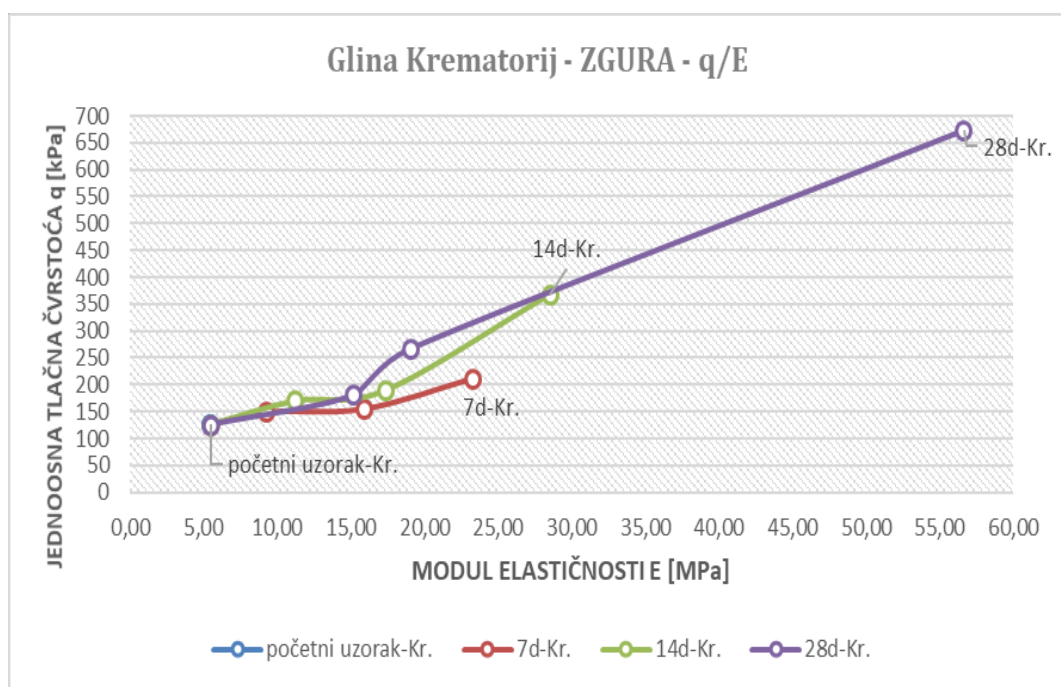
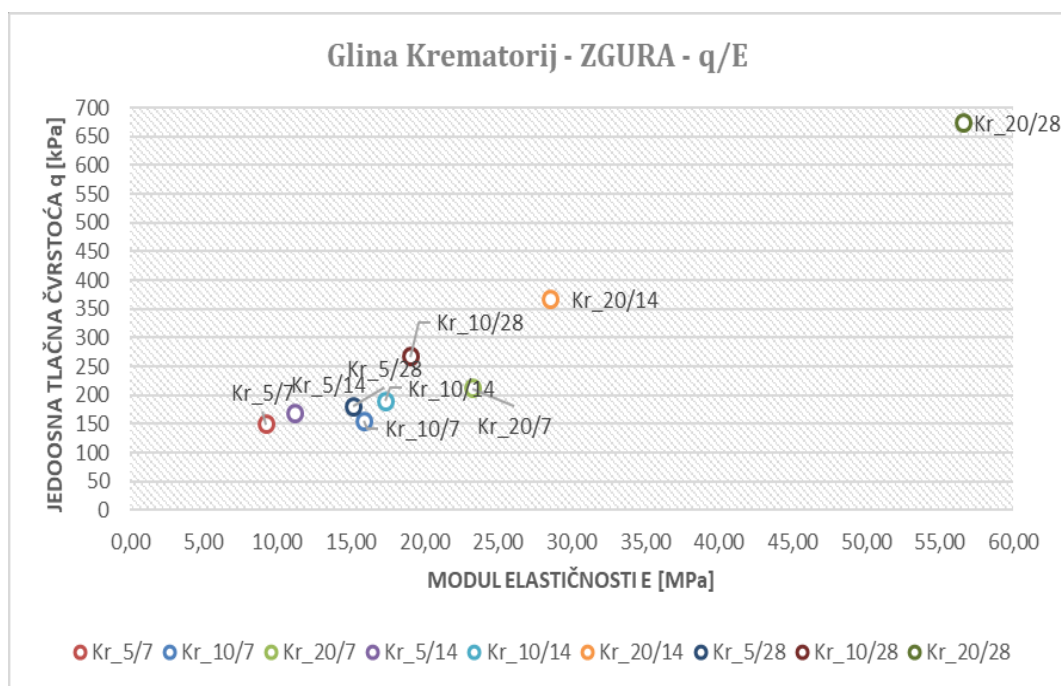
Iz analiza se može zaključiti kako sa povećanjem postotka veziva u uzorku gline povećanje modula elastičnosti biva veće u odnosu na povećanje jednoosne tlačne čvrstoće, što će reći kako letećim pepelom kao vezivom značajnije utječemo na povećanje deformabilnih karakteristika u odnosu na parametre čvrstoće u odnosu na uzorak bez veziva.

Generalno možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanjem modula elastičnosti uzorka za isti postotak veziva (slika 9.45.)



Slika 9.45. Prikaz odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i letećeg pepela za lokalitet Krematorij i Dolac

## KRUTOST KOMPOZITA GLINE I ZGURE



Slika 9.46. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitet Krematorij

Uzorak gline Krematorij bez veziva ima jednoosnu tlačnu čvrstoću 125.49 kPa te modul stišljivosti od 5.50 MPa.

Na slici 9.46. prikazana je analiza krutosti zagrebačke gline s lokaliteta Krematorij poboljšane zgurom. Vidljivo je da kompoziti gline sa 5% zgure imaju jednoosnu tlačnu

čvrstoću redom 148.53 kPa (7 dana), 169.19 kPa (14 dana), 180.10 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 9.26 MPa (7 dana), 11.21 MPa (14 dana), 15.18 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 18.37 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 12.21 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 6.06 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 68.27 % do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 17.40 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 26.19 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stišljivosti značajna do 14 dana, a nakon 14 dana uočava se značajniji porast modula elastičnosti u odnosu na povećanje jednoosne tlačne čvrstoće uzorka.

Pri dodatku od 10% zgure, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 154.34 kPa (7 dana), 189.09 kPa (14 dana), 266.22 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 15.91 MPa (7 dana), 17.37 MPa (14 dana), 19.05 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 23 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 18.37 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 28.97 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 189.21 % do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 8.43 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 8.80 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće najveći nakon 14 dana dok je kod modula elastičnosti najveće povećanje ostvareno do 7 dana starosti uzorka nakon čega je porast znatno manji sve do 28 dana.

Pri poboljšanju gline sa 20% zgure kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoća značajno raste i to 211.09 kPa (7 dana), 367.39 kPa (14 dana), 672.46 kPa (28 dana), dok se modul elastičnosti uzorka poveća na 23.27 MPa (7 dana), 28.55 MPa (14 dana), 56.63 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 68.22 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 42.54 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 45.37 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 323 % do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 18.52 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 46.59 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stišljivosti značajna za sve starosti uzorka od kojih moramo izdvojiti povećanje modula elastičnosti za starost uzorka od 7 dana koji pri 20% veziva iznosi 323 % ili 4.23 puta u odnosu na početnu vrijednosti modula elastičnosti kod uzorka bez veziva.

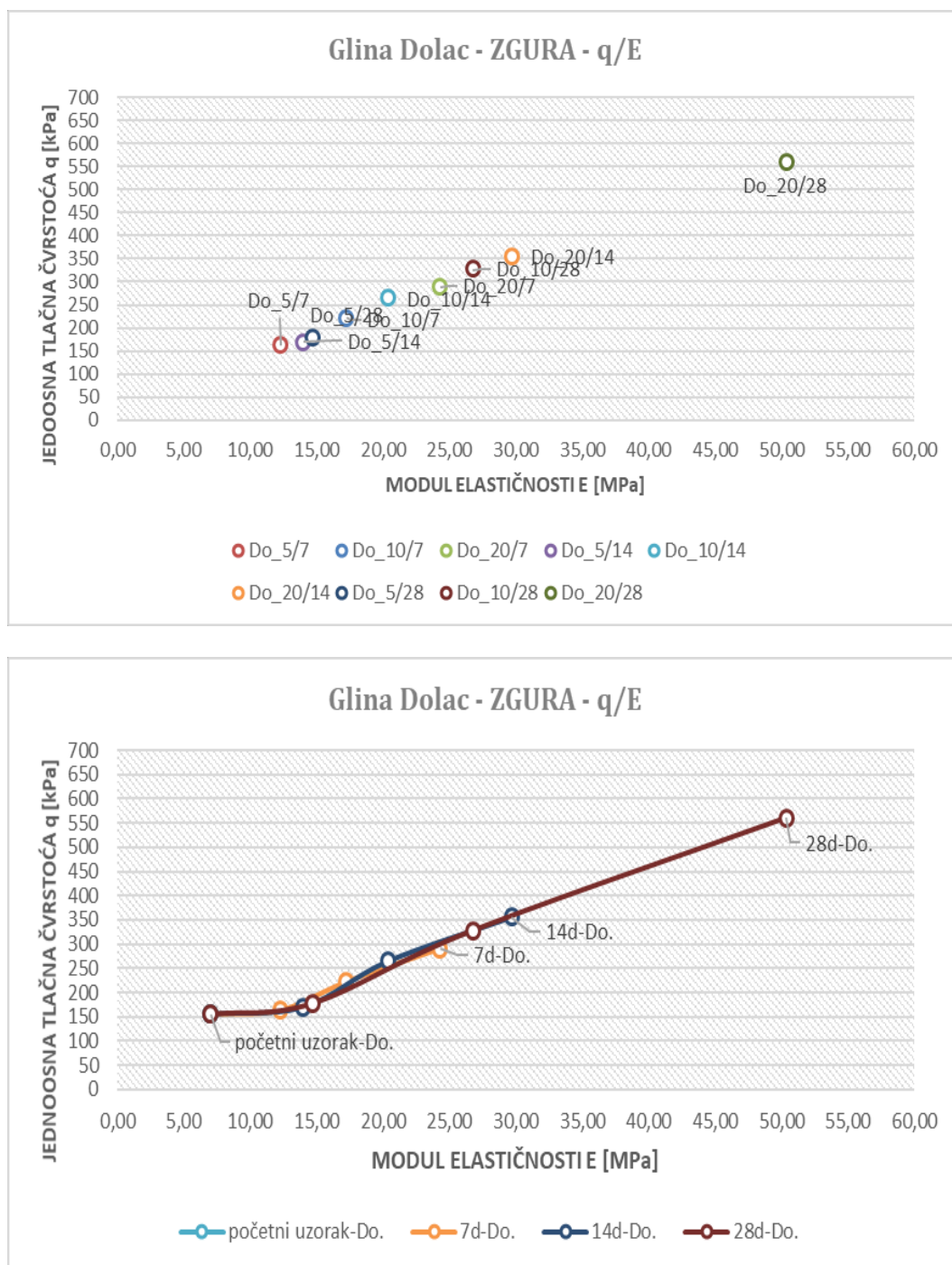
Također kod starosti uzorka od 28 dana pri 20% veziva, jednoosna tlačna čvrstoća se povećala 5.36 puta dok se modul elastičnosti povećao 10.30 puta u odnosu na vrijednosti istih parametara kod uzorka bez veziva što će reći da sa 20% zgure kao



vezivom, značajno utječemo na povećanje parametara čvrstoće kao i parametara deformabilnosti.

Vidljivo je da s povećanjem postotka veziva raste jednoosna tlačna čvrstoća kao i modul elastičnosti. Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanje modula elastičnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka. Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanjem modula elastičnosti uzorka za isti postotak veziva.

Valja primjetiti kako sa povećanjem postotka veziva u uzorku gline povećavamo i jednoosnu tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti gdje je intenzitet povećanja modula elastičnosti skoro 2 puta veći u odnosu na intenzitet povećanja jednoosne tlačne čvrstoće pri 20% veziva nakon 28 dana.



Slika 9.47. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgurom za lokalitet Dolac

Uzorak gline Dolca bez veziva ima jednoosnu tlačnu čvrstoću 155.19 kPa te modul elastičnosti od 7.03 MPa.

Na slici 9.47. prikazana je analiza krutosti zagrebačke gline s lokaliteta Dolac poboljšane zgurom. Iz slike se može primjetiti da kompoziti gline Dolca poboljšani sa

5% zgure imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću redom 163.02 kPa (7 dana), 169.79 kPa (14 dana), 177.98 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 12.23 MPa (7 dana), 13.98 MPa (14 dana), 14.72 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 5.05 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 3.99 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 4.60 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 74.14 % do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 12.52 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 4.98 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće značajnija do 7 dana, nakon čega raste jednoliko za ~ 4.3% dok je porast modul elastičnosti značajan do 7 dana starosti nakon čega intenzitet rasta opada sa povećanjem starosti uzorka i to za 16.89% do 14 dana i za 39.82% nakon 14 dana.

Pri dodatku od 10% zgure, jednoosna tlačna čvrstoću raste redom 222.13 kPa (7 dana), 264.52 kPa (14 dana), 328.04 kPa (28 dana), dok modul elastičnosti iznosi 17.25 MPa (7 dana), 20.35 MPa (14 dana), 26.77 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 43.14 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 16.03 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 19.36 % dok za isti vremenski period modul elastičnosti ima rast od 145.56 % do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 15.23 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 23.97 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i modula elastičnosti najveći nakon starosti od 7 dana zatim intenzitet povećanja opada do 14 dana te se nakon 14 dana ponovno intenzitet povećava do starosti od 28 dana.

Primjećujemo da bi se za jedno područje mogao interpolirati pravac između pripadajućih vrijednosti parametara jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti pri 10% veziva čije je povećanje parametara sa starosti gotovo linearano.

Pri poboljšanju gline sa 20% zgure kao veziva, jednoosna tlačna čvrstoća značajno raste i to 290.12 kPa (7 dana), 355.92 kPa (14 dana), 560.19 kPa (28 dana), dok se modul elastičnosti uzorka poveća na 24.29 MPa (7 dana), 29.68 MPa (14 dana), 50.53 MPa (28 dana). Možemo uočiti kako jednoosna tlačna čvrstoća raste 86.95 % do 7 dana, od 7 do 14 dana raste za 18.49 % te od 14 do 28 dana imamo povećanje od 36.46 % dok za isti vremeniski period modul elastičnosti ima rast od 245.79 % do 7 dana, od 7 do 14 dana rast iznosi 18.16 % te na poslijetku od 14 do 28 dana povećanje modula iznosi 41.05 %. Primjećujemo da je porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i modula elastičnosti najveći za starost uzorka od 7 dana zatim intenzitet povećanja opada do 14 dana te se nakon 14

dana ponovno intenzitet povećava do starosti od 28 dana. Vidljivo je da je porast jednoosne tlačne čvrstoće i modula stišljivosti značajna za sve starosti uzorka od kojih moramo izdvojiti povećanje modula elastičnosti za starost uzorka od 7 dana koji pri 20% veziva iznosi 245.79 % ili 3.46 puta u odnosu na početnu vrijednosti modula elastičnosti kod uzorka bez veziva.

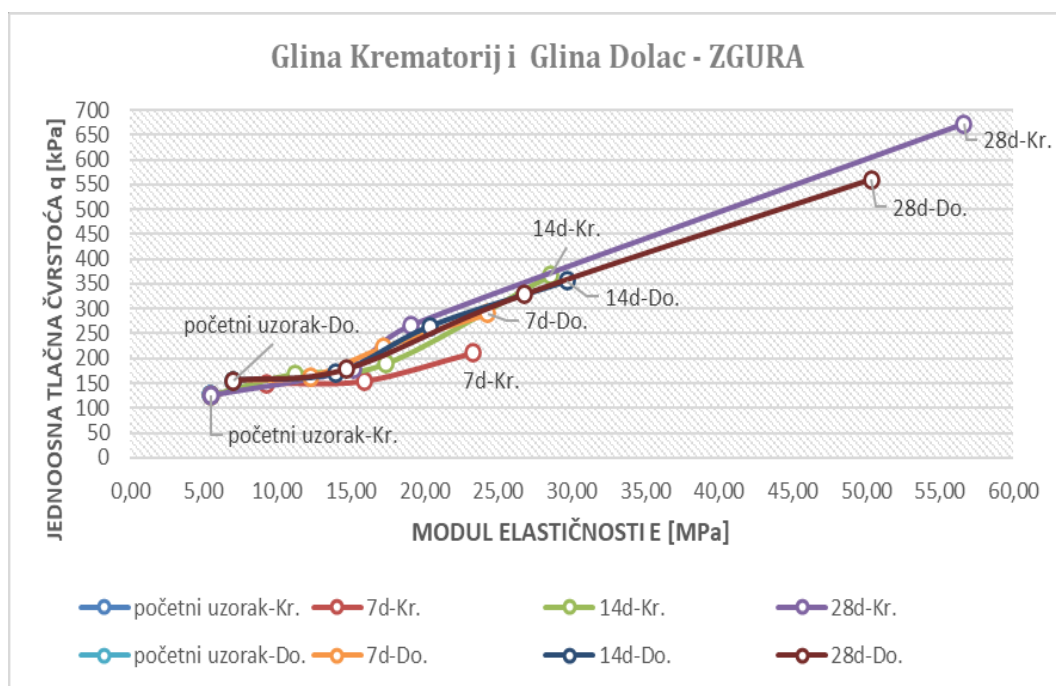
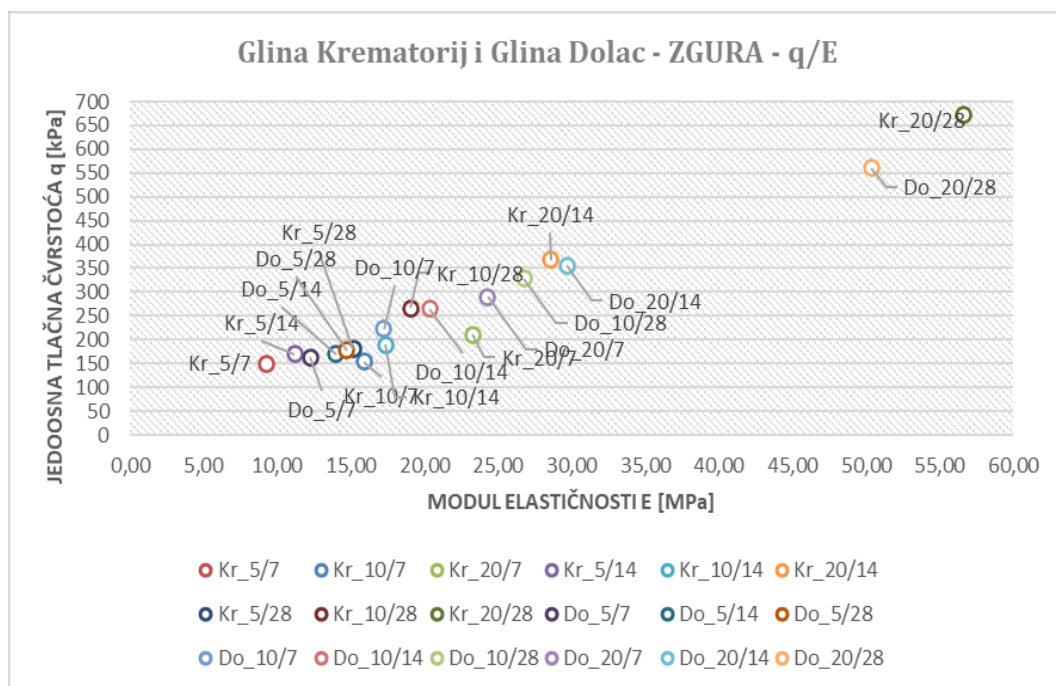
Također kod starosti uzorka od 28 dana pri 20% veziva, jednoosna tlačna čvrstoća se povećala 3.61 puta dok se modul stišljivosti povećao 7.16 puta u odnosu na vrijednosti istih parametara kod uzorka bez veziva što će reći da sa 20% zgure kao vezivom, značajno utječemo na povećanje parametara čvrstoće kao i parametara deformabilnosti. Primjećujemo da bi mogli interpolirati pravac između pripadajućih vrijednosti parametara jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti pri 20% veziva čije je povećanje parametara sa starosti gotovo linearano.

Zaključno na slici 9.48. prikazani su rezultati analize zagrebačke gline s oba lokaliteta (Krematorij i Dolac) poboljšane vezivom zgure. Analizom rezultata se može zaključiti da s povećanjem postotka veziva zgure raste jednoosna tlačna čvrstoća kao i modul elastičnosti.

Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanje modula elastičnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka.

Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće kao i povećanjem modula elastičnosti uzorka za isti postotak veziva.

Generalno može se reći kako sa povećanjem postotka veziva zgure u uzorku gline povećavamo i jednoosnu tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti gdje je intenzitet povećanja modula elastičnosti skoro 2.5 puta veći u odnosu na intenzitet povećanja jednoosne tlačne čvrstoće pri 20% veziva za starost uzorka od 28 dana. (slika 9.48.)



Slika 9.48. Prikaz krutosti, odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka kompozita gline i zgure za lokalitet Krematorij i Dolac

## 9.7. SAŽETAK POGLAVLJA I ZAKLJUČCI

U ovom poglavlju su prikazane analize rezultata ispitivanja kompozita zagrebačke gline i veziva te prikazane nove spoznaje o mehaničkom ponašanju zagrebačke gline u pogledu čvrstoće i krutosti uz fizikalno svojstvo vlažnosti. Posebno su analizirani i diskutirani rezultati utjecaja starosti kompozitnog uzorka od 7, 14 i 28 dana zatim vrste i količine veziva od 5%, 10% i 20% u kompozitnom uzorku.

Iz analiza se mogu zaključiti karakteristična ponašanja gline i veziva obzirom na uvjete mješanja i sazrijevanja kompozitnog uzorka

Analizom rezultata, vidljivo je da kompoziti gline i cementa pokazuju najveći porast jednoosne tlačne čvrstoće s povećanjem udjela cementa, dok kompoziti gline i zgure dolaze odmah nakon njih. Najmanji porast jednoosne tlačne čvrstoće zabilježen je u slučaju miješanja gline s letećim pepelom. Također, kompoziti s cementom pokazuju najizraženiji utjecaj starosti uzorka na povećanje jednoosne tlačne čvrstoće, dok kod uzoraka s letećim pepelom taj utjecaj ostaje najmanji.

Nakon analize rezultata istraživanja može se zaključiti da s povećanjem postotka veziva raste modul elastičnosti dok vlažnost uzorka biva reducirana.

Također promatrajući isti postotak veziva, uočava se porast modula elastičnosti i redukcija vlažnosti uzorka sa povećanje starosti uzorka.

Možemo zaključiti da je starost uzorka proporcionalna sa povećanjem modula elastičnosti kao i sa smanjanjem vlažnosti uzorka za isti postotak veziva.

## 10. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

### 10.1. ZAKLJUČCI

U okviru izrade ovog rada provedena su eksperimentalna istraživanja i potvrđene nove spoznaje o mehaničkom ponašanju zagrebačke gline poboljšane različitim vezivima, poput cementa, letećeg pepela i zgure. Prethodila je detaljna analiza rezultata pokusa na uzorcima kompozita gline i veziva u laboratorijskim uvjetima, s ciljem bolje spoznaje mehaničkih karakteristika zagrebačke gline poboljšane ovim materijalima. Istraživanje je obuhvatilo 432 uzorka kompozita, te je provedeno s ciljem boljeg razumijevanja ponašanja krutosti i čvrstoće zagrebačke gline poboljšane cementom, letećim pepelom i zgurom.

Mješavinom gline i veziva izrađeni su kompozitni uzorci koji su sazrijevali u desikatoru tijekom različitih vremenskih intervala od 7, 14 i 28 dana. Nakon sazrijevanja, kompozitni uzorci podvrgnuti su ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i vlažnosti. Za analize je korišten sekantni modul elastičnosti pri jednoosnoj deformaciji od 1,0 %, dok je za čvrstoću uzimana vršna vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće pri kompresiji.

Na temelju analize rezultata istraživanja krutosti i čvrstoće zagrebačke gline poboljšane cementom, letećim pepelom i zgura, mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- U radu su analizirani i diskutirani rezultati utjecaja tipa i količine veziva, kao i starosti uzorka, na mehaničke osobine kao što su jednoosna tlačna čvrstoća, krutost kompozita u vlažnosti. Iz rezultata je vidljivo da kompoziti gline i cementa pokazuju najveći prirast jednoosne tlačne čvrstoće s povećanjem udjela cementa. Slijede kompoziti gline i zgure, dok je najmanji prirast jednoosne tlačne čvrstoće zabilježen u slučaju miješanja gline s letećim pepelom. Također, kod kompozita s cementom primijećen je najizraženiji utjecaj starosti uzorka na povećanje jednoosne tlačne čvrstoće, dok je za uzorke s letećim pepelom ovaj utjecaj bio najmanje izražen.
- Iako bi se moglo očekivati da će prosječne normalizirane čvrstoće uzoraka geopolimera s Dolca biti veće nego kod uzoraka s Krematorija, zbog nešto veće

vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće gline Dolca (bez dodatka veziva), pokazalo se da je to slučaj samo kada se kao vezivo koristi leteći pepeo. U slučajevima kada se koriste zgura ili cement kao vezivo, normalizirane čvrstoće uzoraka geopolimera su veće kod uzoraka gline Krematorija. Ovaj rezultat može se objasniti činjenicom da su uzorci gline Dolca uglavnom visokoplastični (CH), dok su uzorci gline Krematorija niskoplastični (CL).

- Osim mješavine i količine veziva, čvrstoća i krutost poboljšane gline ovise o brojnim drugim faktorima, uključujući vlažnost, stanje naprezanja i uvjete dreniranja. Zbog tih varijabli, postaje jasno da je potrebno provesti opsežna istraživanja kako bi se bolje razumjela krutost i čvrstoća zagrebačke gline poboljšane različitim vezivima. Važnost ovih ispitivanja također leži u analizi utjecaja industrijskih nusproizvoda kao veziva na poboljšanje zagrebačke gline, što može doprinijeti smanjenju velikih količina industrijskih nusproizvoda u Hrvatskoj i regiji.
- Iz rezultata se jasno vidi da s povećanjem postotka veziva dolazi do rasta jednoosne tlačne čvrstoće, kao i modula elastičnosti. Također, kada se promatra isti postotak veziva, uočava se da uz povećanje starosti uzorka dolazi do porasta jednoosne tlačne čvrstoće i povećanja modula elastičnosti. Možemo zaključiti da starost uzorka ima izravan odnos s povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće i krutosti za isti postotak veziva.

Generalno se može zaključiti da je postignut cilj ovog istraživanja i dati su slijedeći znanstveni doprinosi:

- Prvo, prikazani rezultati istraživanja pokazuju da se krutost i čvrstoća zagrebačke gline mogu značajno povećati miješanjem s različitim sintetskim vezivima, poput letećeg pepela i zgure, čime se smanjuje emisija štetnih plinova na minimalnu moguću razinu. Uvođenjem ovih sintetskih veziva, moguće je smanjiti potrebu za korištenjem cementa i vapna u procesu poboljšanja zagrebačke gline, uz istovremeno iskorištavanje otpada iz drugih industrijskih procesa, kao što su zgura i leteći pepeo.
- Drugo, bolje razumijevanje svojstava krutosti i čvrstoće poboljšane gline omogućava pouzdanije predviđanje ponašanja geotehničkih konstrukcija koje se



izvode na zagrebačkoj glini (područje grada Zagreba). Poboljšanjem zagrebačke gline raznim vezivima dolazi do povećanja njene krutosti i čvrstoće, no to povećanje nije matematički jednoznačno za svaku vrstu gline. Naime, istraživanja pokazuju da različite vrste glina, poboljšane istom vrstom veziva u istim uvjetima, imaju različite mehaničke karakteristike, što je u skladu s rezultatima istraživanja drugih autora, poput Ahnberga i Johanssona (2005), Guptae i dr. (2012), te Yadua i dr. (2011).

- Treće, u sklopu ovog rada razvijena je tehnologija postupka poboljšanja zagrebačke gline s različitim vezivima u laboratoriju Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Detaljno je opisana tehnologija izrade uzorka kompozita gline i veziva, koja predstavlja mješavinu prirodnog materijala gline sa sintetskim materijalima. Rezultati provedenih ispitivanja potvrđuju primjenjivost ove tehnologije za ispitivanje mehaničkog ponašanja gline u laboratorijskim uvjetima.
- Četvrto, dobivene su spoznaje o mehaničkim karakteristikama zagrebačke gline koje će biti korisne pri budućoj izgradnji podzemne željeznice (metroa) u Zagrebu. Ovaj projekt, koji će se većim dijelom izvoditi u podslojevima zagrebačke gline, zahtijeva bolje razumijevanje ponašanja gline u različitim uvjetima, što je omogućeno ovim istraživanjima.
- Peto, ne manje važno, kroz naslov i tekst ovog rada po prvi puta se u stručnoj literaturi u Hrvatskoj uvodi pojam "zagrebačka glina" kao sinonim za sve vrste gline u Savskoj potolini grada Zagreba. Na sličan način, kako je u geotehničkoj zajednici prepoznata Londonska glina iz Londona, tako će ovaj naziv *zagrebačka glina* doprinosti preciznijem označavanju specifičnih geotehničkih karakteristika gline na zagrebačkom području.

## **10.2. PREPORUKE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA**

Vrijednosti rezultata ispitivanja krutosti i čvrstoće zagrebačke gline poboljšane raznim vezivima omogućuju određivanje ključnih mehaničkih parametara potrebnih za projektiranje održivog poboljšanja zagrebačke gline temeljenog na rezultatima standardnih laboratorijskih pokusa. S obzirom na to da su u ovom radu analizirani podaci iz laboratorijskih uvjeta, preporučuje se provedba budućih istraživanja in situ kako bi se potvrdili dobiveni rezultati.

Kako miješanje gline s različitim vezivima ima važnu ulogu u praksi, nužno bi bilo uskladiti tehnologiju miješanja in situ s tehnologijom u laboratoriju, stvarajući jedinstveni pristup. Na temelju većeg broja uzoraka, moguće je razviti univerzalnu normizaciju postupka (normativno usvojiti proceduru) koja bi značajno unaprijedila cijeli proces poboljšanja gline raznim vezivima.

**LITERATURA**

1. Agencija za statistiku BiH, Sarajevo, Priopćenje 05.12.2023., broj 14, 2023. [https://bhas.gov.ba/data/Publikacije/Saopštenja/2023/ENE\\_04\\_2022\\_Y1\\_1\\_HR.pdf](https://bhas.gov.ba/data/Publikacije/Saopštenja/2023/ENE_04_2022_Y1_1_HR.pdf), pristupljeno 24.10.2024.
2. Ahnberg, H., Johansson, S.E.: Increase in strength with time in soils stabilised with different types of binder in relation to the type and amount of reaction products, Proceedings International Conference on Deep Mixing, Stockholm, Sweden, pp. 195-202., 2005.
3. Allan, M.; Philippacopoulos, A.: Performance Characteristics and Modelling of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps, Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu - Tohoku, Japan, pp. 3355.-3360., 2000.
4. Amadi, A.: Evaluation of Changes in Index Properties of Lateritic Soil Stabilized with Fly Ash, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, Issue 17, pp 69.-78., 2010.
5. American Concrete Institute, ACI 232.2R-03: Use of Fly Ash in Concrete, ACI Committee 232, ed. 5, 2010.
6. American Standard for Testing and Materials, ASTM C593: Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization, p. 5, 2011.
7. American Standard for Testing and Materials, ASTM C618-12: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ed.12, 2012.
8. American Standard for Testing and Materials, ASTM D698: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, p. 13, 2007.
9. American Standard for Testing and Materials, ASTM D5239-04: Standard Practice for Characterizing Fly Ash for Use in Soil Stabilization, p.3, 2004.
10. Andreas, L., Herrmann, I., Lidstrom-Larsson, M. i Lagerkvist, A.: Physical properties of steel slag to be reused in a landfill cover, Sardinia, Tenth Int. Waste Management and Landfill Symp., S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2005, pp. 3-7.
11. Andrews, D.C.A.; Martin, G.R.: Criteria for liquefaction of silty soils, Proc. of the 12th world Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, paper 0312, 2000.
12. Anthony E.J.; Jia, L.; Caris, M.: CFBC ash hydration studies, International Ash utilization symposium, Kentucky, 1.-9., 2003.  
Atkinson, J.H.; Sallfors, G.: Experimental Determination of Stress-Strain-Time Characteristics in Laboratory and In Situ Tests. Proc. Tenth European Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence, 26-30 May, Balkema, Rotterdam, Vol. III, str. 915-956, 1991.
13. Aziz, M. M. A., Hainin, M. R., Yaacob, H., Ali, Z., Chang, F. L., & Adnan, A. M.: Characterisation and utilisation of steel slag for the construction of roads and

- highways. *Materials Research Innovations*, 18(sup6), S6-255-S6-259, 2014. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000967>
14. Basavanna, B.M.; Itagi Ravi Kumar: Use of Coal Ash to Improve Some Properties of Black Cotton Soil, Indian Geotechnical Conference-1990 on Advances in Geotechnical Engineering, Indian Geotechnical Society, Bombay, India, pp 185.-188. , 1990.
  15. Been, K., Jefferies, M.: "A state parameter for sand." *Geotechnical Testing Journal*, 14(2), 99-110, 1991.
  16. Bešlagić, S.: Mogućnosti upotrebe elektrofilterskog pepela, Savjetovanje o primjeni elektrofilterskog pepela i šljake u izgradnji putne infrastrukture, pp 10.-13., 2003.
  17. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emission Directive 2010/75/EU, European Commission, 2013.
  18. Bhuvaneshwari, S.; Robinson, R.G.; Gandhi, S.R.: Stabilization of expansive soils using fly ash, Fly Ash India Conference, New Delhi, pp 5.1-5.10, 2005.
  19. Bin – Shafique, S.; Benson, C.H.; Tuncer, B.E.: Leaching of heavy metals from fly ash stabilized soils used in highway pavements, Final Report To Combustion Byproducts Recycling Consortium, West Virginia University, 2003.
  20. Boominathan, A.; Hari, S.: Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 22, pp 1027.–1033., 2002.
  21. Botha, F.: Overview of the fluidized bed combustion process and material, Proceedings of State Regulation of Coal Combustion By-Product placement at mine sites, Pennsylvania, pp 1.-4., 2004.
  22. Brandl, H.: Alteration of Soil Parameters by Stabilisation with Lime, Proceedings 10<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. and Foundation Eng., Stockholm, vol. 3, pp 587.-594., 1981. Cetiner, S.I.: Stabilization of expansive soils by Cayirhan fly ash and desulphogypsum, MSc thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University, Ankara, Turkey p. 107, 2004.
  23. Burland, J.B.: "Small is beautiful"-the stiffness of soils at small strains. *Canadian Geotechnical Journal*. 26: 499-516, 1989.
  24. Burland, J.B.: On the compressibility and shear strength of natural soils. *Géotechnique*, 40, No. 3, pp. 329-378, 1990.
  25. Burland, J.B.; Symes, M.J.: A Simple Axial Displacement Gauge for Use in the Triaxial Apparatus, *Géotechnique*, Vol. 32, str. 62-65, 1982.
  26. Cascante, G., Vanderkooy, J., Chung, W.: Difference between current voltage measurements in resonant-column testing, *Canadian Geotechnical Journal*, 40: 806-820, 2003.
  27. Cerić, A., Kovačević, M.: Risk Management in Construction Projects: A Systematic Literature Review. Repozitorij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 2010.

28. Civil Ase, <https://www.civilease.com/2020/04/ground-improvement-techniques.html>, pristupljeno 20.9.2024.
29. Cokca, E.: Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 127, pp 568.–573., 2001.
30. Collins, R.J.; Srivastava, L.: Use of ash in highway construction: Delaware demonstration project, Palo Alto, California, Electric Power Research Institute, Report nr GS-6540, 1989.
31. Construction of Test Embankment - Part A, Joint Transportation Research Program Technical Report Series, Purdue University, 2006.
32. Cortellazzo, G., Cola, S.: Geotechnical Characteristics of Two Italian Peats Stabilized with Binders, *Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, Stockholm: Balkema, pp. 93-100, 1999.
33. Davis, R.E.; Carlson, R.W.; Kelly, J.W.; Davis, H.E.: Properties of cements and concrete containing fly ash, *ACI Journal*, vol. 33, pp 577.-612., 1937.
34. De Bock, L. and Van den Bergh, H.: Stainless steel slags in hydraulic bound mixtures for road construction, 2 case studies in Belgium, *Int. RILEM Conf. on 'the use of Recycled Materials in Building and Structures'*, 2004, 1095–1104.
35. Develioglu, I., Pulat, H.: Geotechnical properties and bearing capacity of blast furnace slag, *GRAĐEVINAR*, 70 (2018) 7, pp. 571-579, 2018.
36. Dewangan, P.; Pradhan, M.; Kishore, N.: Utilization of Fly Ash as a Structural Fill Material for Safe and Sustainable Development: Need of the Hour, *The Indian Mining and Engineering Journal*, pp 134.-139., 2010.
37. Dey, A.K.; Gandhi, S.R.: Evaluation of Liquefaction Potential of Pond Ash, *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*, Part 4, pp 315.-320., 2008.
38. Diamond, S.; Lopez-Flores, F.: On the Distinction in the Physical and Chemical Characteristics Between Lignitic Bituminous Fly Ashes, *Symposium on Effects of Fl Ash Incorporated in Cement and Concrete*, Materials Research Society, Pittsburgh, pp 34.-44., 1981.
39. Dikshit, A.K.; Lokeshappa, B.: Disposal and Management of Flyash, *International Conference on Life Science and Technology IPCBEE vol.3*, Singapore, pp 11.-14., 2011.
40. Duvnjak, S., Duhović, A., Vlastelica, G.: Laboratorijska ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava lapora za potrebe proračuna slijeganja jednostavnog homogenog nasipa, 2022.
41. Durn, G.: Podrijetlo i svojstva tla. *Geološki vjesnik*, 66(1), 91-102, 2013.
42. El Sadek, M.: Stabilization of expansive soils using fly ash and cement. *Proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hong Kong, China, 2011.
43. Electrical Power Research Institute, EPRI: Comparison of Coal Combustion Products to Other Common Materials – Chemical Characteristics, EPRI report number 1020556, 2010.

44. Elektroenergetika BiH, <https://www.elektroenergetika.info/he-bih.htm>, pristupljeno 20.9.2024.
45. Elektroprivreda Srbije, <https://www.eps.rs/lat/Stranice/default.aspx>, pristupljeno 10.9.2024.
46. Emery, J. J., Tang, R.: Use of steel slag as a construction material. *Construction and Building Materials*, 7(2), 61-67, 1973.
47. ESSBIH, Energetski Sektor u BiH: Studija Energetskog sektora u Bih, Modul 8 – Rudnici uglja, Izvještaj - Studija energetskog sektora u BiH, 2008.
48. Fällman, A.: Leaching of chromium and barium from steel slag in laboratory and field tests—a stability controlled process, *Waste Manag.*, 20, (2), 149–154, 2000.
49. Ferguson, G.: Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent, *American Society of Civil Engineers*, pp 1.-14., 1993.
50. Ferguson, G.; Levenson, S.M.: Soil and Pavement Base Stabilization with Self-Cementing Coal Fly Ash, *American Coal Ash Association*, Alexandria, VA, 1999.
51. Fernandez, T.J.L.; D Carvalho, W.; Cabanas, M., Querol, X., Lopez-Soler: A Mobility of Heavy Metals from Coal Flyash, *Journal of Environmental Geology*, vol. 23, pp 264.–270., 1994.
52. FHWA (Federal Highway Administration), U.S. Department of Transportation: User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, FHWA Publication number FHWA-RD-97-148, 2008.
53. French, D.; Smitham, J.: Fly Ash Characteristics and Feed Coal Properties, *CSIRO Energy Technology Report*, 2007.
54. Gandhi, S. R.: Design and maintenance of ash pond for fly ash disposal, *Indian Geotechnical Society Conference*, Ahmedabad, pp 85.-90., 2005.
55. Gandhi, R.: Sustainable Use of Fly Ash in Concrete: Benefits and Challenges." *Journal of Sustainable Construction*, 12(4), 273-283, 2005.
56. Glavaš, Z.; Dolić, N.: *Metalurgija željeza*. Sisak: Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2014.
57. Gojić, M.: *Metalurgija čelika*. Denona, Zagreb, 2005.
58. Goodarzi, F.; Sanei, H.: Plerosphere and its role in reduction of emitted fine fly ash particles from pulverized coal-fired power plants, *Fuel*, vol.88, pp 382.-386., 2009.
59. Goto, S.; Tatsuoka, F.; Shibuya, S.; Kim, Y.S., Sato, T.: A Simple Gauge for Local Strain Measurements in the Laboratory, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 1, str. 169-180, 1991.
60. Građevinski fakultet – Tunelogradnja, predavanje, [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI\\_13.predavanje\\_Tunelogradnja.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_13.predavanje_Tunelogradnja.pdf), (pristupljeno 19.8.2024.)
61. Green, B.H.: Development of Soil-Based Controlled Low Strength Materials, U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report INP-SL-2, 1999.

62. Gupta, R.C., Thomas, B.S., Gupta, P., Rajan, L., Thagriya, D.: An Experimental Study of Clayey Soil Stabilized by Copper Slag, *Int. J. Struct. & Civil Engg. Res.*, 1 (2012) 1, pp.111-119.
63. Habert, G., Lacaillerie, J.B., Roussela, N.: An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends, *Journal of Cleaner Production*, 19 (2011), pp. 1229-1238.
64. Hansson, N.: Deep soil stabilization with fly ash, MSc thesis, Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden, 2008.
65. Hardin, C.D.; Daniels, J.L.: Preserving Structural Fill and Mine Reclamation as Acceptable Beneficial Reuse of CCR's, *World of Coal Ash Conference*, Denver, p. 17, 2011.
66. Hebib, S., Farrell, E.R.: Some Experiences of Stabilizing Irish Organic Soils, *Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, Stockholm: Balkema, pp. 81-84, 1999.
67. Hewlett, P. C., Liska, M. (Eds.): *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (5th ed.), Butterworth-Heinemann, Oxford, 2019.
68. Hofler, J.; Schlumpf, J.: Shotcrete in Tunnel Construction, Introduction to the basic technology of sprayed concrete, Putzmeister AG, 3. edition, 2006.
69. HOLCIM Cement: Tehničke specifikacije proizvoda i usluga, Brošura 2, URL: <https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/cement/cement-u-vrecama>
70. Hudson, J.A. & Harrison, J.P.: Engineering in the Environment, In *Principles of Geotechnical Engineering*, 1997.
71. Hrvatska elektroprivreda, <https://www.hep.hr/proizvodnja/termoelektrane-1560/termoelektrane/te-plomin/1563>, (pristupljeno 20.9.2024.)
72. Ilijanić, N.: Minerali glina u jezerskim sedimentima istočno jadranske obale kao pokazatelji promjena okoliša tijekom kasnog pliocena i holocena, doktorska disertacija, Prirodoslovno-Matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2014.
73. Imamović, A.; Zenunović, D.: Proizvodnja mješavina pepela, kreča i kamena, oprema i tehnologija primjenjena u svijetu, Savjetovanje o primjeni elektrofilterskog pepela i šljake u izgradnji putne infrastrukture, pp 14.-19., 2003.
74. Indian Standards, IS 3812: Specification for fly ash for use as pozzolana and admixture, 2003.
75. Ismael, H.A.H.: Treatment and improvement of the geotechnical properties of different soft fine-grained soils using chemical stabilization, PhD thesis, Mathematisch Naturwissenschaftlich - Technischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg eingereicht, 2006.
76. Jardine, R.J.; Symes, M.J.; Burland, J.B.: The Measurement of Soil Stiffness in the Triaxial Apparatus, *Géotechnique*, Vol. 34 str. 323-340, 1984.
77. Jurić-Kačunić, D.: Krutost karbonatnih stijena u kršu Hrvatske, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2009.

78. Kamon, M.; Nontananandh, S.: Combining industrial wastes with lime for soil stabilization, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, pp 1.-17., 1991.
79. Kaniraj, S.R.; Gayathri, V.: Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 21, pp 123.-149., 2003.
80. Karol, R. H.: *Chemical Grouting and Soil Stabilization*, CRC Press, 2003.
81. Kate, J.M.: Strength and volume change behaviour of expansive soils treated with fly ash, *Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress*, Austin, Texas, 2005.
82. Kessler, K. A.; Wet Disposal of Fossil Plant Waste Case History, *Journal of the Energy Division* vol. 107, vo. 2, pp. 199.-208., 1981.
83. Khuel, R., Wegman, D.: *Base stabilization guidance and additive selection for pavement design*, LRRB, 2017.
84. Kim, B.; Prezzi, M.: Evaluation of mechanical properties of class F fly ash, *Waste Management Journal*, vol. 28, pp 649.-659., 2008.
85. Kim, B.; Yoon, S.; Balunaini, U.; Salgado, R.: *Determination of Ash Mixture Properties and*
86. Kogel, J. E., Trivedi, N. C., Barker, J. M., Krukowski, S. T. (Eds.): *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses (7th ed.)*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2006.
87. Kovačić, M., & Grizelj, A.: Mineralogy and geochemistry of Upper Miocene pelitic sediments of the Zagorje Basin (Croatia): Implications for evolution of the Pannonian Basin. *Geologica Carpathica*, 58(3), 263-276, 2007.
88. Kovačević, M.S., Marčić, D., Bačić, M.: Current and future trends in geotechnical engineering in Croatia, *Proceedings of the Scientific Symposium: Future Trends in Civil Engineering*, Zagreb, Croatia, pp. 13-34, 2014.
89. Kovačević, M.S.; Simović, R.; Bjegović, D.; Rosković, R.; Peček, N.: *Uloga sintetiziranih veziva u postupku poboljšanja tla kao doprinos održivom razvoju, Sabor hrvatskih graditelja - Hrvatsko graditeljstvo pred izazovom europskih integracija*, Cavtat, 2008.
90. Koželj, B., *Osnove metalurgije gvožđa*, Metalurški fakultet u Zenici, Univerzitet u Sarajevu, Zenica 1984.
91. Kozłowski, R., Hughes, D., Weber, J.: Roman Cements: Key Materials of the Built Heritage of the 19th Century. In: Dan, M.B., Prikryl, R., Török, Á. (eds) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Springer, Dordrecht, 2010.
92. Kumar, A.; Santhi, A.S.; Mohanganesh, G.: Various utilization of fly ash and its properties on concrete-a review, *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development*, vol.2, pp 435.-444., 2012.
93. Ladd, C. C.; Foot, R.; Ishihara, K.; Schlosser F. & Poulos, H.G.: Stress-deformation and strength characteristics. *Proc. Ninth Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 3, 421-494, 1977.



94. Lane, R.O.; Best, J.F.: Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete, *Concrete International*, vol.4, pp 81.-92., 1982.
95. Lea, F. M.: *The Chemistry of Cement and Concrete*, III. izdanje, Edward Arnold, London, 1974.
96. Lebo, Ž., Bačić, M., Jurić Kačunić, D., Kovačević, M. S.: Zagreb clay improved with various binders. *Građevinar*, 73(9), 871-880, 2021.
97. Locate, J.; Tremblay, H.; Leroueil, S.: Mechanical and hydraulic behaviour clay treated with lime, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, pp 654.-669., 1996.
98. Luke, W.I.: Nature and Distribution of Particles of Various Sizes in Fly Ash, Technical Report no. 6 – 583, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, p.21, 1961.
100. Lombardi, G. i Deere, D. U.: Grouting design and control using the GIN principle. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 1993.
101. Madhyannapu, R. S., Puppala, A. J., Nazarian, S., Yuan, D. Quality Assessment and Quality Control of Deep Soil Mixing Construction for Stabilizing Expansive Subsoils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(10), 1477–1485,2010.
102. Malhotra, V. M.; Carette, G. G.; Bilodeau, A.: Mechanical properties and durability of polypropylene fiber reinforced high-volume fly ash concrete for shotcrete applications, *ACI journal*, vol. 90, pp 478.-486., 1994.
103. Malhotra, V. M., P. K. Mehta, and R. C. Williams: *Fly Ash in Concrete: Properties and Applications*. *ACI Materials Journal*, 91(5), 456-462., 1994.
104. Mallikarjuna Rao, K.; Rama Subba Rao, G.V.: Influence of Fly Ash on Compaction Characteristics of Expansive Soils Using 22 Factorial Experimentation, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 13, Bundle F, p. 19, 2008.
105. Mandić, V., Panžić, I., Rukavina, M.: *Inženjerstvo mineralnih veziva*, Zagreb,2023.
106. Mapfumo E.; Chanasyk D.S.: Plasticity and Density-Moisture-Resistance Relations of Soils Amended with Fly Ash, *Environmental Technology*, vol. 19, pp 543.-554., 1998.
107. Mastral, A.M.; Callen, M.; Mayoral, C.; Galban, J.: Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from fluidized bed combustion of coal, *Fuel*, vol. 74 December 1995, pp 1762.–1766., 1995.
108. Matešić, L.: *Normalizirano ponašanje tla pri smicanju od vrlo malih deformacija do sloma*, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2002.
109. McCarthy, G.J.; Swanson, K.D.; Keller, L.P.; Blatter, W.C.: *Mineralogy of Western Fly Ash*, *Cement and Concrete research*, vol. 14, pp 471.-478., 1984.
110. McLaren, R.J.; DiGioia, A.M.: *Typical engineering properties of fly ash, Geotechnical practice for waste disposal '87*, University of Michigan, Michigan, 1987.

111. McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., van Riessen, A., Corder, G. D.: Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9-10), 1080-1090, 2011.
112. Mikkelsen, P.E.: Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments, *Geotechnical News*, vol.20, pp 38.-42., 2002.
113. Mikkelsen, P.E.; Green, G.E.: Piezometers in Fully Grouted Boreholes, *Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, Oslo, Norway, p. 10, 2003.
114. Milaković, D., Szavits-Nossan, A.: Ground settlement induced by tunnel boring in stiff clay. *Građevinar*, 66(6), 503-512., 2014.
115. Milaković, D.: Trenutna i konsolidacijska slijeganja tla izazvana bušenjem tunela u krutim glinama, *Doktorski rad*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2012.
116. Mindess, S., Young, J. F., i Darwin, D.: *Concrete*. Pearson Education, 2003.
117. Mitchell, J. K., & Soga, K.: *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons, 2005.
118. Morgan, D.R.: Developments in Shotcrete for Repairs and Rehabilitations, *Concrete Constructions*, pp 659.-654., 1991.
119. Morgan, D. R.; Mcaskill, N.; Carette, G. G.; Malhotra, V. M.: Evaluation of polypropylene fiber reinforced high-volume fly ash shotcrete, *ACI journal*, vol. 89, pp 169.-177., 1992.
120. Muhamedagić, S., *Metalurgija gvožđa*, Metalurški fakultet u Zenici, Univerzitet u Sarajevu, Zenica, 1984.
121. Mymrin, V., Ponte, H., Ponte, M., Maul, A.: Structure formation of slag-soil construction materials, *Mater. Struct.*, 38, (1), 107–113, 2005.
122. Nalbantoglu, Z.: Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer, *Construction and Building Materials*, vol.18, pp 377.-381., 2004.
123. Nalbantoglu, Z.; Gucbilmez E.: Utilization of an industrial waste in calcareous expansive clay stabilization, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 25, pp 78.-84., 2002.
124. Nalbantoglu, Z.; Tuncer, E.R.: Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 38, pp 154.-160., 2001.
125. Neville, A.M.: *Properties of Concrete*. 5th ed. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2011.
126. Nicholson, P. G.; Kashyap, V.: Flyash stabilization of tropical Hawaiian soils, *Fly Ash for Soil Improvement*, *Geotechnical Special Publication No. 36*, ASCE, New York, pp 15.-29., 1993.
127. O'Flaherty, C.A.: *Highways: The Location, Design, Construction and Maintenance of Pavements*, 2002.
128. Ohishi, K. Application of coal fly ash for improving soils prior to excavation, *Proc. International Conf. on Engineering Materials*, vol. 2, pp 531.-541., 1997.

129. O'Neill, M.W.; Poormoayed, N.: Methodology for Foundations on Expansive Clays, *Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, vol. 106, pp 1345.-1367., 1980.
130. Palvarić, M.: Produkcija pepela i šljake u TE Tuzla i ekološki uticaj na okolinu kod njihovog zbrinjavanja, Savjetovanje o primjeni elektrofilterskog pepela i šljake u izgradnji putne infrastrukture, pp 5.-9., 2003.
131. Pandian, N.S.: Fly ash characterization with reference to geotechnical applications, *J. Indian Inst. Sci.*, vol. 84, pp 189.–216., 2004.
132. Pandian, N.S. Stabilization of Expansive Soil with Fly Ash, *Proceedings of National Symposium on Advances in Geotechnical Engineering, Karnataka Geotechnical Center of Indian Geotechnical Society, India*, pp 81.–89., 2004.
133. Parker, D.G.; Thornton, S.I.; Cheng, C.W.: Permeability of fly ash stabilized soils, *Proceedings of the Conference on Geotechnical Practices for Disposal of Solid Waste Materials, University of Michigan*, pp 63.-70., 1977.
134. Phani Kumar, B.R.; Sharma, R.S.: Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, pp 764.-767., 2004.
135. Pološki, D.: Underground transport systems for urban development. Prezentirano na Colloquium on Using Underground Space in Urban Areas, Dubrovnik, 2011.
136. Prabakar, J.; Nitin Dendorkar; Morchhale, R.K.: Influence of Fly Ash on Strength Behaviour of Typical Soils, *Journal of Construction and Building Materials, Elsevier Publishers*, vol. 18, pp 263.-267., 2004.
137. Prashanth, J.P.; Sivapullaiah, P.V.; Sridharan, A.: Pozzolanic fly ash as a hydraulic barrier in land fills, *Engineering Geology*, vol. 60, pp 245.-252., 2001.
138. *Proceedings of the 15 th Japan Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp 773.-776., 1980.
139. Proctor, D., Fehling, K., Shay, E., Wittenborn, J., Green, J., Avent, C., Bigham, R., Connolly, M., Lee, M.B., Shepker, T.: Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags, *Environ. Sci. Technol.*,34, (8), 1576–1582,2000.
140. Puri, V.K.; Das, B.M.; Prakash, S.: Liquefaction of Silty Soils, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol.6, p. 5, 1996.
141. Radić, I.: Razvoj i poznavanje materijala, *Kemijsko-Tehnološki fakultet Sveučilišta u Splitu, Split*, 2013.
142. Remus, R., Aguado-Monsonet, M. A., Roudier, S., Delgado Sancho, L., JRC Reference Report, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), EUR 25521 EN, European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau, Seville, Spain, 2013.
143. Rock Hill, <https://www.rockhillconcrete.com/flowable-fill>, (pristupljeno 18.7.2024.)
144. Rodriguez, A.R.: Engineering behavior of soft clays treated with circulating fluidized bed combustion fly ash, MSc thesis, University of Puerto Rico, 2007.

145. Rohde, L., Peres Náñez, W., Augusto Pereira Ceratti, J.: Electric arc furnace steel slag: base material for low-volume roads', *Trans. Res. Rec.: J. Trans. Res. Board*, 1819, (1), 201–207., 2003.
146. Roy, D.M.; Luke, K., Diamond, S.: Characterization of Fly Ash and Its Reaction in Concrete, *Proceedings, Material Research Society, Pittsburgh*, v.43, pp 3.-20., 1984.
147. Samarakoon, M.H., Ranjith, P.G., Rathnaweera, T.D. and Perera, M.S.A.: *Recent advances in alkaline cement binders*, 2019.
148. Santos, F.; Lin, L.; Li, Y.; Amini, F.: Geotechnical Properties of Fly Ash and Soil Mixtures for Use in Highway Embankments, *World of Coal Ash Conference, Denver*, p. 11, 2011.
149. Saxena, M.; Asokan, P.: Long term effect of fly ash on soil fertility and crop yield at NTPC, Rihand Nagar, Northern India, Report, Regional Research Laboratory, Bhopal and Fly Ash Mission, Technology Information Forecasting and Assessment Council, New Delhi, 2001.
150. SEPA - Scottish Environment Protection Agency, Lochgilphead Flood Study, 2014.
151. Simpson, B.: Retaining structures: Displacement and design. *Géotechnique* 42: 541-576, 1992.
152. Smith, A.: Controlled low-strength material, *Aberdeens Concrete Construction*, vol. 36, pp 389.-394., 1991.
153. Sofilić, T., Mladenović, A., Sofilić, U.: Defining of EAF Steel Slag Application Possibilities in Asphalt Mixture Production, *Jurnal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 19 (2011) 148-157., 2011.
154. Sofilić, U., Komparativna istraživanja procesa usitnjavanja elektropećne zgure i dolomita, *Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije*, 2010.
155. Stocker, M., Seidel, A.: Twenty-seven Years of Soil Mixing in German: The Bauer Mixed-in-Place-Technique. *Proceeding of the International Conference on Deep Mixing-Best Practice and Recent Advances, Stockholm, Sweden* 2005.
156. Stonebridge, R. W.: Fluidized Bed Combustion Technology, *J.Inst.Refract.Eng. Winter*, pp 16-19, 1989.
157. Shi, C.: Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230–236. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:3(230), 2004.
158. Shi, C., Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production." *Cem. Concr. Res.*, 32~39, 459–462, 2002.
159. Shi, C., Stegemann, J. A.: Acid corrosion resistance of different cementing materials. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 803–808., 2000.
160. Shi, C., Qian, J.: High performance cementing materials from industrial slags - A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 29(3), 195-207, 2000.

161. Sherwood, P.: Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review, London: Transport Research Laboratory, HMSO, 1993.
162. Sivapullaiah P.V.; Prashanth, J.P.; Sridharan, A; Narayana, B.V.: Reactive Silica and Strength of Fly Ashes, Geotechnical and Geological Engineering, vol. 16, pp 239.-250., 1998.
163. Sreevidya, V., Anuradha,R., Venkatasubramani, R.: Study on fly ash geopolymer concrete to reduce global warming ases, Nature, Environment and Pollution Technology, 2010, pp 383.-387., 2010.
164. Swan, C.; Topping, G.; Kashi, M.G.: Flowable fills developed with high volume of fly ash, World of Coal Ash, Kentucky, 2007.
165. Tastan, E.O.; Edil, T.B.; Benson, C.H.; Aydilek, A.H.: Stabilization of Organic Soils with Fly Ash, J. Geotech. Geoenviron. Eng., vol. 137, pp 819.-833., 2011.
166. Tavoulaareas, E.S.: Fluidized - Bed Combustion Technology, Annual Review of Energy and the Enviroment, vol. 16, pp 25.-57.,1991.
167. TE Šošanj, <https://www.te-sostanj.si/en/>, (pristupljeno 20.9.2024.)
168. Tennessee Valley Authority, <https://www.tva.com/energy/our-power-system/coal/kingston-fossil-plant>, (pristupljeno 23.8.2024.)
169. Terashi, M.; Tanak, H.; Niidome, Z.; Sakanoi, H.: Permeability of treated soils,
170. Terzaghi, K., & Peck, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice (2nd ed.). John Wiley & Sons, 1967.
171. Terrel, R.L.; Epps, J.A.; Barenberg, E.J.; Mitchell, J.K.; Thompson, M.R.: Soil stabilization in pavement structures: A user's manual, FHWA-IP-80-2, vol. 1, Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1979.
172. The Hindu, <https://www.thehindu.com/news/national/NTPCrsquo-coal-based-project-in-MP-turned-down/article15773159.ece>, (pristupljeno 21.8.2024.)
173. Tikalsky, P.; Gaffney, M.; Regan, R: Properties of Controlled low-strength material, Engineering, pp 1.-19., 2000.
174. Tu, W.; Zand, B.; Ajlouni, M.A.; Butaila, T.S.; Wolfe, W.E.: The Consolidation Characteristics of Impounded Class F Fly Ash – A Case History, World of Coal Ash Conference, Kentucky, p. 14, 2007.
175. Turuallo, G., Mallisa, H.: Using Cementitious Materials Such as Fly Ash to Replace a Part of Cement in Producing High Strength Concrete in Hot Weather. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 316. 012039. 10.1088/1757-899X/316/1/012039., 2018.
176. Ukrainczyk, V.: Beton: Struktura, svojstva, tehnologija, Zagreb, Alcor Zagreb, 1994.
177. Vijayan, V.; Behera, S.N.: Characterisation of Natural Radioactivity in Coal Ash, Proceedings of the National Seminar on Fly Ash Characterization and its Geotechnical Applications, Indian Institute of Science, Bangalore, pp 139.–144., 1999.

178. Varas, M. J., de Buergo, M. A., Fort, R.: The origin and development of natural cements: The Spanish experience. *Construction and Building Materials*, 21(2), 436–445. doi:10.1016/j.conbuildmat, 2007
179. Vlcek, J., Tomkova, V., Ovcacikova, H., Ovcacik, F., Topinkova, M., Matejka, V.: Slags from Steel Production: Properties and their Utilization, *Metalurgija*, 52 (2013) 3, 329- 333., 2013.
180. Vrkljan, D. i Klanfar, M.: Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2010.
181. Vrkljan, I.: Osnove mehanike tla i stijena. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2001.
182. Watanabe, T.; Hosomi, M.; Yuno, K.; Hashimoto, C.: Quality evaluation of shotcrete by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp 2358.–2362., 2010.
183. White, D.J.; Harrington, D.S.; Thomas, Z.: Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils, Volume I: Engineering Properties and Construction Guidelines, Final Report, Center for Transportation Research and Education Iowa State University, Iowa State University, 2005.
184. Wicaksono, R.I., De Silva, L.I.N., Mulmi, S., Enomoto, T., Kiyota, T., Tsutsumi, Y., Kuwano, R., i Koseki, J.: Small Strain Stiffness of Toyoura Sand Obtained from Various Techniques in IIS, *SEISAN KENKYU*, Vol. 60 No. 6 pp.561-564, 2008.
185. Wicaksono, R.I., Tsutsumi, Y., Sato, T., I Koseki, J., Kuwano, R.: Laboratory Wave Measurement on Toyoura Sand and Hime Gravel. *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, University of Tokyo*, 41, pp. 35-44, 2008.
186. Global slag conference, [www.globalslag.com/news/item/362-29-7mt-of-slag-used-in-european-building-materials-in-2023](http://www.globalslag.com/news/item/362-29-7mt-of-slag-used-in-european-building-materials-in-2023), pristupljeno 17.8.2024.
187. Yadu, L.K., Tripathi, R.K., Singh, D.V.: Comparison of Fly Ash and Rice Husk Ash Stabilized Black Cotton Soil, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4 (2011) 6, SPL, pp. 42-45
188. Yildirim, Z.; Prezzi, M.: Chemical, Mineralogical and Morphological Properties of Steel Slag, *Advances in Civil Engineering*, 463638 (2011), 1-13.
189. Young, R. D.: Method and apparatus for using steel slag in cement clinker production. U.S. Patent No. 5421880. United States Patent and Trademark Office, 1995.
190. Yuno, K.; Ishii, M.; Hashimoto, C.; Mizuguchi, H.: Construction Placement, Hardened Properties and Durability of Shotcrete with Highly Functional Fly Ash, *ECI Conference on Shotcrete for Underground Support XI, Davos-Platz, Switzerland*, p. 18, 2009.
191. Zand, B.; Tu, W.; Wolfe, W.E.; Butaila, T.S.; Amaya, P.J.: Evaluation of Liquefaction Potential of Impounded Fly Ash, *World of Coal Ash Conference, Kentucky*, p. 23, 2007.

192. Zhang, J.; Xing, C.: Stabilization of expansive soil by lime and fly ash, *Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition*, vol. 17, pp 73.-77., 2002.
193. Zhang, M.H.; Chevrier, R. L.; Malhorta, V. M.; Mirza J.: Use of high-volume fly ash in polypropylene fiber-reinforced concrete for shotcrete applications, *ACI journal*, vol. 170, pp 681.-722., 1997.
194. Zielinski, R.A.; Finkelman, R.B.: Radioactive elements in coal and fly ash: abundance, forms and environmental significance, *U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-163-97*, 4 p, 1998.
195. Zlatunić, R.: Nastanak gline, tehnologija i mineralogija keramike. *Histria archaeologica*, 36, 61-114, 2006.

---

## ŽIVOTOPIS

Željko Lebo rođen je 28.10.1966. godine u Mostaru u Republici Bosni i Hercegovini. Osnovnu i srednju građevinsku tehničku školu pohađao je u Posušju do 1985. godine kada se upisuje na Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je 1993. godine na konstrukterskom smjeru i stekao naziv diplomirani inženjer građevinarstva. U ljeto 1997. godine zapošljava se kao stručni suradnik na Zavodu za geotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu gdje radi do jeseni 2003, kada prelazi u radni odnos na Graditeljski odjel Tehničkog veleučilišta u Zagrebu na kojemu do danas radi kao viši predavač na Prijediplomskom i diplomskom stručnom studiju graditeljstva. Trenutno je nositelj kolegija Mehanika tla, Geotehnika, Tehnička mehanika, Proračun konstrukcija, Geotehnologija i Tuneli.

U periodu šk.god. 1998 do 2000. na Građevinskom fakultetu u Osijeku izvodio je nastavu kao asistent iz predmeta Mehanika tla i temeljenje.

Godine 2011. magistrirao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom prof.dr.sc. Antun Szavits Nosann-a s temom „*Usporedba krutosti tala pri malim deformacijama*“.

Na domaćim i međunarodnim časopisima do sada je objavio 44 znanstveno stručna rada, te sudjelovao u više od 300 stručnih projekata kao projektant i nadzorni inženjer od čega je najzanimljivija izvedba zaštitne konstrukcije jedne od najdublje izvedenih građevinskih jama u RH izvedene sidrenom armiranobetonskom dijafragmom (građ. jama RBA u Zagrebu).

Član je udruge diplomiranih inženjera Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (AMCA-FA), Hrvatskog geotehničkog društva (HGD), Međunarodnog društva za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo (ISSMGE), Tehničkog odbora za Geosintetike TO 221 pri HZN, Skupštine Hrvatske komore inženjera u građevinarstvu (HKIG).

Ovlašteni je inženjer građevinarstva, glavni inženjer gradilišta i stalni sudski vještak za graditeljstvo i procjenu nekretnina.

Član je Upravnog vijeća Tehničkog veleučilišta u Zagrebu i predsjednik Nadzornog odbora Instituta Tehničkog veleučilišta u Zagrebu.