

Tekući trendovi u tehnologiji betona

Ćustić, Barbara

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:237:771169>

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

Barbara Ćustić

TEKUĆI TRENDОВI U TEHNOLOGIJI BETONA

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Osnove tehnologije betona

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Marija Jelčić Rukavina

Zagreb, 2023

Tekući trendovi u tehnologiji betona



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Barbara Ćustić

CURRENT TRENDS IN CONCRETE TECHNOLOGY

Course: Basics of Concrete Technology
Mentor: Assoc. prof. dr. sc. Marija Jelčić Rukavina

Zagreb, 2023



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Barbara Čustić**

JMBAG: **0082064037**

Završni ispit iz predmeta: **Osnove tehnologije betona**

Naslov teme završnog ispita:	HR	Tekući trendovi u tehnologiji betona
	ENG	Current trends in concrete technology

Opis teme završnog ispita:

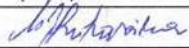
U radu je potrebno, temeljem analize dostupne literature, opisati tehnologiju, svojstva te uporabe za slijedeće vrste betona:

- 1/ savitljivi beton
- 2/ specijalizirani visokovrijedni beton
- 3/ samočisteći beton
- 4/ beton ojačan grafenom
- 5/ proziran, svjetlopropusni beton.

Datum: **6. travanj 2023. godine**

Komentor: **-**
(Ime i prezime komentora)

Mentor: **izv.prof. Marija Jelčić Rukavina**
(Ime i prezime mentora)


(Potpis mentora)

Izjava:

Ovom izjavom potvrđujem da sam rad uradila samostalno koristeći znanja naučena kroz predmete preddiplomskog studija Građevinskog fakulteta u Zagrebu, također uz dolje navedenu literaturu, te pod vodstvom mentorice izv. prof. dr. sc. Marije Jelčić Rukavine.

Sažetak:

Beton je najkorišteniji građevinski materijal. Osnovni sastojci su mu agregat, cement i voda, dok ovisno o traženim svojstvima konstrukcije, različitim kemijskim i mineralnim dodacima poboljšavaju se njegova mehanička i trajnosna svojstva. Uz pomoć dostupne literature u radu je prikazan razvoj betona kroz povijest, opisan je način proizvodnje običnog betona te dane prednosti i mane u odnosu na ostale građevinske materijale. Fokus u radu je dan na nove tehnologija betona, razvijene u 21. stoljeću, obzirom na trenutne izazove u gradnji, a to su: savitljivi betoni, beton visokih čvrstoća i visokih uporabnih svojstva, beton sa samočišćenjem, beton ojačan grafenom i prozirni ili svjetlopropusni beton. U radu je prikazan njihov sastav, svojstva te prednosti i mane u odnosu na obični beton. Za svaku tehnologiju dani su primjeri korištenja spomenutih vrsta betona.

Ključne riječi: savitljivi beton, beton visokih čvrstoća i visokih uporabnih svojstava, beton sa samočišćenjem, beton ojačan grafenom, prozirni ili svjetlopropusni beton, cement

Abstract:

Concrete is the most used building material. Its basic constituents are aggregate, cement and water, while various chemical and mineral additives improve its mechanical and durability properties, depending on the required structural properties. Based on the available literature, the thesis presents the development of concrete throughout history, describes the method of production of normal weight concrete, and highlights its advantages and disadvantages compared to other construction materials. The thesis focuses on new concrete technologies developed in the 21st century to meet current challenges in construction, namely: engineered cementitious composite, ultra-high-performance concrete, self-healing concrete, graphene-enhanced concrete, light translucent concrete. The paper presents their composition, properties, advantages and disadvantages compared to conventional concrete. For each technology, examples of the use of the mentioned concrete types are given.

Key words: engineered cementitious composite, ultra-high-performance concrete, self-healing concrete, graphene-enhanced concrete, light translucent concrete, cement

Sadržaj:

1	OPĆI UVOD.....	8
2	Kronologija razvoja betona	9
3	Proizvodnja, te negativni utjecaji pri proizvodnji betona	18
4	Vrste betona.....	25
4.1	Savitljivi beton	25
4.2	Beton velike čvrstoće i visokih uporabnih svojstva	33
4.3	Beton sa samočišćenjem	39
4.4	Beton ojačan grafenom	44
4.5	Proziran, svjetlopropusni beton	48
5	OSNOVNI ZAKLJUČCI RADA.....	53
6	LITERATURA.....	54

1 OPĆI UVOD

Tema završnog rada su trendovi u proizvodnji tehnologije betona u 2023. godini. Beton kao osnovni i najbitniji čimbenik građevinske industrije stalno evoluira. Međutim kako bi mogli shvatiti nove suvremenije vrste, prvobitno upoznajemo običan beton. Običan beton sastavljen je od cementa, agregata, vode i dodataka. Količina svakog sastojka ovisi o traženom sastavu betona te njegovim mehaničkim svojstvima. Svaki sastojak ima svoju funkciju npr. cement daje betonu čvrstoću tako što sljepljuje zrna agregata i tvori nepropusnu masu, kod običnog betona u prosjeku na jedan m³ ide od 200 do 400 kg cementa, nadalje funkcija agregata je krutost betona, dok sastojak vode određuje tečnost, povećanjem udjela vode beton gubi svoja mehanička svojstva. Kako težimo poboljšanju i gradnji zahtjevnijih konstrukcija, običnom betonu pomoću dodataka poboljšavamo mane poput niske vlačne čvrstoće, bubrenja, puzanja i savitljivosti, te utječemo na poboljšanje trajnosti i tlačne čvrstoće... Rad je koncipiran kroz tri glavna poglavlja: 1) Kronologija razvoja betona, 2) Proizvodnja, te negativni utjecaji pri proizvodnji, 3) Vrste betona.

Kronologija kreće od početka, otkriva nastanak i razvoj betona od najstarijih civilizacija, preko znanstvenika kroz povijest do danas, 21. stoljeća. Proizvodnja, te negativni utjecaji pri proizvodnji pobliže prikazuju sastav običnog betona, postupke spravljanja, i negativne utjecaje pri proizvodnji cementa. Poglavlje vrste betona podijeljeno je kroz pet aktualnih vrsta: savitljivog betona, betona velike čvrstoće i visokih uporabnih svojstava, samočišćeg betona, betona ojačanog grafenom i prozirnog ili svjetlopropusnog betona, svi su prikazani na način da se prvobitno upozna s različitostima koje taj materijal nudi, uspoređuje s običnim betonom, te prikazuje današnji utjecaj i pretpostavke razvoja dalje. Također u sklopu ovog rada prožeta je tematika kako se betonska industrija u 2023. godini nosi sa navedenim izazovima ekološki prihvatljivije i zelene gradnje. Upravo je činjenica da su za proizvodnju betona nužni procesi s negativnim utjecajem na okoliš prošlih godina došla u prvi plan upravo radi napora na razini Europske Unije i šire koji s ciljem imaju smanjenje negativnog utjecaja građevinskog sektora na sve veću količinu CO₂ emisija u atmosferu. [1], [2], [3], [4]

2 Kronologija razvoja betona

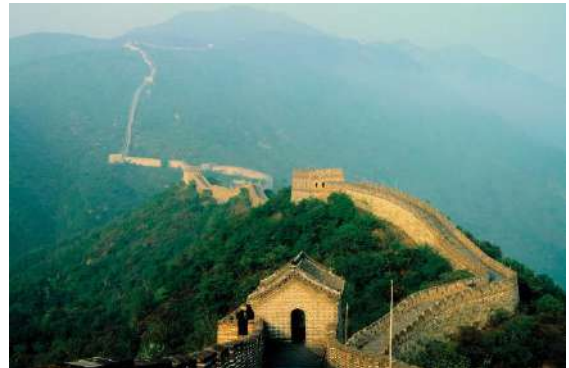
Odakle kreće uporaba betona ne može se znati točno, već svoje korijene veže uz najstarije civilizacije i otkriće cementa za koji se smatra da je otkriven prije 12 milijuna godina gdje je nastajao u različitim procesima Zemlje. Korištenjem prirodnog cementa i eksperimentiranjem u izradi umjetnog nastaju građevine kojima se i danas divimo, velika su turistička atrakcija [5].

Neki od primjera su:

- Egipćani pri izgradnji piramida gdje koriste žbuku od gipsa i vapna.(slika 1.)
- Kinezi u izgradnji Kineskog zida (slika 2.),
- Porijeklo Rimskih tvorevina kao sto su Apijska cesta (slika 3.), rimske toplice (slika 4.), Panteon (slika 5.) ,akvadukt Pont du Gard u južnoj Francuskoj (slika 6.) te rimski amfiteatar (slika 7.), koristeći cement iz Pozzuolija



Slika 1. Egipatske piramide [39]



Slika 2. Kineski zid [46]



Slika 3. Apijska cesta [47]



Slika 4. Rimske toplice [40]



Slika 5. Panteon [48]



Slika 6. Pont du Gard [49]



Slika 7. Rimski amfiteatar [53]

Kroz 17. i 18. stoljeće nalaze se mnogi zapisi o izradi cementa, među kojima se najviše ističe knjiga „Experiments and Observations Made With the View of Improving the Art of Composing and Applying Calcareous Cements and of Preparing Quicklime“ („Pokusi i opažanja u pogledu poboljšanja umijeća sastavljanja i primjene sedrenih cementa i pripreme živog vapna“) autora Bry Higginosa [6]. Kroz ta dva stoljeća dolazi do izrade rimskog cementa dobivenog iz nepročišćenog vapnenca s glinom. Sve se kretalo sličnim pokusima i rezultatima dok 1824. godine Škot Joseph Aspdin nije proizveo vezivo koje je nazvao portland cement, a izradio ga je pečenjem gline i krede u peći za vapno. Nezadovoljstvom kvalitete, 1845. godine Isaac Johnson pečenjem gline i vapnenca poboljšava svojstva portland cementu. Pet godina kasnije 1850.

godina smatra se početkom armiranog betona, čije zasluge preuzima Joseph Lambot s konstrukcijom žičanog čamca obloženog mortom (slika 8.). [5]



Slika 8. Joseph Lambot, žičani čamac obložen mortom [7]

Godine koje su utjecale na daljnji razvoj u 19. stoljeću:[5]

➤ 1860.

Razvoj današnjeg portland cementa

➤ 1862.

Blake Stonebreaker- stroj za drobljenje klinkera (slika 9.)



Slika 9. Stroj za drobljenje klinkera, Blake Stonebreaker [8]

➤ 1867.

Joseph Monier- armirane vaze za cvijeće

- 70-tih i 80-tih godina 19. stoljeća prolazi u napretku portland cementa, ističe se važnost kemijskih dijelova klinkera

- 1886.
 - Počinje upotreba rotacijske peći
 - Matthias Koenen „otac“ armiranobetonskog graditeljstva, armirao ploču po vlačnom dijelu
 - Izdao rad : „Theorie einiger wichtiger Konstruktionen nach System Monier, Metallgerippe mit Cementshüllung“ (Teorija nekih važnijih konstrukcija po Monierovom sustavu, Ojačanje cementnom oblogom)

- 1887.
 - Henry Louis Le Chatelier - francuski kemičar, pridaje važnost povezivanju cementa sastavljenog kalcijevim silikatima.
 - Dijeli ih na 3 komponente: alit (trikalcij silikat) , belit (dikalcij silikat) i celit (tetrakalcij aluminoforit). Dolazi do zaključka da zbog kristalnih struktura cementa i vode stvara se čvrsta veza.

- 1889.
 - Prvi armiranobetonski most

- 1891.
 - Prva betonska ulica- Bellefontaine, Ohio (slika 10.)



Slika 10. Prva betonska ulica [9]

Prelazak u 20. stoljeće ubrzo obilježava De Tedeschi razvitkom metode po dopuštenim naprezanjima. Nakon 19. stoljeća s mnoštvo istraživanja i znanstvenih radova u ovom stoljeću dolazi do gradnje prvih betonskih velikih konstrukcija: [5]

- Prva betonska zgrada u Cincinnatiju, Ohio (1903.)
- Edison pokreće gradnju betonskih kuća u New Jerseyu (1908.) (slika 11.)



Slika 11. Betonske kuće, New Jersey [10]

- Hooverova i betonska brana Grand Coulee (1936.) (slika 12 i 13.) - korišteno 3.33 milijuna m³ betona i 9.155,942 m³ betona [4]



Slika 12. i 13. Hooverova brana i brana Grand Coulee [50] [51]

- Assembly Hall, sveučilište Illinoisu- prva sportska građevina s betonskom kupolom (1967.) (slika 14.)



Slika 14. Assembly Hall, Illinois [11]

- CN toranj, Toronto, Kanada (1975.), (slika 15.)



Slika 15. CN toranj, Kanada [12]

- Water Tower Place, Chicago- najviša zgrada (1975.), (slika 16.)



Slika 16. Water Tower Place, Chicago [13]

Također 70 tih godina ovog stoljeća uvode se ojačanja betonu kao što su superplastifikatori i vlakna.

Dolaskom do 21. stoljeća vidan je napredak građevine kako u mehaničkom sastavu betona tako i u korištenju istog, beton se koristi kao arhitektonski alat, zbog sve manje ograničenja potiče virtuoze arhitekture da svoju maštu pretvore u stvarnost. Nadilaze se geometrijske strukture prošlosti, omogućena je izvedba kosih, zaobljenih, oštih, tankih, nepravilnih struktura iz čega rezultiraju forme kojima se danas divimo.

Tek nekolicina primjera su:

- Villa Saitan, Kyoto, Japan izgrađena 2006. godine, konstrukcija obgrljena betonom oponaša stablo (slika 17.)



Slika 17. Villa Saitan, Kyoto, Japan [14]

- Cidade das Artes, Rio de Janeiro, izgrađena 2013, godine djelo je arhitekta Christiana de Portzamparca koji konstrukcijom prikazuje morsku obalu s stijenama (slika 18.)



Slika 18. Cidade das Artes, Rio de Janeiro [14]

- Iberê Camargo Foundation, Porto Alegre, Brazil, djelo Álvaro Siza koji ju dovršava 2003. godine (slika 19.)



Slika 19. Iberê Camargo Foundation, Porto Alegre, Brazil [15]

- On the Corner, Shiga Prefecture, Japan, 2011. godina, prikaz oštrog tankog ruba (slika 20.)



Slika 20. On the Corner, Shiga Prefecture, Japan [15]

- Selvika National Tourist Route, Finnmark, Norway valovita građevina iz 2012. godine pobija teze da beton ne može biti zaobljen (slika 21.)



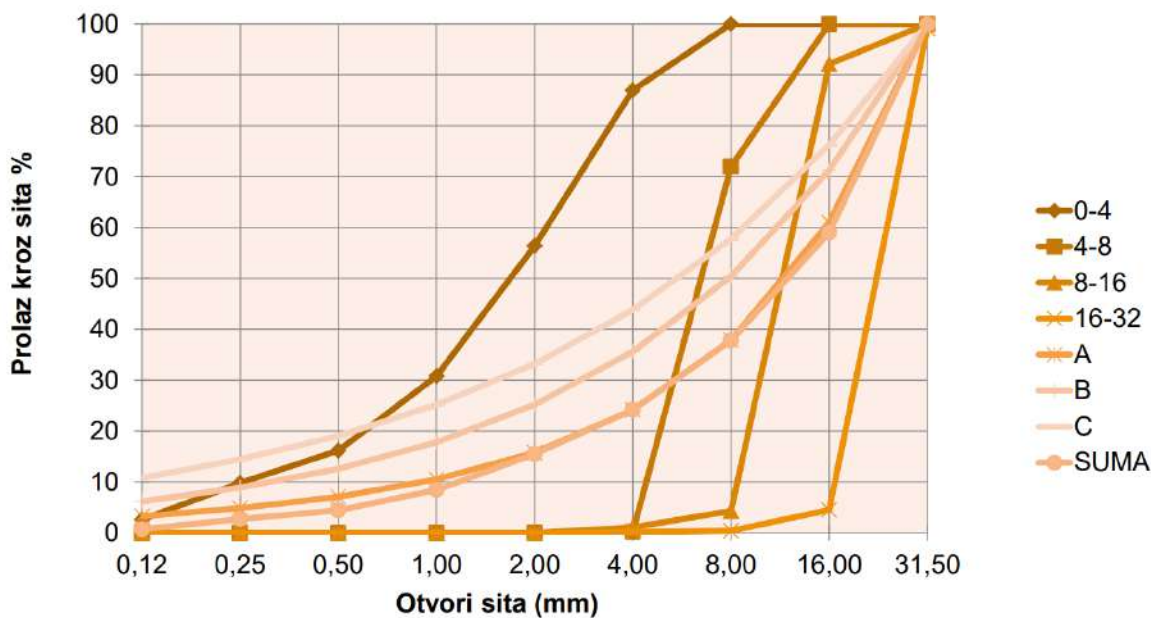
Slika 21. Selvika National Tourist Route, Finnmark, Norveška [15]

3 Proizvodnja, te negativni utjecaji pri proizvodnji betona

Tehnološki postupak proizvodnje betona traži vrlo veliku stručnost i preciznost.

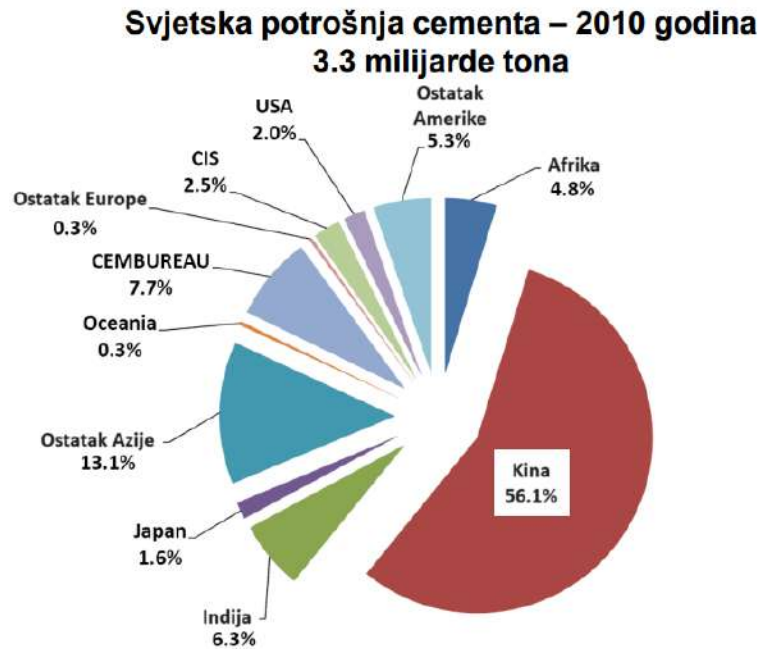
Prvobitno se pripremaju sirovine: određuje frakcija agregata koja čini oko 70% ukupnog volumena betona, ona ovisi o traženim uvjetima, odnosno namjenu betona koji se proizvodi. Sam agregat može biti prirodan, umjetni ili biti recikliran. Također se dijeli na sitni i krupni. U sitni agregat spadaju frakcije od 0 do 4 milimetra, dok u krupni frakcije od 4 do 32 milimetara. Postoje i frakcije od 63 i 125 milimetara ali one se koriste za betone specijalne namjene. Funkcija krupne je da čini skelet smjese, dok sitna sa cementom čine mort. Svojstva agregata uvelike utječu na beton, odnosno na obradivost, vlažnu čvrstoću, teksturu, otpornost na ekstremne temperature, tvrdoću, skupljanje, volumen, ekonomičnost...

Granulometrijski sastav agregata je upravo omjer frakcija agregata betona (slika 22.) [4]



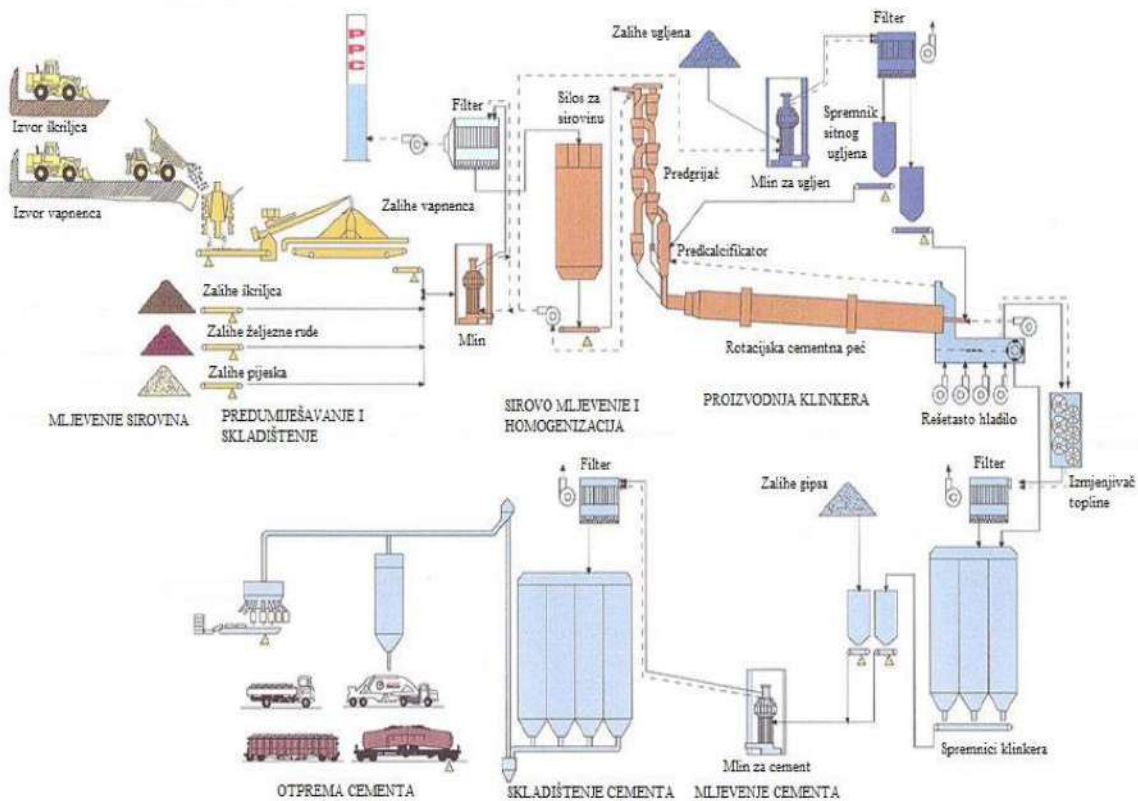
Slika 22. Granulometrijski sastav agregata [4]

Druga najvažnija sirovina je upravo najupotrebljavaniji materijal u svijetu - cement (slika 23.). Po definiciji cement je hidraulično vezivo koje samostalno očvrstne na zraku ili pod vodom.



Slika 23. Svjetska potrošnja cementa za 2010. godinu [4]

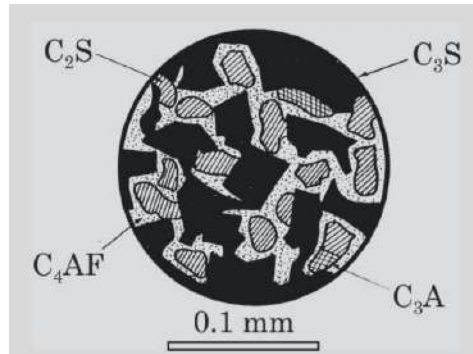
Proizvodnja cementa odnosno najupotrebljavanijeg portland cementa započinje drobljenjem sirovina dobivenih iz zemlje i stijene koje s geološkog aspekta zadovoljavaju tražene uvjete, a to su vapnenac i glina. Potrebno je provesti proces homogenizacije čiji postupak može biti suhi, na zraku i mokri u vodi, zatim kreće zagrijavanje sirovina u rotacijskoj peći na 1400 °C nakon čega kao produkt dobivamo cementni klinker. Slijedi drobljenje i dodavanje gipsa kako bi modificirali vrijeme vezivanja dobivamo portland cement. (slika 24.) [4]



Slika 24. Proizvodnja cementa [16]

U sastavu cementa, odnosno klinkera nailazimo na 4 glavna minerala (slika 25.):

1. Trikalcij silikat (alit), C₃S
 - utječe na ranu čvrstoću, brzo hidratizira
 - kod betona s uvjetom rane čvrstoće veća je zastupljenost ovog minerala
2. Dikalcij silikat (belit), C₂S
 - suprotan od C₃S, za betone gdje je tražen kasniji prirast čvrstoće
3. Trikalcij aluminat, C₃A
 - utječe na ranu čvrstoću
4. Tetrakalcij aluminat ferit (celit), C₄AF
 - mijenja jedino boju cementa, ne utječe na svojstva, uništava bijelu boju cementa [4] [16]



Slika 25. Mineralni sastav portland cementa [17]

Osim nabrojanih elemenata, beton radi poboljšanja svojstava može sadržavati dodatke ili aditive[4]:

1) PUCOLANE

- Leteći pepeo nastaje kao nusprodukt mljevenog ugljena pri visokim temperaturama (1000-1600 °C), sfernog je oblika veličine 5 do 90 μm, betonu smanjuje potrebu za vodom i pridonosi duljem vremenu vezanja i niskim početnim čvrstoćama
- Silikatna prašina nastaje kao nusprodukt u proizvodnji silicijskih legura na temperaturama 1600-2000 °C, veličine je do 0.01 mm, maksimalni udio smije biti do 10% mase cementa, utječe na povećanje čvrstoće betona, obradivosti i kohezivnosti

2) KEMIJSKE DODATKE

- Plastifikatori zbog djelovanja na veću raspršenost molekula cementa poboljšavaju obradivosti smjese, te omogućuju istu čvrstoću uz smanjenje udjela cementa
- Superplastifikatori, superlativ u nazivu naznačuje još bolje utjecanje na obradivost i veće smanjenje količine vode u smjesi betona. Zaslužni za betone visokih čvrstoća.

- Aeranti, anioni kojima je zadaća tvorba zračnih mjehurića u smjesi betona kako bi cement pri hidrataciji apsorbirao negativne ione. Betonu omogućavaju veću obradivost, manja oštećenja od soli pri djelovanju ekstremnih temperatura ali potiču smanjenje čvrstoće.
- Usporivači i ubrzivači, mijenjaju vrijeme očvršćivanja betona, zato su vrlo korišteni pri betoniranju na ekstremnim temperaturama

Osim zbog cilja da beton postigne bolju tlačnu čvrstoću, trajnost, obradivost, te da mu se isprave mane poput niske vlačne čvrstoće, osjetljivosti na atmosferilije, probleme korozije armature u betonu, te omogući gradnja zahtjevnijih konstrukcija, velik poticaj za napredovanje daje globalno zatopljenje, odnosno emisija ugljikovog dioksida preko proizvodnje i ugradnje cementa za beton.

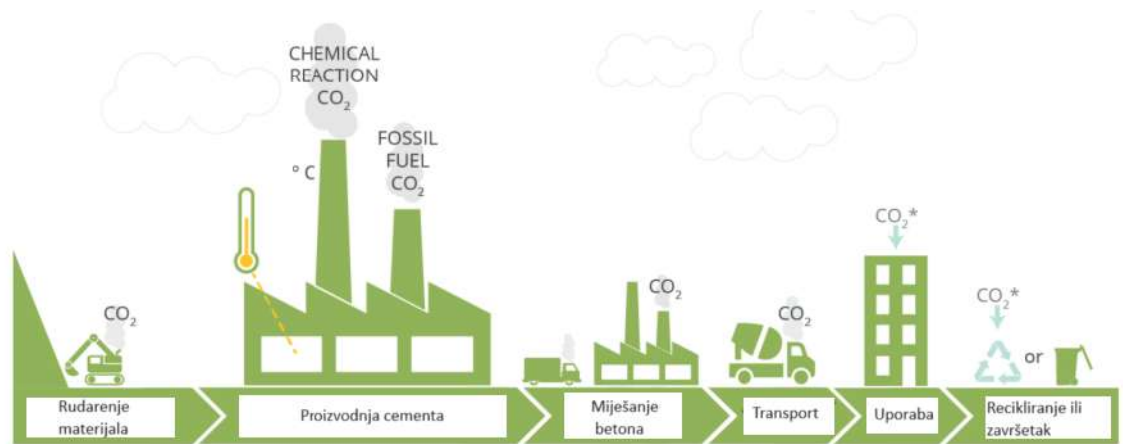
Prilikom zagrijavanja klinkera, koji u sebi sadrži kalcijev karbonat CO_2 se oslobađa kao nusproizvod kalcinacije. Sam proces kalcinacija dobiva naziv jer izdvaja ugljikov dioksid iz kalcijevog karbonata, do odvajanja dolazi prilikom dosezanja temperatura od 600 do 900 °C.

[18]



Na 1000 kilograma cementa od proizvodnje pa do ugradnje dolazi do emisije 92 kilograma CO_2 . Najveći postotak emisije nastaje zbog proizvodnje, dok ostatak pri odvozu. Rješenje jedino leži u mogućnosti promjene sastava cementa ili recikliranju.

Slika 26. prikazuje proces od proizvodnje do ugradnje cementa s emisijom CO_2 . [19]



Slika 26. Životni vijek cementa s emisijom CO₂ [19]

Uz to, korištenjem betona pokrenut je apsolutni trend masovne gradnje i betoniranja velikih površina radi njihove prenamjene u ljudsku svrhu (npr. površine za parking). Takve površine osim direktnog utjecaja na veličinu životinjskih staništa za rezultat imaju i povećanu tendenciju upijanja sunčevih zraka od npr. travnatih površina što indirektno dovodi do zagrijavanja atmosfere. Nadalje, poboljšanja u tehnologiji betona omogućile su čovjeku gradnju građevina koje imaju katastrofalan utjecaj na floru i faunu. Primjer su hidroelektrane za čiju izgradnju i puštanje u pogon je potrebno poplaviti velike prirodne površine.

Unatoč činjenici da je globalna količina negativnih CO₂ emisija uzrokovanih betonom prešla razinu emisija uzrokovanih proizvodnjom plastike, stanje se i dalje ne smatra alarmantnim s obzirom na to da zagađenje plastikom ipak direktnije i očitije utječe na zdravlje ljudi. [20]

Primjer su poplave pri kojima betonske površine ne mogu upijati vodu što u kombinaciji sa začepljenom ili nedovoljno razvijenom infrastrukturom odvodnje može prouzročiti poplavu. Iako takvi događaji nisu svakodnevnica, posljedice mogu biti katastrofalne, što se dobro moglo primijetiti tijekom i nakon uragana Katrina u New Orleansu i uragana Harveyja u Houstonu gdje se dogodio upravo navedeni problem sa nemogućnosti upijanja oborina u betonirane površine (slika 26.). [20]



Slika 26. Poplava u New Orleansu [52]

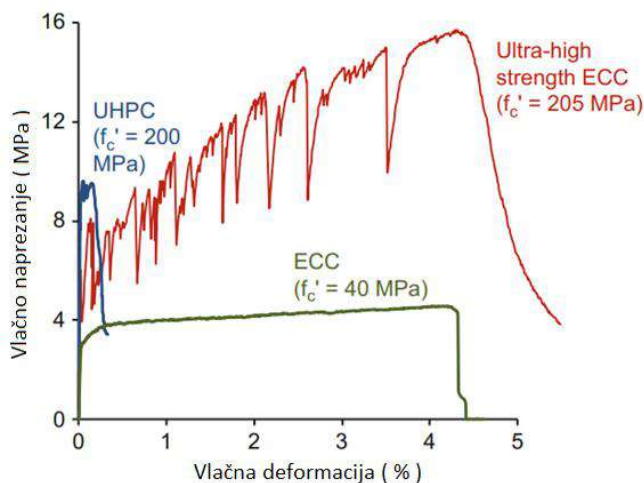
4 Vrste betona

Završivši pregled negativnih utjecaja same proizvodnje i korištenja betona kroz prošlost i sadašnjost, u ovom poglavlju izdvojiti ćemo vrste betona koje se danas koriste u velikoj mjeri, njihove negativne i pozitivne osobine, te zašto se koriste.

4.1 Savitljivi beton

Savitljivi beton ili ECC (Engineered Cementitious Composite osmislio je Victor C. Li koji betonu poboljšava njegovu najveću manu, sposobnost deformacije. Spada u betone ojačane vlaknima (engl.FRC, *fibre reinforced concrete*), dok FRC beton ima elastičnu sposobnost od 0,01%, te ga nadilazi i suvremeniji tip betona UHPC specijalizirani visokovrijedni beton, koji mogućnost vlačne deformacije dostiže do 0,2%, savitljivi beton svoju deformaciju može postići do 2%. Tlačna čvrstoća se kreće do 200 MPa.

Na slici 27. prikazuje se omjer vlačnog naprezanja i deformacije na dvije vrste savitljivog betona.[21]



Slika 27. Prikaz deformacije betona pod utjecajem naprezanja [21]

Iz slike je vidljiv veliki omjer duktilnosti i tlačne čvrstoće što mu omogućuje da zadovolji vrlo velik spektar uvjeta za traženu konstrukciju (slika 27.). ECC se sastoji se od svih materijala kao i klasični betoni, međutim grubi agregati zamijenjeni su polimernim vlaknima.

PVA vlakna (slika 28.) su monofilamentna vlakna, koja se dodaju u svježu betonsku mješavinu. U prosjeku volumen savitljivog betona sadrži oko 2 % vlakana. Svojom teksturom stvaraju višesmjernu mrežu zbog koje beton poboljšava svojstva, poput duktilnosti, otpornosti na koroziju armature, abraziju... [22]



Slika 28. PVA vlakna [22]

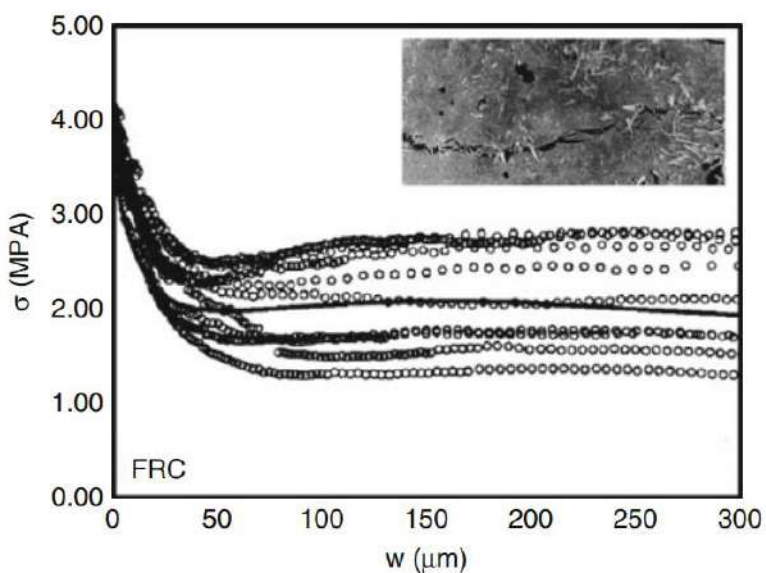
Prednosti ECC: [3]

- Mogućnost savijanja kao metal
- Produžen životni vijek naspram klasičnim betonima
- Samoobnovljiv
- Otporan na pucanje
- 20-40% lakši
- moguća eliminacija armature
- manji troškovi projekta
- korištenje kao montažni beton
- smanjenje štetnih plinova

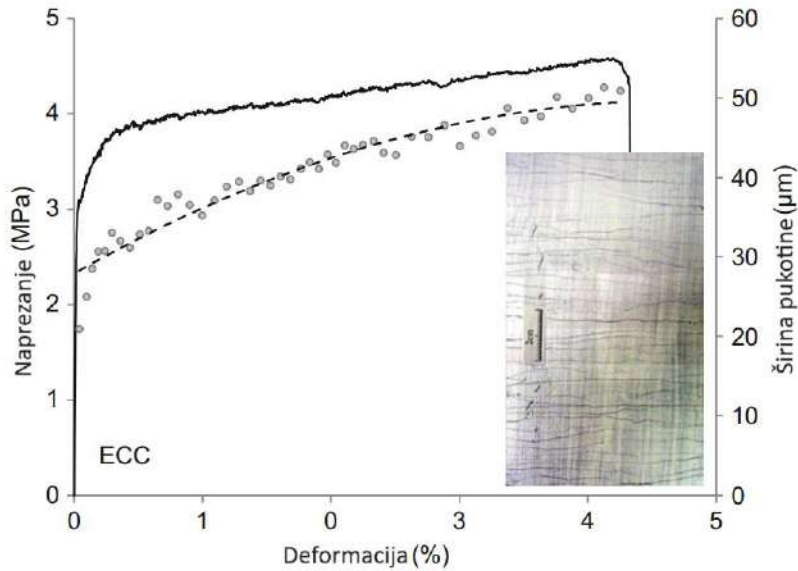
Kako bi bolje prikazali načine na koji je ovaj beton poseban i drugačiji slijedi usporedba s klasičnim betonom i betonom ojačanog vlaknima, pa tako FRC ili beton ojačan vlaknima pri

jednoosnom stanju naprezanja ima lom koji se razvija na jednom mjestu, te se širi do prestanka njegove nosivosti, dok je za obični beton poznato da prilikom opterećenja dolazi do krhkog sloma. Savitljivi beton je srodan FRC-u, međutim dok FRC ima postepeni gubitak nosivosti i mogućnost ponovnog povezivanja vlaknima, te se zato smatra kvazi-krhkim, ECC nakon prve pukotine ne omekšava kao FRC, već postaje tvrdi. Upravo je to njegova prednost, tj. porastom opterećenja raste i njegova nosivost. Razlika je u tome što se kod savitljivog betona deformacija ne događa na jednom mjestu, već opterećenje prenosi na cijeli svoj volumen koji nakon duljeg opterećenja bude prožet mikropukotinama.

Na slici 28. prikazuje se kako beton ojačan vlaknima reagira na vlačno opterećenje. Naprezanje opada kako se pukotina širi. Dok na slici 29. se prikazuje kako vlačnim naprezanjem dolazi do stvrdnjavanja savitljivog betona te povećanja njegove vlačne duktilnosti. [21]



Slika 29. Beton ojačan vlaknima pod vlačnim opterećenjem [21]

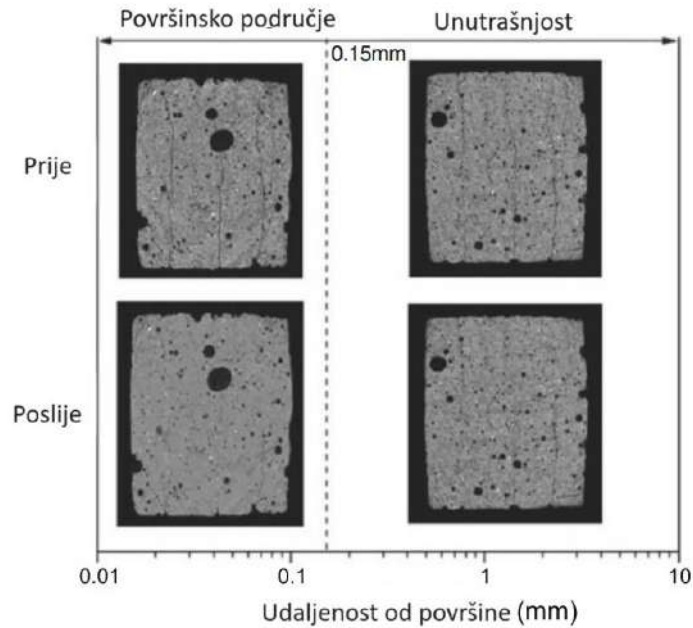


Slika 30. Savitljivi beton pod vlačnim opterećenjem [21]

Povećanje volumena vlakana ne utječe na bolja svojstva ECC-a u odnosu na FRC, jer se povećanjem doprinosi slaboj obradivosti i skupljem materijalu. Razlika se nalazi u svojstvima vlakana, unutrašnjoj preraspodjeli, kemijskim vezama, omjeru veličine vlakana s ostalim svojstvima.

Veliki korak naprijed u građevinskoj industriji donosi mogućnost samoobnovljivosti materijala što ova vrsta betona i omogućuje. Omogućen je duži životni vijek naspram ostalim vrstama betona, što ujedno i rezultira ekonomičnijim pristupom gradnji, također uvelike su smanjeni troškovi tokom životnog vijeka konstrukcije. Samoobnovljivost kod savitljivog betona omogućena je malim omjerom vode i cementa što rezultira zalihom nehidratiziranih čestica cementa, prilikom stvaranja pukotina nehidratizirane molekule reagiraju s vodom iz atmosfere te se stvaraju nove CSH veze koje popunjavaju šupljine, također ugljikov dioksid otapanjem u vodi iz atmosfere stvara ugljičnu kiselinu koja u dodiru s kalcijevim hidroksidom iz cementa puni šupljine kalcijevim karbonatom. Samoobnovljivost je osjetljiva na veličinu pukotine što kod ECC betona je vrlo pozitivno s obzirom da mu pukotine obično ne prelaze veličine od 100 μm . Na

slici 31. prikazano je ispitivanje samoobnovljivosti. U području površinskih pukotina vidljivo je da su pukotine potpuno nestale dok u dubljem dijelu još uvijek postoje međutim u vrlo malom broju.[21]



Slika 31. Pokus zacjeljivanja savitljivog betona [21]

Navedene prednosti kao i njegova savitljiva svojstva u vremenu kada su potresi postali svakodnevnica donijeli su ovoj vrsti betona nadimak „beton budućnosti“.

Provedbom ispitivanja na savijanje rezultati su vrlo vidljivi, na slici usporedba je ispitivanja na savijanje običnog betona i savitljivog betona pod jednakim opterećenjem (slika 32.), gdje se vidi da kod ECC betona ne dolazi do krtog loma.[3]



Slika 32. Ispitivanje na savijanje [3]

Nedostatci ECC:[3]

- visoka početna cijena
- manjak dostupnog materijala za proizvodnju
- ovisan o kvaliteti i uvjetima proizvodnje
- manje tlačne čvrstoće
- velika emisija CO₂

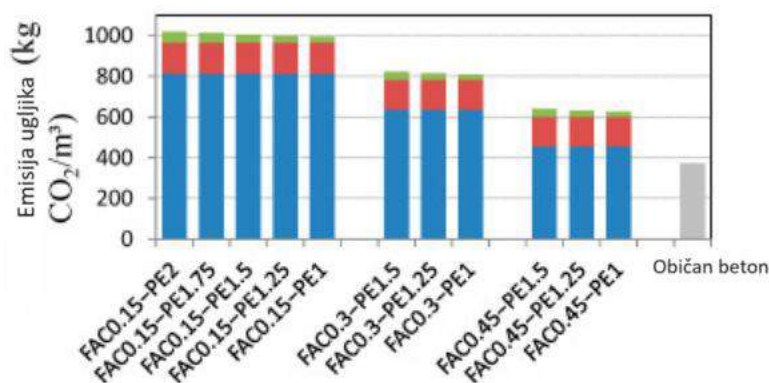
Glavni problem savitljivog betona, kako bi održao svoja svojstva savitljivosti i samoobnovljivost koristi količinu cementa znatno veću nego li klasični betona što rezultira povećanje emisije CO₂. Na tu problematiku postoje rješenja poput zelenog savitljivog betona, odnosno GLECC (green lightweight ECC). Umjesto cementa koriste se pucolani od stakla, šećerna trska i kalcinirani vapnenac. Zamjena za agregat čini reciklirani materijali korišteni u asfaltiranju, te ostalim građevinama ili reciklirana guma Međutim dolazi do velikog opadanja mehaničkih svojstva, vlačna deformacija pada na 3% što i dalje zadovoljava mnoge građevinske uvjete što se tiče trajnosti , ali uvelike odstupa od početnih svojstava po kojem je ovaj beton napredan.

Pošto cilj nije izgubiti većinu mehaničkih svojstava jer tako gubi sve svoje prednosti, kako bi podmirili ekološki problem i dalje imali beton s približnim svojstvima i mogućnostima, PVA vlakna moguće je zamjeniti polietilenskim vlaknima (PE) koja imaju skoro duplu vlačnu čvrstoću nego

li PVA vlakna, 2900 MPa. Također umjesto letećeg pepela postoje cenosphere letećeg pepela (engl. FAC fly ash cenospheres) koje su otpad termoelektrana na ugljen, zbog laganije strukture, olakšavaju ECC beton. Konačna ideja poboljšanja savitljivog betona u smjeru ekološki prihvatljivijeg, a ujedno s dobrim mehaničkim svojstvima je kombinacija PE vlakana i FAC pepela. Rezultati ekološkog poboljšanja proizvodnje nakon optimizacije sastava uporabom FAC pepela značajno se smanjuje uporaba cementa čime i značajno smanjujemo emisiju ugljikovog dioksida do 36%, dok uporaba recikliranih vlakana znatno utječe na ekonomičnost tog betona.

Savitljivi beton i zadržava mehanička svojstva, vlačna deformacija je 3%, vlačna čvrstoća 3.5 MPa dok tlačna iznosu 30-50 MPa, što u usporedbi sa običnim betonom i nije velika promjena, dok je za okoliš znatna.

Na slici 33. je dana usporedba emisije ugljika različitih GLECC betona s različitim udjelima cenosfera letećeg pepela vidno je da povećanjem udjela, smanjuje se emisija CO₂. [23]



Slika 33. Emisija ugljikovog dioksida GLECC betona [23]

Savitljivi beton se najviše upotrebljava u Japanu, kako zbog seizmičkih i hidrodinamičkih problematika te nekvalitetne gradnje korištenjem klasičnih betona, kao što je:

- Most Mihara, Hokkaido na kojem je korišten ECC beton radi poboljšanja krutosti

- Zbog visokog rizika od potresa korišten je ECC beton u spojnim gredama kod zgrada Glorio Tower, Tokyo slika (34.), tornja Nabeaure Yokahoma (slika 35.) i Kitahama Tower, Osaka (slika 36.) [21]



Slika 34. Glorio-Tower, Tokyo [21]



Slika 35, Nabule Yokohama Tower, Tokyo [21]



Slika 36. Kitahama Tower, Osaka [21]

4.2 Beton velike čvrstoće i visokih uporabnih svojstva

Beton velike čvrstoće i visokih uporabnih svojstva ili UHPC (engl. Ultra-High Performance Concrete), sam naziv već prikazuje njegove kvalitete, a to su upravo visoka tlačna čvrstoća, duktilnost i trajnost.

Preteča UHPC betona je reaktivni beton (engl. RPC, Reactive powder concrete) stvoren 1990-ih godina, čija tlačna čvrstoća varira od 200 do 800 MPa. U tablicama 1. i 2. prikazani su sastavi RPC-a različitih tlačnih čvrstoća. [24]

Tablica 1. RPC - 200MPa [24]

Sastojci:	Količina (kg/m ³)
OPC	955
Pijesak (150-600 μm)	1061
Silicijev dioksid	229
Hidrofobni silicijev dioksid	10
Superplastifikatori	13
Čelična vlakna	191
Voda	153

Tablica 2. RPC - 800 MPa [24]

Sastojci:	Količina (kg/m ³)
OPC	1000
Pijesak (150-600 μm)	500
Kvarcni prah	390
Silicijev dioksid	230
Superplastifikatori	18
Čelična vlakna	630
Voda	180

Kasnih godina 20. stoljeća iz RPC proizlazi UHPC pod imenom Ductal¹, te 1997. godine koristi se u izradi cijele konstrukcije pješačkog mosta u Sherbrookeu, Kanada (slika 37.). Napretkom u znanju i razvojem superplastifikatora, koji poboljšavaju tečenje preimenovan je u beton velike čvrstoće i visokih uporabnih svojstva. [1]



Slika 37. Most u Sherbrookeu, Kanada [1]

Daljnijim razvojem dolazi do smanjenja poroznosti optimalizacijom agregata, poboljšanje mehaničkih svojstava ubrzavanjem pucolanske reakcije silicijevog dioksida toplinskom obradom, te dodatkom čeličnih vlakana kako bi se poboljšala duktilnost i vlačna čvrstoća. Pokrenut je trend proizvodnje UHPC-a, u tablici 3. prikazani su komercijalni sastavi. [1]

Tablica 3. Sastavi UHPC-a [1]

Materijali(kg/m ³)	BCV [®]	BSI [®]	Cemtec [®]	Ductal [®]	DURA [®]
Portland cement	2115	1114	1050	712	911
Pijesak	(Premix)	1072	514	1020	911
Silicijev dioksid		169	268	231	225
Kvarcni prah		-	-	211	-
Ubrzivač	-	-	-	30	-
Čelična vlakna	156	234	858	156	173
Superplastifikatori	21.5	40	44	30.7	38
Voda	159	211	180	109	200

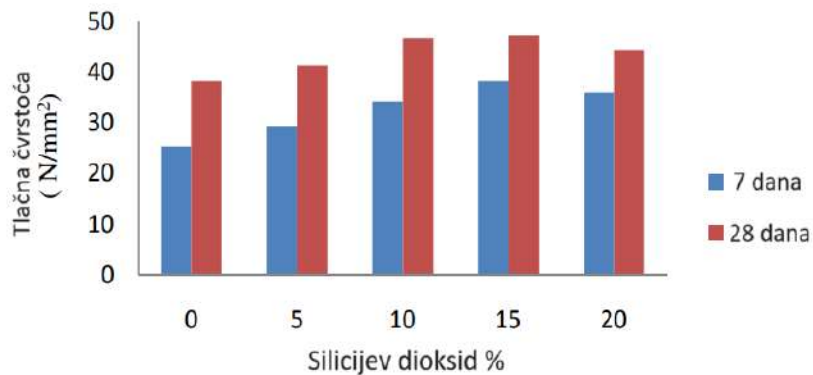
Sastojci:

1. CEMENT [24]
 - Koristi se obični portland cement

2. PIJESAK [24]
 - Zaslužan za čvrstoću
 - 150-600 μm
 - Lako dostupan
 - Jeftin

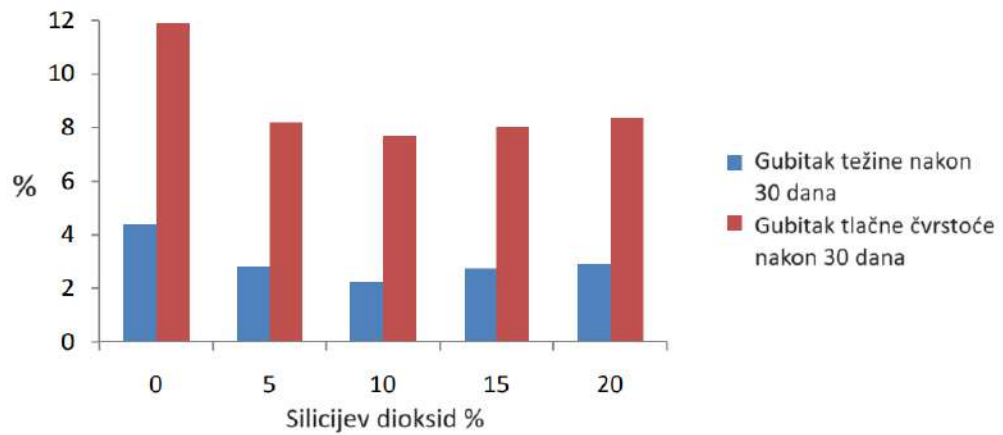
3. KVARCNI PRAH [24]
 - 5 – 25 μm
 - Kristalna struktura
 - Daje toplinsku izdržljivost betonu

4. SILICIJEV DIOKSID [24] [25]
 - iz električnih peći pri proizvodnji legura nastaje kao nusprodukt
 - 1-1.5 μm
 - Popunjava šupljine
 - Sudjeluje u povećanju tečnosti betona
 - Na slici 38. prikazano je kako utječe na tlačnu čvrstoću betona, optimalne rezultate daje beton s 15% udjela



Slika 38. Ispitivanje tlačne čvrstoće [25]

- za ispitivanje trajnosti beton je podložen djelovanju kiseline, prati se količina razaranja materijala i utjecaj na tlačnu čvrstoću (slika 39.) , značajno utječe na povećanje trajnosti betona jer pomoću silicijevog dioksida blokira kalcijev hidroksid u razaranju materijala, te zaustavlja gubitak tlačne čvrstoće



Slika 39. Ispitivanje trajnosti [25]

Za ispitivanja korišten je obični beton klase C30/37.

5. ČELIČNA VLAKNA (slika 40.) [24]

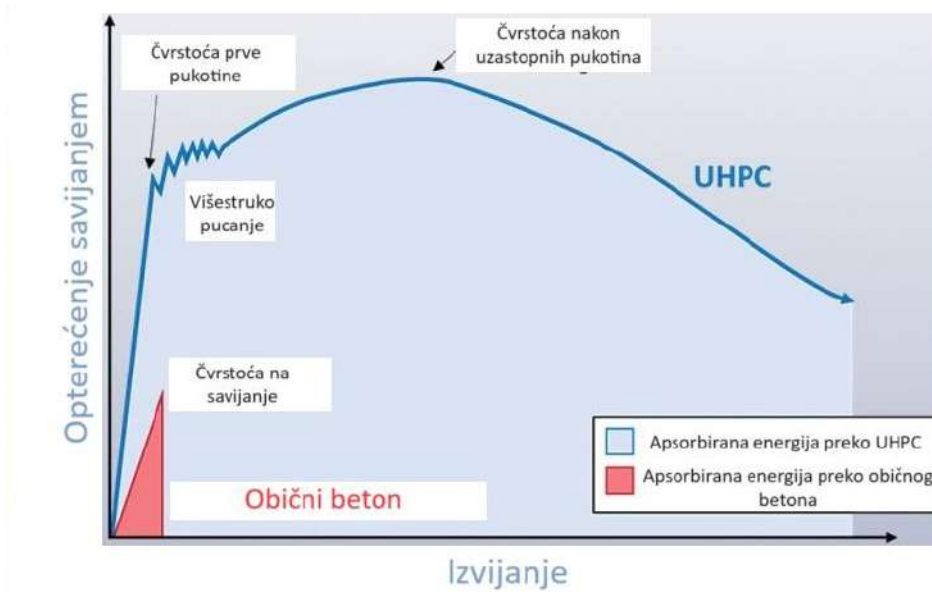
- Duljina 13 – 25 mm
- Promjer 0,15 – 0,5 mm
- Sudjeluje u povećanju duktilnosti betona



Slika 40. Čelična vlakna [24]

6. SUPERPLASTIFIKATORI [24]

- Polikarboksilat
- $\text{pH} \geq 6$
- volumetrijska težina $< 1,09 \text{ kg/l}$
- Sudjeluje u smanjenu vodocementnog odnosa



Slika 41. Ispitivanje duktilnosti [26]

Na slici 41. prikazan je graf usporedbe standardnog betona s UHPC betonom. Duktilnost specijaliziranog visokovrijednog betona znatno je veća nego li kod standardnog betona, upravo ta razlika očituje se u čeličnim vlaknima sadržanih u UHPC betonu. Povećanje duktilnosti daje mogućnost uklanjanja posmične armature u građevinama, konstrukcije bez armature bila bi velik benefit mostogradnji. Primjer konstrukcije mosta sa UHPC betonom je most Mars Hill, SAD sagrađen 2006. godine. Smatra se „prvim mostom budućnosti“ zbog UHPC nosača duljine 33,5 metra bez posmične armature (slika 42.). [26]



Slika 42. Most Mars Hill [1]

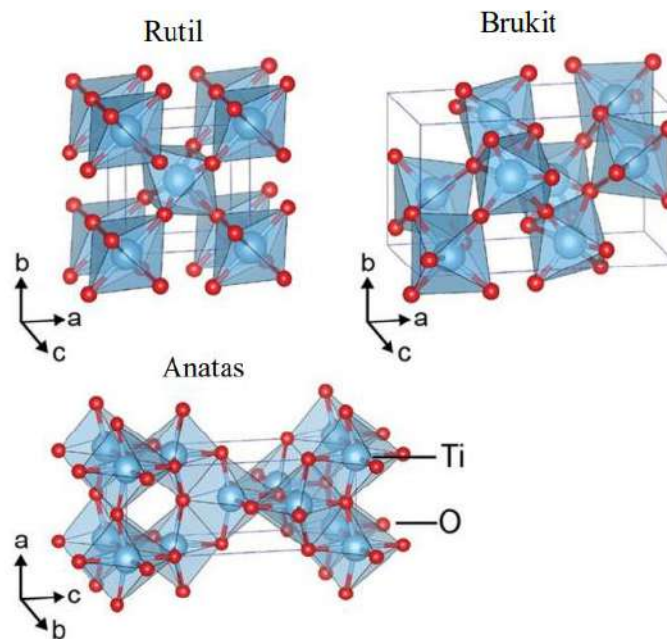
Trenutno UHPC beton ne doživljava procvat zbog skupih sastavnih materijala, međutim u sljedećih 5 do 10 godina predviđa se smanjenje cijene napretkom proizvodnje. Smatra se da će zamijeniti standardi beton u svim segmentima građevine, te omogućiti gradnju mostova većih raspona. Ekološko pitanje smanjenje emisije CO₂ kod ovog betona nije savršeno, iako u sastavu ima više cementa od standardnog betona spašavaju ga bolja mehanička obilježja. Uzimajući u obzir da pri gradnji konstrukcija sudjeluje manja količina betona, te mogućnost duljeg životnog vijeka građevina krajnji rezultat bi trebao biti povoljan. [1] [26]

4.3 Beton sa samočišćenjem

Dodavanjem 3 do 5% fotokatalitičkih sastojaka u smjesu običnog betona pokrenut je velik napredak u građevinskoj industriji. Kreiran je beton sa samočišćenjem (engl. SHC, self-healing concrete) koja ima sposobnost održavanja svoje ljepote i postojanosti, te sastavnim svojstvima pridonosi u poboljšanju kvalitete zraka.

Prvi upliv dodavanja titanijevog oksida javlja se krajem 20. stoljeća dodavanjem u cementne mortove, stakla, betonske ploče, također se gradi crkva Jubileja u Rimu, prva građevina od SHC betona.

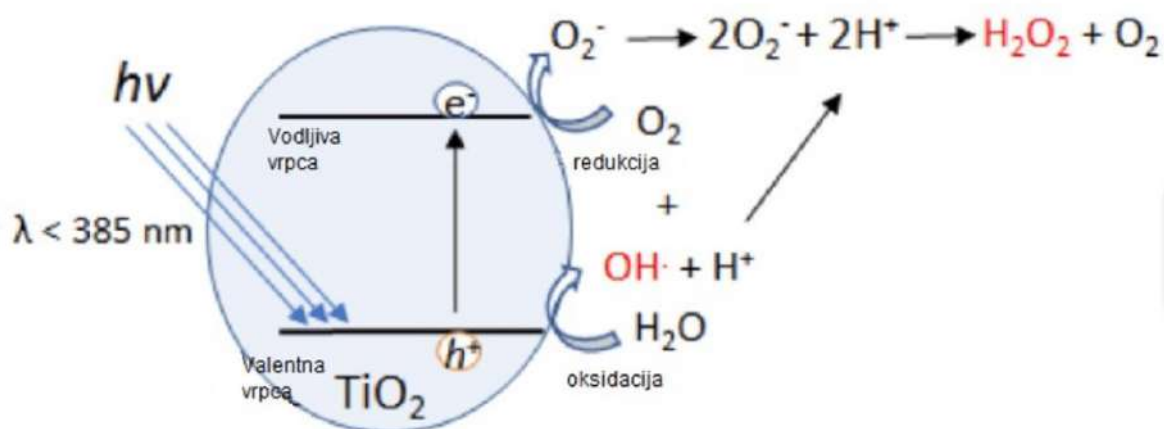
Fotokatalitički postupak je postupak vrlo sličan fotosintezi, upravo najbitnija stavka je sunčeva svjetlost, međutim umjesto klorofila listova biljaka, kod fotokatalitičkog postupka sunčeva svjetlost djeluje na titanijev dioksid (TiO_2) [27]



Slika 43. Titanijev dioksid [27]

TiO₂ nalazi se u krutom stanju, u tri strukture: dvije tetragonske ili rutil i antas, te romboedarskoj ili brukit (slika 43.). Rutil se uglavnom koristi kao bijela boja. Korištenjem titanijevog dioksida u doticaju s sunčevom svjetlošću razgrađuje većinu organskih spojeva. Zbog mogućnosti razgrađivanja i bezopasnosti na zdravlje ima širok spektar korištenja u industrijama poput automobilske, farmaceutske, kemijske, kozmetičke, prehrambene, te nama aktualne građevinske.

Od struktura najbolje reagira antas pri fotokatalitičkom postupku, svoju aktivnost pokreće tek pod UV zrakama duljina 385 nm, te dolazi do evociranja elektrona u TiO₂, te na površini u doticaju s kisikom i vodom dolazi do formiranja čestica OH i H₂O₂ čiji je zadatak poništavanje patogenih čestica (slika 44.). [28]

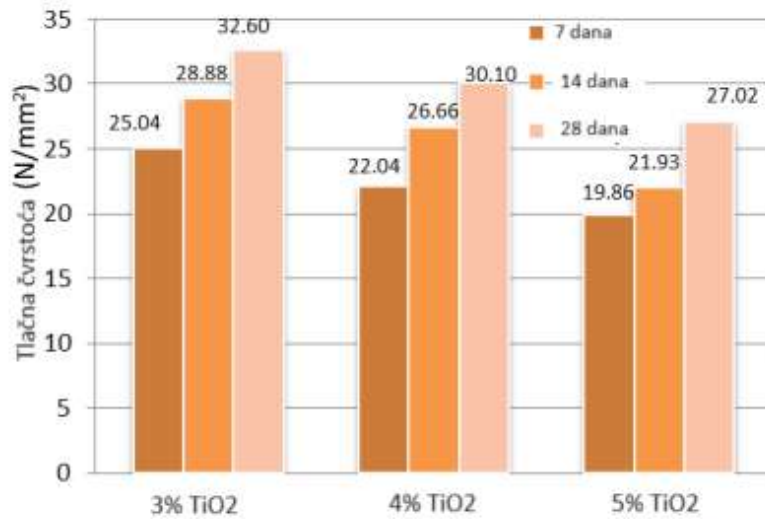


Slika 44. Fotokatalitički postupak [28]

Upravo građevina od samočišćeg betona zbog ovog procesa suzbija sve indikatore koje potiču promjenu boje i nastanak sloja nečistoće poput: čađe, plijesni, algi, bakterija,...

Ispitivanje tlačne čvrstoće

U istraživanju navedenom u (29) ispitivanje tlačne čvrstoće je provedeno na 3 uzorka betona s različitim količinama titanijevog oksida (3%, 4% i 5%). Uzorci su opterećeni preko elektrohidrauličkog stroja postepenim aksijalnim tlačnim naprezanjima na krajevima (slika 45.) Iz ispitivanja zamjećuju se razlike, veći udio TiO₂ u masi betona smanjuje njegovu čvrstoću. [29]



Slika 45. Ispitivanje tlačne čvrstoće [29]

Ispitivanje samoočišćenja

Pri ispitivanju tri uzorka betona , također s postotcima TiO₂ 3, 4 i 5%, ofarbana su rodaminskim bojama, te stavljena pod sunčevu svjetlost u trajanju do 12 dana (slika 46.-48.) [29]



Slika 46. Stanje prije ispitivanja [29]



Slika 47. Uzorci nakon 5 sati [29]



Slika 48. Uzorci nakon 12 sati [29]

Povećanjem količine TiO₂ uspješnije je samoočišćenje.

Ispitivanje apsorpcije dušikovog oksida

Uzorak betona je stavljen u otopinu s dušikovim oksidom te stavljen pod sunčevu svjetlost, promatrana je promjena boje koja predstavlja količinu dušikovog oksida. Već nakon jednog sata uočava se znatna promjena u boji dok nakon 5 sati potpuno pigment nestaje (slike 49.-54.) [29]



Slika 49. Početak ispitivanja [29]



Slika 50. Uzorak nakon 1 sat [29]



Slika 51. Uzorak nakon 2 sata [29]



Slika 52. Uzorak nakon 3 sata [29]



Slika 53. Uzorak nakon 4 sata [29]



Slika 54. Uzorak nakon 5 sati [29]

- Kod svih ispitivanja korišten je običan portland cement tlačne čvrstoće 53 N/mm².

Ljudske aktivnosti putem tvornica i industrija krivac su za veliku količinu zagađenja dušikovim i sumpornim oksidima, hlapljivim organskim spojevima, amonijakom, ugljikovim monoksidom itd. Težnjom očišćenju i recikliranju provedena su ispitivanja poroznog betona s dodatkom TiO₂ i grubog recikliranog agregata. Na kišu i nevrijeme postavljen je u trajanju od 10 minuta. Rezultati su pokazali da zbog većih unutarnjih šupljina dolazi do veće reakcije TiO₂, što upućuje na to da

korištenje grubog recikliranog agregata uvelike pridonosi ekološkom aspektu ali i boljoj fotokatalitičkoj reakciji. Pored poboljšanja u samočišćenju i kvalitetnijem zraku spomenuta vrsta betona ima manu neupotrebljivosti u zatvorenim prostorima radi izbijanja bijelih mrlja po površini uzrokovanih TiO_2 , te visoku početnu cijenu koja ne zadovoljava kriterij ekonomske isplativosti. [2]

Konstrukcije od SHC betona:

- Crkva Jubileja, Rim iz 1996. godine (slika 55.) – sagrađena je od cementa TX Millenium s česticama titanijevog dioksida, agregata od bijelog mramora, te superplastifikatora Mapefluid X404 [30]



Slika 55. Crkva Jubileja, Rim [2]

- Cité de la Musique et des Beaux-Arts, Francuska iz 2001. godine (slika 56.)
- Bolnica Manuel de Gonzalez , Mexico, iz 2013. godine (slika 57.)



Slika 56. Cité de la Musique et des Beaux-Arts, Francuska [2]



Slika 57. Bolnica Manuel de Gonzalez , Mexico [2]

4.4 Beton ojačan grafenom

Grafen, nevjerojatan materijal novog doba, pokreće revoluciju u svijetu 2004. godine preko fizičara Andre Geima i Konstantina Novoselova koji uspijevaju samoljepljivom trakom odvojiti grafen iz grafita, usput osvajajući i Nobelovu nagradu za svoj uspjeh. Iako se tek 2004. godine uspješno dobiva čisti grafen, njegova struktura znana je već početkom 20. stoljeća, međutim bez ulaganja i zapažanja jer ga znanstvenici smatraju bajkom.

Grafen je heksagonalan dvodimenzionalan atom ugljika (slika 58.), danas revolucionaran za sve aspekte života, pa tako i građevinsku industriju. Lagane strukture, s visokom provodljivošću zbog delokaliziranih π -veza ugljikovih atoma, jačine 200 puta veće nego čelik, te u kombinaciji s betonom stvara nove mogućnosti graditeljstva.



Slika 58. Grafen [19]

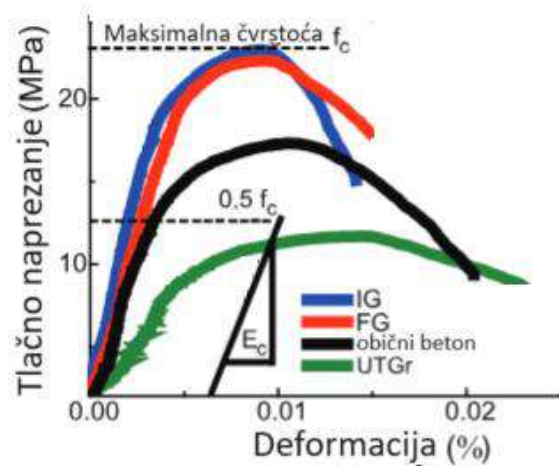
Za građevinski sektor i korištenje grafena u poboljšanju betona primjenjuje se putem odvajanja grafena od grafita u vodi miješalicom s 8000 okretaja u minuti. Za dobivanje betona ojačanog grafenom uparuje se s običnim portland cementom, finim pijeskom i grubim agregatom. Vrste grafena se dijele po broju slojeva ugljika. Prema Ramanovoj spektroskopiji utvrđena je promjena svojstva uz povećanje slojeva ugljika. Od 2 do 7 slojeva čini kvazi-grafen jer se smatra da u toj količini još nema treću dimenziju. Nadalje pojavljuje se u oblicima nano-vrpca i nano-pločica.

U ispitivanju korišteni su:

1. Funkcionalizirani grafen (FG) koji sadrži 4-7 slojeva ugljika

2. Ultratanak grafit (UTGr) veličine 24 nm
3. Industrijske grafenske nano pločice (IG) koje sadrže 10-11 slojeva ugljika, debljine 5-10 nm
4. Obični beton

Napravljena je usporedba svih uzoraka čvrstoće nakon 7 dana (slika 59.) [31]

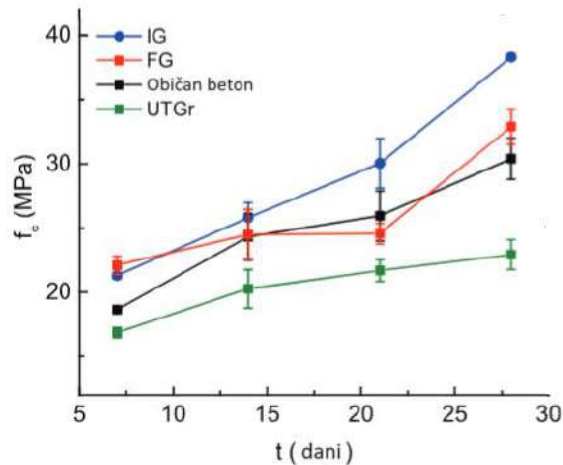


Slika 59. Dijagram napreznja i deformacije [31]

U prvom dijelu grafa do vrijednosti polovice maksimalne čvrstoće je elastično područje, betoni ojačani IG i FG grafenima pokazuju strmije nagibe u odnosu na običan beton i beton s ultratankim grafitom. Odnosno nagib odgovara Youngovom modelu elastičnosti (E_c) koji je mjera krutosti materijala. Rezultat dodavanja industrijskih nano-pločica i funkcionaliziranog grafena je tvrdi beton jačih veza cementa i agregata. Ultratanak grafit nije pokazao pozitivnu promjenu već se zaključuje da čestice grafita 24 nm ometaju pravodobnu hidrataciju i vezanje cementa. [31]

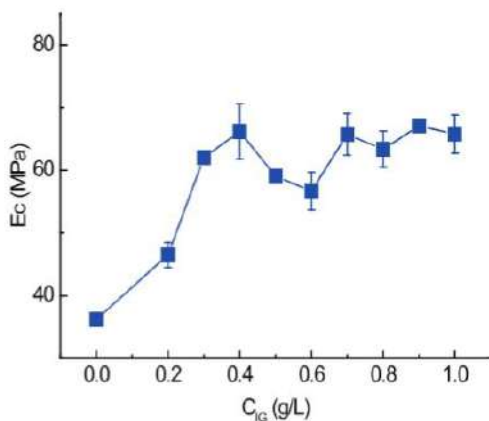
U sljedećem grafu na slici 60. prikazana je promjena čvrstoće u 28 dana.

Poklapa se s podacima prethodnog grafa, te jedino veće odstupanje prikazuje beton ojačan IG grafenom čija se čvrstoća poveća za 18.6% u odnosu na čvrstoću nakon sedmog dana. [31]

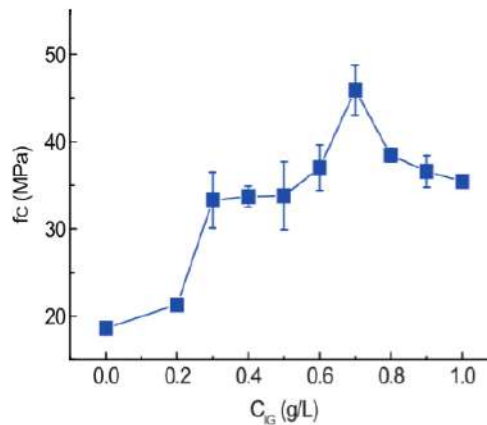


Slika 60. Prikaz čvrstoće u vremenu [31]

Pošto su garfenske nano-pločice pokazale najbolju promjenu svojstva betona, nadalje razmotrit će se najoptimalnija koncentracija nano-pločica u betonu (slika 61. i 62.) [31]



Slika 61. Ispitivanje modula elastičnosti [31]



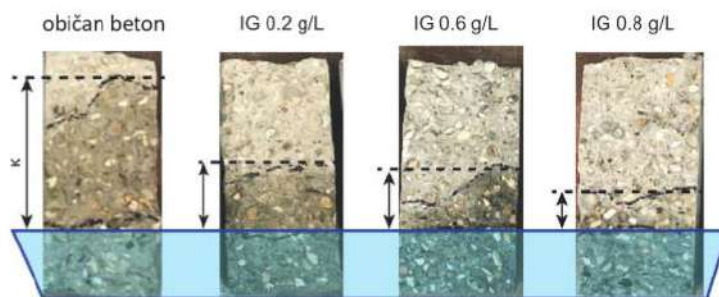
Slika 62. Ispitivanje tlačne čvrstoće [31]

Na slici 61. s grafa ovisnosti modula elastičnosti betona i koncentracije grafena izražene u gramima po litri betona. U slučaju mjerenja modula elastičnosti najoptimalnija količina je 0.4 ili 0.7-1 grama IG grafena, dok za čvrstoću na slici 62. vidimo da je 0.7.

Zaključak: korištenje 0.7 grama grafena betonu pridonosi povećanje modula elastičnosti za 80.5% i tlačne čvrstoće za 146%. [31]

Vrlo važnu ulogu u trajnosti betona ima vodonepropusnost. Za usporedbu s običnim betonom uzeli su se uzorci betona ojačanog IG grafenom različitih koncentracija, te nakon 7 dana njege,

potpuno suhi uronjaju se u vodu gdje provode 7 dana. Crna linija prikazuje količinu vode apsorbiranu u volumen prikazanog uzorka betona (slika 63.). [31]



Slika 63. Ispitivanje vodonepropusnosti [31]

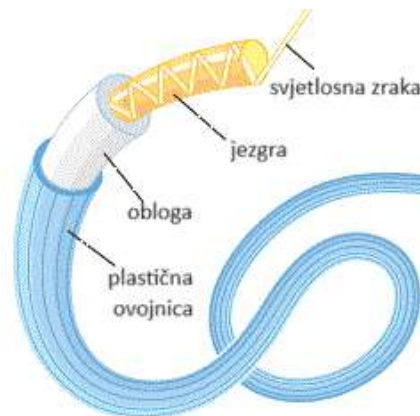
Evidentno je da djeluje kao barijera protiv ulaska vode u materijal. Povećanjem koncentracije grafena do 0.8 g/L, vodonepropusnost se povećava za 400% u usporedbi s običnim betonom. Što bi značilo da grafen ne povećava samo čvrstoću i deformaciju već u betonu tvori gustu strukturu i onemogućuje ulazak vode u pore. Tako direktno smanjuje veliki problem trajnosti, bubrenje betona koje izaziva pucanje i nestabilnost strukture. [31]

Da je ovo tek početak iskorištavanja punog potencijala grafena kao materijala slažu se znanstvenici diljem svijeta. Otkriće materijala s mogućnošću poboljšanja svojstava betona za 30-50% otvara brojna druga vrata. Svojim prednostima čvrstoće, vodootpornosti, električne provodljivosti i lagane tanke strukture spreman je potpuno eliminirati armaturu, te smanjiti uporabu cementa za 50%. Smanjenjem količine cementa direktno pridonosi ekološkom aspektu, odnosno manjoj emisiji CO₂. Sveučilište Cambridge provelo je ispitivanje u kojem se 5% količine cementa zamjeni s grafenom, smanjenje globalnog zatopljenja bilo bi 21%. U pratnji Sveučilište Exter predlaže bi 148 kg/m³ cementa zamijenilo s 125 grama grafena što bi rezultiralo redukciji 446 kg/t emisije CO₂. Što se tiče troškova izgradnje ovaj materijal i tu iznenađuje, ukupne troškove smanjio bi za 10-20%, dok u to ne ulaze smanjeni troškovi održavanja i produljen životni vijek konstrukcija. Prva primjena dogodila se 2021. godine u Velikoj Britaniji pri postavljanju betonske ploče teretane dobitkom 30% čvršće ploče i smanjenjem 30% ukupnog cementa i armature. Rezultati procjena nalažu da tržište grafena tek počinje rasti, te do 2031. godine vrijednost će ići do 700 milijuna dolara. [19]

4.5 Proziran, svjetlopropusni beton

O betonu najčešće razmišljamo kao o krutom, čvrstom i masivnom materijalu koji nije proziran i svjetlopropusan. Trendovi u proizvodnji betona posljednjih godina omogućili su proizvodnju betona s upravo navedenim karakteristikama. Radi se o betonu čiji sastav omogućuje odbijanje svjetla. Kod prozirnog ili svjetlopropusnog betona (engl. LTC, light translucent concrete) sastav se ojačava optičkim vlaknima. Arona Losonczy predstavlja prvu ideju 2001. godine, dok dvije godine kasnije realizira izvedbu prvog bloka pod nazivom „LiTraCon“ sastavljen od 96% betona i 4% optičkih vlakana. [32]

Optička vlakna su tanka, prozirna vlakna uglavnom promjera 125 μm , te služe kao prijenosnici svjetlosti ili valova. Postoji više vrsta, međutim u betonu koriste se plastična zbog bolje mogućnosti savijanja, veće otpornosti i mogućnosti oblikovanja (slika 64.) [33]



Slika 64. Optičko vlakno [34]

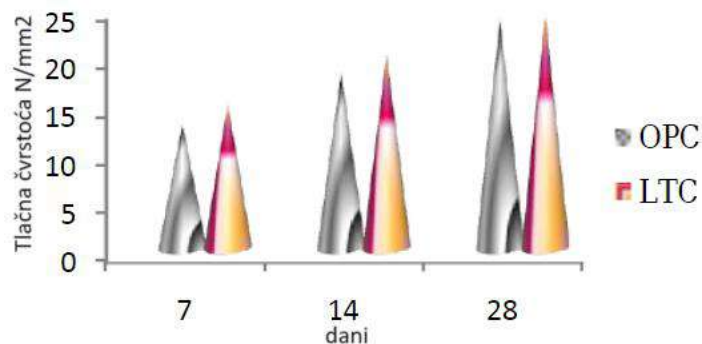
Prvi korak u konstrukciji LTC betona je kalup oblika bloka bez gornje plohe, te 2 bočne suprotne plohe izbušene kako bi se kroz njih provukla optička vlakna (slika 65.), zatim se smjesa betona ulije u kalup. Slijedi njegovanje, te rezanje suvišnih vlakana [35].



Slika 65. Optička vlakna provučena kroz kalup [35]

Omjer betona i vlakana određuje stupanj odbijanja svjetlosti, kao i čvrstoću materijala. Provedeno je ispitivanje standardnog betona i LTC betona s 1% vlakana na tlačnu čvrstoću (slika 66.).

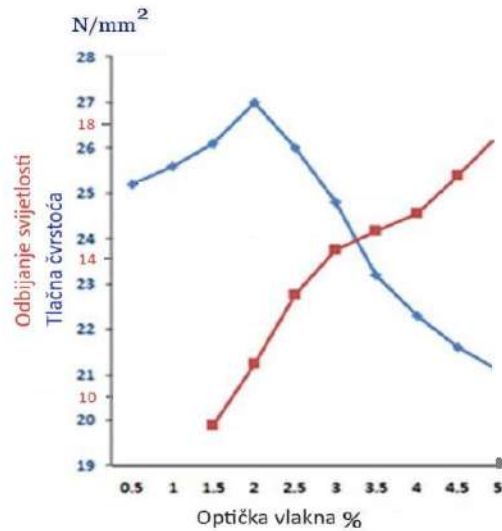
Sastav LTC betona: 360 kg cementa, 560 kg pijeska, 4.5 kg optičkih vlakana i 190 l vode [36]



Slika 66. Ispitivanje tlačne čvrstoće [36]

Proziran beton nije pokazao nikakvu promjenu u tlačnoj čvrstoći u odnosu na obični beton.

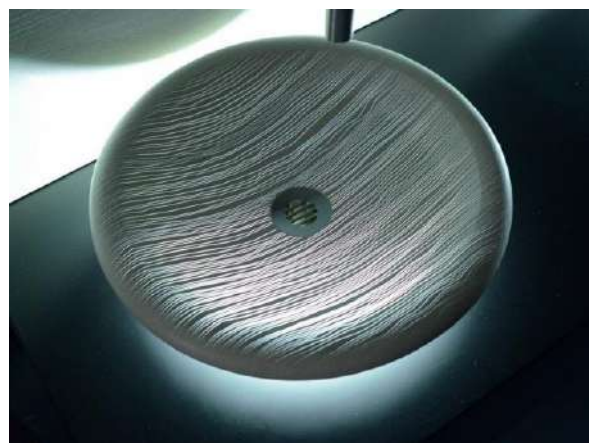
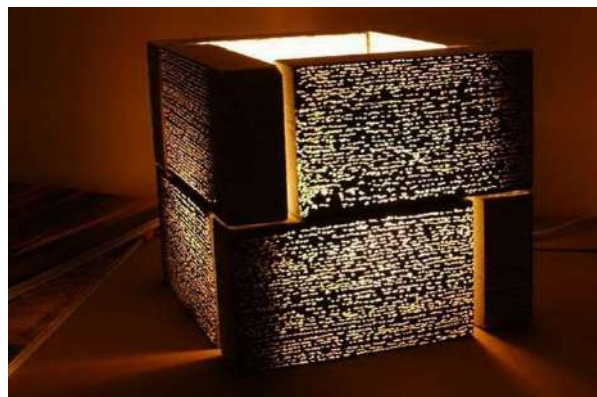
Ovisnost utjecanja na tlačnu čvrstoću povećanjem postotka optičkih vlakana prikazana je na slici 67.. Nacrane su dvije krivulje, plava prikazuje kretanje tlačne čvrstoće povećanjem udjela vlakana, dok crvena odbijanje svjetlosti. Očekivano, povećanjem udjela vlakana raste i odbijanje svjetla, međutim nakon 2 % udjela tlačna čvrstoća betona počinje opadati. [37]



Slika 67. Ispitivanje tlačne čvrstoće i odbijanje svjetlosti [37]

Iako postoji interes za uporabu i daljnji razvitak TLC betona, on je i dalje daleko od punog potencijala ovog materijala u svakodnevnoj primjeni. Glavni problem s kojim se susreću različite korporacije koje rade na razvitku ove tehnologije jest upravo pronalazak savršenog omjera betona i vlakana koje samom betonu omogućavaju ostvarivanje tražene razine čvrstoće. Konkretno, ova tehnologija pokazuje potencijal u optimizaciji potrošnje električne energije, osvijetljavanju prostora radi sposobnosti propuštanja sunčeve svjetlosti što ujedno pomaže i pri energetskej optimizaciji prostora uslijed manjih potreba za grijanjem prostora. Dodatan razlog za popularnost ove tehnologije nalazi se i u njegovom posebnom izgledu koji ga čini korisnim za izradu rasvjetnih tijela kao na primjer prozirnih zidova i unikatno svijetlećih lampi (slike 68. – 72.) [32] [35]

Tekući trendovi u tehnologiji betona



Slike 68.-72. Prozirni beton [42]

Najveća konstrukcija prozirnog betona su Europska vrata dizajnirana 2004. godine prilikom ulaska Mađarske u Eurupsku uniju (slika 73. i 74.).



Slika 73. i 74. Europska vrata, Mađarska [35] [41]

Interesantan beton ima i svoje mane, od visoke cijene do jedine mogućnosti gradnje kao montažnog elementa. Također pri gradnji stambenih kuća ili zgrada treba razraditi činjenicu sigurnosti života, radi prozirnosti koja omogućava konstantan uvid kroz materijal. [35]

5 OSNOVNI ZAKLJUČCI RADA

U ovom radu predstavljena je kronologija razvitka betona kao najrasprostranjenijeg i najvažnijeg građevinskog materijala. Pri razvitku navedenih tehnologija vodilo se računa o više komponenti odnosno kriterija koje pojedine novo-razvijene kategorije moraju poštivati. Prije svega, svaka od navedenih tehnologija uspješno rješava određen problem ili odrađuje određenu zadaću koju ostale tehnologije betona nisu uspjele riješiti. Novonastale tehnologije, ovisno o sastavu, mogu biti: jeftinije, čvršće, duktilnije, savitljivije, produženog životnog vijeka, samoobnovljive, smanjenje potrebe za armaturom, te mogu imati sposobnost samoočišćenja, vodonepropusnosti itd. Uz to, navedene tehnologije imaju i drugi cilj, smanjenje emisija CO₂ u atmosferu kroz ekološki osvještenu proizvodnju navedenih vrsta betona. Jedna od tehnologija opisanih u ovom radu, samočišćujući beton, ovu zadaću obavlja na još direktniji način od ostalih jer posjeduje sposobnost apsorbiranja patogenih čestica u zraku.

Sve navedene tehnologije imaju perspektivnu budućnost u građevini, no svakako razvitak novih tehnologija i dalje je u punom jeku, najčešće motiviran ciljanom većom ekonomskom isplativosti novorazvijenih tehnologija. Ipak, važno je istaknuti da je zelenija proizvodnja građevinskih materijala uistinu postala jedan od osnovnih kriterija na kojem se razvijaju tehnologije budućnosti. Lako je pretpostaviti da će se uslijed sve veće zainteresiranosti javnosti za temu klimatskih promjena te sve veće želje Europske Unije da kroz međunarodne i interne sporazume regulira dopuštene emisije pojedinih industrija, uskoro razviti nove, sve zelenije tehnologije betona. Ukoliko će razvitak takvih tehnologija za rezultat imati žrtvovanje ekonomskog kriterija tj. kriterija jeftinije proizvodnje, biti će zanimljivo vidjeti hoće li se na globalnoj razini stvoriti konsenzus oko standardizacije dopuštenih tehnologija betona s ciljem globalnog smanjenja emisija CO₂ uzrokovanih proizvodnjom građevinskog materijala.

6 LITERATURA

- [1] Azmee, N. M. i Shafiq, N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications, *Science Direct*, 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509518301360> [Posjećeno: 22.8.2023.]
- [2] Topçu, İkler Bekir, i dr. *Self-Cleaning Concretes: An Overview Cement Based Composites*, 2020. https://www.acapublishing.com/dosyalar/baski/CEBACOM_2020_91.pdf, [Posjećeno: 30.8.2023.]
- [3] Prasad, Ajin, *New Bendable Concrete that is Stronger and More Durabl*, *Linked in*, 2018. <https://www.linkedin.com/pulse/new-bendable-concrete-stronger-more-durable-ajin-prasad>, [Posjećeno: 22.8.2023.]
- [4] Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, *Osnove tehnologije betona*, Merlin, 2016. <https://moodle.srce.hr/2020-2021/course/view.php?id=80157> [Posjećeno: 14.8.2023.]
- [5] Gurgurev, Ivan, *Pregled razvoja cementa i betona*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2017. <https://repositorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A825/datastream/PDF/view> [Posjećeno: 14.8.2023.]
- [6] Higgins, Bry, *Experiments and Observations Made With the View of Improving the Art of Composing and Applying Calcareous Cements and of Preparing Quick-Lime*, University of Michigan Library, 2009
- [7] *History of Reinforced Concrete and Structural Design, A Builder's Perspective*, 2011. <https://abuildersperspective.wordpress.com/2011/09/16/structural-concrete-design/>, [Posjećeno: 5.8.2023.]
- [8] Dixon, David, Blake Stonebreaker, Portland Basin Museum. *Geograph*. <https://www.geograph.org.uk/photo/4012343>, [Posjećeno: 14.8.2023.]
- [9] *First concrete street in U.S. celebrates 125 years*, *Concrete construction*, 2016. https://www.concreteconstruction.net/business/producers/first-concrete-street-in-u-s-celebrates-125-years_c, [Posjećeno: 10.8.2023.]
- [10] Thomas Edison's Concrete Houses. *Atlas Obscura*, 2018. <https://www.atlasobscura.com/places/thomas-edisons-concrete-houses>, [Posjećeno: 10.8.2023.]
- [11] Peters, James E., *Assembly Hall*, University of Illinois. *SAH Archipedia*, <https://sah-archipedia.org/buildings/IL-01-019-0009>, [Posjećeno: 12.8.2023.]
- [12] Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, *CN Tower*, *Encyclopedia Britannica*, 2023. <https://www.britannica.com/topic/CN-Tower>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [13] *Water Tower Place*. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, <https://www.skyscrapercenter.com/building/water-tower-place/739> [Posjećeno: 17.9.2023.]

- [14] Martin, Hannah, 17 Striking Concrete Buildings Around the World, *Architectural Digest*, 2016.
- [15] Pires, Kevin i Details.com., *Where the Sidewalk Ends: Stunning Concrete Buildings Around the World*, Condé Nast Traveler, 2015.
- [16] Turk, Zita, *Hidratacija cementa s dodatkom pepela dobivenog od spaljivanja drvene biomase*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2015.
- [17] Main Components of Portland Cement Clinker, Arij Global Trading, <https://arijco.com/main-components-of-portland-cement-clinker/>, [Posjećeno: 14.8.2023.]
- [18] Gibbs, Michael J., Soyka, Peter i Conneely, David, CO₂ Emissions from cement production, The Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_1_Cement_Production.pdf, [Posjećeno: 16.8.2023.]
- [19] Hodge, Stephen, Graphene for the construction sector. Versarien, 2021. https://www.versarien.com/files/5716/3050/8952/White_Paper_-_Graphene_for_the_construction_sector_-_final_version.pdf, [Posjećeno: 15.9.2023.]
- [20] Watts, Jonathan. Concrete: the most destructive material on Earth, *The Guardian*, 2019. <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>, [Posjećeno: 22.8.2023.]
- [21] Li, Victor C. *Engineered Cementitious Composites (ECC)*, Springer, 2019.
- [22] What Are PVA Fibers? Buddy Rhodes Concrete Products, <https://www.buddyrhodes.com/articles-and-faqs/faqs/what-are-pva-fibers> [Posjećeno: 12.9.2023.]
- [23] Fu C, Chen M, Guo R, Qi. Green-Engineered Cementitious Composite Production with High-Strength Synthetic Fiber and Aggregate Replacement. *Materials* (Basel), 2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9099887/>, [Posjećeno: 7.9.2023.]
- [24] Reactive Powder Concrete-Composition and Advantages, *The Constructor*, <https://theconstructor.org/concrete/reactive-powder-concrete-composition-advantages/1266/>, [Posjećeno: 1.9.2023.]
- [25] Amudhavalli, N. K. i Mathew, Jeena. Effect on Silica Fume on Strength and Durability Parameters of Concrete, *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 2012. <https://www.ijeset.com/media/4N5-IJESETO202520.pdf>, [Posjećeno: 1.9.2023.]
- [26] K. Tadros, Maher, Sevenker, Adam i Berry, Rick. Ultra-High-Performance Concrete, *Structure*, <https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2019/03/261904-C-BuildingBlocks-Tadros.pdf>, [Posjećeno: 10.9.2023.]

- [27] Piškorić, Dorotea. Priprema i ispitivanje fotokatalitičke aktivnosti fotokatalizatora aktivnih pod Sunčevim, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2020. <https://repozitorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A1147/datastream/PDF/view>, [Posjećeno: 15.9.2023.]
- [28] Fotokataliza i UV zračenje – Intervju sa stručnjacima, Evomed, <https://evomed.hr/fotokataliza-i-uv-zracenje-intervju-sa-strucnjacima/>, [Posjećeno: 15.9.2023.]
- [29] Dr. S. U., Kannan, i dr. Study on the Properties of Self Cleaning Concrete Using Titanium Dioxide., *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2019. <https://www.ijtsrd.com/engineering/civil-engineering/17016/study-on-the-properties-of-self-cleaning-concrete-using-titanium-dioxide/dr-s-u-kannan>, [Posjećeno: 12.9.2023.]
- [30] Cardellicchio, Luciano. Self-cleaning and colour-preserving efficiency of photocatalytic concrete: case study of the Jubilee Church in Rome. University of Kent, 2018. <https://kar.kent.ac.uk/75528/1/BRI%20-%20final%20version%20-%20VC%20-cardellicchio.pdf>, [Posjećeno: 22.8.2023.]
- [31] Dimov, Dimitar, i dr. *Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications*, Wiley Online Library, 2018. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adfm.201705183>, [Posjećeno: 15.9.2023.]
- [32] McGillivray, Sara. Translucent Concrete: An Emerging Material. *Illumin Magazine*, 2011. <https://illumin.usc.edu/translucent-concrete-an-emerging-material/>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [33] Optical Fiber: Definition, Properties and Uses, *Textile Blog*, 2022. https://www.textileblog.com/optical-fiber-definition-properties-and-uses/?utm_content=cmp-true, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [34] Britannica, T. Editors of Encyclopaedia fiber optics. *Encyclopedia Britannica*, 2022. <https://www.britannica.com/science/fiber-optics>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [35] Bushan, M. N. V. Padma, i dr. Optical Fibres in the Modeling of Translucent Concrete Blocks. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2013. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=233c73d5ecoec82439291990efe65efoc9725e76>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [36] Shanmugavadivu, P. M., i dr. AN EXPERIMENTAL STUDY ON LIGHT TRANSMITTING CONCRETE, *Research Gate*, 2014. https://www.researchgate.net/publication/355170419_AN_EXPERIMENTAL_STUDY_ON_LIGHT_TRANSMITTING_CONCRETE, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [37] Elghezanwy, Dalia i Eltarabily, Sara. A Review of Translucent Concrete as a New Innovative Material in Architecture. *Semantic Scholar*, 2020.

- <https://pdfs.semanticscholar.org/3081/567248eb3526dc4427b3bd51e3525bb6cc7e.pdf>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [38] Twilight of the Mihara bridge. Flickr, 2012. <https://www.flickr.com/photos/javawock/8000569349/>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [39] Handwerk, Brian. Pyramids at Giza, National Geographic, <https://www.nationalgeographic.com/history/article/giza-pyramids>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [40] Popić, Jelica, Povijest Rimskih kupališta, Učilište Lovran, <https://www.uciliste-lovran.hr/povijest-rimskih-kupalista>, [Posjećeno: 10.9.2023.]
- [41] Translucent concrete. Kardashev fandom, https://kardashev.fandom.com/wiki/Translucent_concrete, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [42] Amazing Translucent Concrete Opens a New World of Design Ideas. Home Designing, <https://www.home-designing.com/2015/03/amazing-translucent-concrete-opens-a-new-world-of-design-ideas>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [43] Landmark Tower. Kanpai, 2023. <https://www.kanpai-japan.com/yokohama/landmark-tower>, [Posjećeno: 15.9.2023.]
- [44] Brasor, Philip i Tsubuku, Masako. Roppongi Hills: controversial blueprint for Tokyo's new breed of high-rise – a history of cities in 50 buildings, day 38. The Guardian, 2015. <https://www.theguardian.com/cities/2015/may/18/roppongi-hills-tokyo-controversial-new-high-rise-history-of-cities-50-buildings-day-38>, [Posjećeno: 10.9.2023.]
- [45] Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, Ancient Egyptian architecture, Encyclopedia Britannica, 2023. <https://www.britannica.com/art/Egyptian-architectur>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [46] Britannica, Great Wall of China, Encyclopedia Britannica, 2023. <https://www.britannica.com/topic/Great-Wall-of-China>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [47] Britannica, Appian Way, Encyclopedia Britannica, 2023. <https://www.britannica.com/topic/Appian-Way>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [48] Britannica, Pantheon, Encyclopedia Britannica, 2023. <https://www.britannica.com/topic/Pantheon-building-Rome-Italy>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [49] Britannica, Pont du Gard, Encyclopedia Britannica, 2021. <https://www.britannica.com/topic/Pont-du-Gard>, [Posjećeno: 17.9.2023.]
- [50] Britannica, Hoover Dam, Encyclopedia Britannica, 2023. <https://www.britannica.com/topic/Hoover-Dam>, [Posjećeno: 17.9.2023.]

[51] Britannica, Hoover Dam, Encyclopedia Britannica, 2023. <https://www.britannica.com/topic/Hoover-Dam>, [Posjećeno: 17.9.2023.]

[52] Britannica, Hurricane Katrina, Encyclopedia Britannica, 2023. <https://www.britannica.com/event/Hurricane-Katrina>, [Posjećeno: 17.9.2023.]

[53] The Colosseum: Construction of the World's Largest Amphitheater, The Constructor, <https://theconstructor.org/case-study/colosseum-greece-construction/63548/>, [Posjećeno: 20.9.2023.]