

Primljen / Received: 1.7.2021.

Ispravljen / Corrected: 20.12.2021.

Prihvaćen / Accepted: 15.3.2022.

Dostupno online / Available online: 10.8.2022.

Kritička procjena učinka nanotitanijeva dioksida na svojstva betona

Autori:

Dr.sc. **Garima Rawat**, dipl.ing.građ.Jaypee Sveučilište inženjerstva i tehnologije,
Guna, IndijaOdjel za građevinarstvo
garimaknp07@gmail.com

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Sumit Gandhi**, dipl.ing.građ.Jaypee Sveučilište inženjerstva i tehnologije,
Guna, IndijaOdjel za građevinarstvo
sumit.gandhi@juet.ac.inDoc.dr.sc. **Yogesh Iyer Murthy**, dipl.ing.građ.Jaypee Sveučilište inženjerstva i tehnologije,
Guna, IndijaOdjel za građevinarstvo
yogesh.murthy@juet.ac.in

Prethodno priopćenje

Garima Rawat, Sumit Gandhi, Yogesh Iyer Murthy

Kritička procjena učinka nanotitanijeva dioksida na svojstva betona

Nedavni napredak nanotehnologije u raznim područjima izuzetno je obećavajuće za rješavanje širokog spektra problema. U istraživanjima i izumima se pokazalo da nanotehnologija poboljšava učinkovitost konvencionalnih građevnih materijala kao što je beton. Brojne vrste nanočestica, kao što je nano titanijev dioksid, koriste se za značajno poboljšanje učinkovitosti, dugotrajnosti i održivosti betona. Ovaj rad sažima prethodna istraživanja o učinku nanotitanijeva dioksida na različita svojstva, uključujući toplinu hidratacije, obradivost, vrijeme vezivanja, kemijsko skupljanje, mehaničku čvrstoću, otpornost na abraziju, vatrootpornost i otpornost na smrzavanje/odmrzavanje. Vrijednosti upijanje vode, penetracija klorida i propusnosti su male u konvencionalnim sustavima običnog ili mješovitog cementa. Osim toga, u ovom istraživanju matrica koja sadrži nanotitanijev dioksid uspoređuje se s matricom koja sadrži druge nanočestice. Građevinski inženjeri mogu koristiti ovaj opis kao izvor podataka.

Ključne riječi:

nanomaterijali, trajnost betona, nanotitanijev dioksid, nanotehnologija, propusnost

Research Paper

Garima Rawat, Sumit Gandhi, Yogesh Iyer Murthy

A critical assessment on the effect of nano-titanium dioxide on the properties of concrete

Recent advances in nanotechnology in various fields demonstrate tremendous promise for resolving a wide variety of problems. Nanotechnology has been shown to improve the efficiency of conventional building materials such as concrete. Numerous types of nanoparticles, such as nano-titanium dioxide, are being used to significantly improve the efficiency, longevity, and sustainability of concrete. This paper summarises prior research on the effect of nano-titanium dioxide on a variety of properties, including heat of hydration, workability, setting time, chemical shrinkage, mechanical strength, abrasion resistance, fire resistance, and freeze/thaw resistance. Water absorption, chloride penetration, and permeability are all low in conventional plain or blended cement systems. Additionally, the matrix containing nano-titanium dioxide is compared in this study to a matrix containing other nanoparticles. Civil engineers can use this paper as a quick reference.

Key words:

nanomaterials, concrete durability, nano-titanium dioxide, nanotechnology, permeability

1. Uvod

Proizvodnja, niska cijena, vrhunska svojstva i primjenjivost sve su to obilježja visokokvalitetnog betona. Međutim, ograničenja betona, kao što su mala čvrstoća, osjetljivost na pucanje i iznenadni lom zbog njegove krhke prirode, rezultirala su propadanjem i visokim troškovima popravka. Najveći dio razgradnje događa se u pomorskom okolišu, gdje prisutnost kloridnih i sulfatnih iona narušava trajnost betonskih konstrukcija. Brojni čimbenici, uključujući koncentraciju kloridnih iona, vrstu cementa, alkalnost i temperaturu, utječu na brzinu korozije ugrađene armature. Prema Salmanu i sur. [1], na ponašanje betona utječu njegova trajnost, porozna priroda i otpornost na štetne tvari poput sulfatnih i kloridnih iona. Te tvari smanjuju performanse time što uzrokuju lokalizirani slom pasivnog sloja i koroziju ugrađene čelične armature.

Prema Nazariju i sur. [2], kapilarne pore tvore međusobno povezanu mrežu koja olakšava prodiranje nečistoća u beton. Zrakom zarobljeni i zrakom uvučeni gel i kapilarne pore doprinose prijenosu nečistoća putem difuzije, prožimanja i migracije. Postoji potreba za trajnijom infrastrukturom s niskim troškovima popravka. U tijeku je razvoj novih generacija materijala na bazi cementa kroz ugradnju pomoćnih cementnih materijala kao što su pucolani i nanomaterijali za ublažavanje degradacije strukture. Posljednjih godina došlo je do porasta znanstvenog zanimanja za nanomaterijale zahvaljujući potencijalnim prednostima molekula u nanometarskom rasponu (10^{-9} m). To bi moglo biti zato što nanočestice mogu promijeniti svojstva molekula s predvidljivim veličinama čestica i istim kemijskim sastavom. Prema Nazariju i sur. [3], ugradnja nanomaterijala u uzorke betona privukla je opću pozornost zbog svog potencijala za poboljšanje svojstava trajnosti, mehaničkih svojstava, strukture pora i mikrostrukture materijala na bazi cementa. Wang i sur. [4] ispitivali su učinak nanotitanijeva dioksida primjenjujući različite tehnike, uključivo materijal punila, hidrataciju cementa i paralelno brtvljenje kako bi se formirala C-S-H struktura visoke gustoće.

Franklin i sur. [5] pokazali su sposobnost nanotitanijevog dioksida u pogledu poboljšanja otpornosti betona na fizikalno i kemijsko propadanje, kao i njegovo povoljno djelovanje na tehnička svojstva betona. Prema Joshaghaniju i sur. [6], nanotitanijev dioksid je izazvao široko zanimanje zbog svoje visoke katalitičke aktivnosti, kemijske stabilnosti i niske cijene. To pridonosi poboljšanju mehaničkih, reoloških svojstava i svojstva trajnosti materijala na bazi cementa.

2. Teorija i rasprava

2.1. Obradivost i vrijeme vezivanja

Salemi i sur. [7] otkrili su da dodavanje 2% nanotitanijeva dioksida u beton smanjuje njegovu obradivost. Za usporedbu, slijeganje za ispitnu mješavinu bilo je 60 mm, a za kontrolnu mješavinu 120 mm. Nazari i sur. [8] istraživali su obradivost betona s dodanim

nanotitanijevim dioksidom u količini od 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 % masene zamjene cementa. Uočeno je smanjenje obradivosti kako se povećava postotak dodanog nanotitanijeva dioksida. Li i sur. [9] također su izvijestili o smanjenju obradivosti betonskih mješavina kao rezultat djelomične zamjene nanotitanijevim dioksidom u količini od 0 %, 1 % i 3 %. Li i sur. [10] i Li [11] izmjerili su vrijednosti slijeganja betona modificiranog nanotitanijevim dioksidom s 0 %, 1 %, 3 % i 5 % mase. Rezultati su pokazali smanjenje vrijednosti slijeganja od 54,54 % dodavanjem 1 % ili 3 % nanotitanijeva dioksida i smanjenje slijeganja za 72,75 % s dodavanjem 5 % nanotitanijeva dioksida. U tablici 1 prikazana je vrijednost slijeganja koju su dobili različiti autori kada se koristi nano TiO_2 .

Tablica 1. Slijeganje betona s umiješanim nanotitanijevim dioksidom

Autori	Slijeganje [cm]		
	0 % TiO_2	1 % TiO_2	2 % TiO_2
Nazari i sur. [1]	8,52	6	2,98
Nazari i sur. [2]	8	5,3	2,2
Sorathiya i sur. [3]	7,2	4,25	2,6

Mostafa i sur. [13] otkrili su da dodavanje nanotitanijevog dioksida samozbijajućim betonskim mješavinama u omjerima od 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % mase smanjuje rasprostiranje slijeganja. Jalal i sur. [14] pokušali su odrediti i svojstva samozbijajućeg betona visoke čvrstoće pomiješanog s nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % mase. Rezultat je pokazao smanjenje obradivosti zbog dodavanja nanotitanijeva dioksida u mješavinu. Dodatno je zabilježeno smanjenje promjera slijeganja za 1,25 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % i 8,75 %.

Senff i sur. [15] analizirali su reološka svojstva i svojstva rasprostiranja mješavina morta koje sadrže nanotitanijev dioksid u koncentracijama od 0 %, 1,30 %, 2,60 % i 5,20 % mase i otkrili su povećanje vrijednosti momenta i graničnog naprezanja. Te su vrijednosti rasle proporcionalno s povećavanjem nanosadržaja.

Chen i sur. [17] razmatrali su dvije vrste nanotitanijevog dioksida, P25 (75 % anataza, 25 % rutila) i anataza (99 % anataza). Istraživali su početno i završno vrijeme vezivanja betona koji je sadržavao nanotitanijev dioksid u koncentracijama od 0 %, 5 % i 10 % mase. Rezultati su pokazali da se paste s većim udjelom nanotitanijeva dioksida brže vežu. Lee [18] je izmjerio početno i završno vrijeme vezivanja betonskih mješavina s nanotitanijevim dioksidom pri 0 %, 5 % i 10 % mase cementa i otkrio značajno smanjenje početnog i završnog vremena vezivanja. Nazari i sur. [2] izvijestili su o istom rezultatu za zamjenu nanotitanijeva dioksida u 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 % mase. Essawy i Abd Elhaleem [19] izvijestili su da dodavanje 5 %, 7 % ili 10 % nanotitanijeva dioksida cementu otpornom na sulfate skraćuje vrijeme vezivanja. Početno i završno vrijeme vezivanja betona s nano mješavinom prikazano je u tablicama 2. i 3.

Tablica 2. Vrijeme početka vezanja mješavine betona i nanotitanijeva dioksida

Autori	Vrijeme početka vezivanja [min]				
	0 % TiO ₂	0,5 % TiO ₂	1 % TiO ₂	1,5 % TiO ₂	2 % TiO ₂
Nazari i sur. [1]	225,36	171,53	145,98	119,52	104,92
Nazari i sur. [4]	225,1	170,12	145,22	119,29	105,8
Khataee i sur. [5]	160	152	141	134	120

Tablica 3. Vrijeme završetka vezanja mješavine betona i nanotitanijeva dioksida

Autori	Vrijeme kraja vezivanja [min]				
	0 % TiO ₂	0,5 % TiO ₂	1 % TiO ₂	1,5 % TiO ₂	2 % TiO ₂
Nazari i sur. [1]	335,74	261,85	252,77	221,66	207,4
Nazari i sur. [4]	335,65	262,5	251,02	220,9	206,5
Khataee i sur. [5]	270	268	257	249	240

Na temelju prethodne analize literature zaključuje se da se obradivost mješavine smanjuje s dodavanjem nanotitanijeva dioksida. To bi se moglo objasniti činjenicom da je za vlaženje čestica cementa potrebno više vode zbog povećane površine čestica nanotitanijeva dioksida [8]. Smanjena obradivost betona jedan je od nedostataka dodavanja nanotitanijevog dioksida zbog čega bi inženjeri mogli ograničiti njegovu široku upotrebu. Dodavanje čestica nanotitanijeva dioksida rezultiralo je skraćanjem vremena početka vezanja mješavine. To je zato što ugrađivanje čestica nanotitanijeva dioksida rezultira brzym potrošnjom slobodne vode, a to ubrzava proces vezivanja. Kao rezultat ovog povećanja viskoznosti, stvrdnjavanje se javlja ranije [17]. Osim toga, kraće vrijeme vezanja je zbog velike površine nanotitanijeva dioksida, što povećava dostupnost mjesta nukleacije, a to rezultira većom brzinom hidratacije [18]. Smanjenje vremena vezivanja uzrokovano nanotitanijevim dioksidom ovisi o primjeni.

2.2. Upijanje vode

Salemi i sur. [7] utvrdili su da dodavanje 2 % nanotitanijeva dioksida smanjuje upijanje vode za otprilike 22 % nakon 28 dana. Nazari [20] je istraživao modificirani beton u 7., 28. i 90. dana koristeći nanotitanijev dioksid u koncentracijama od 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 % mase cementa. Rezultat pokazuje da dodavanje nanotitanijeva dioksida smanjuje upijanje vode, brzinu upijanja vode i koeficijent apsorpcije vode. Upijanje vode smanjeno je za 59,1 %, 54,1 %, 51,1 % i 47,5 % za uzorke njegovane u vodi. Upijanje vode smanjeno je za 73,73 %, 71,45 %, 68,65 %, odnosno 65,85 %, za uzorke njegovane u zasićenoj vapnenoj vodi. Međutim, utvrđeno je da je optimalni udio zamjene 0,5 %. Uzorci njegovani u vapnenoj vodi imali su

značajno niže vrijednosti upijanje vode i manju brzinu upijanja vode od uzoraka njegovani vodom.

Soleymani [21] istraživao je postotak vode koju upijaju betoni koji sadrže nanotitanijev dioksid u koncentracijama od 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 % mase cementa. Sedmog dana, postotak upijene vode povećan je dodatkom nanotitanijeva dioksida, a kod 28.-og i 90.-og dana starosti betona postotak upijene vode smanjio se u svim uvjetima njegovanja. Uzorci njegovani u zasićenoj vapnenoj vodi upili su manje vode od onih njegovanih u vodi. Nakon 28. dana smanjenje je bilo 59,11 %, 54,11 %, 51,1 %, odnosno 47,5 % za uzorke njegovane u vodi. Nakon 28. dana smanjenje je iznosilo 73,73 %, 71,45 %, 68,65 %, odnosno 65,85 % za uzorke njegovane u zasićenoj vapnenoj vodi. Kod uzoraka s 0,5 % nanotitanijeva dioksida pojavio se najniži postotak upijanja vode. Postotak vode koju upije miješani beton prikazan je u tablici 4.

Tablica 4. Postotak upijanja vode betona s dodanim nanotitanijevim dioksidom

Autori	Postotak starosti upijanja vode		
	0 % TiO ₂	1 % TiO ₂	2 % TiO ₂
Nazari i sur. [8]	9,14	6,59	6,14
Nazari i sur. [1]	5,6	2,57	2,94
Nazari [9]	4,8	1,12	1,63
Jalal [10]	5,12	4,93	4,68

Mostafa [13] istraživao je upijanje vode i kapilarno upijanje u samozbijajućim betonima koji sadrže nanotitanijev dioksid u koncentracijama od 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % mase nakon 14 dana. Rezultati su pokazali da nanotitanijev dioksid smanjuje kapilarno upijanje i upijanje vode. Optimalni udio nanotitanijeva dioksida pokazuje najnižu vrijednost upijanja vode ili kapilarnog upijanja, koja je iznosila 4 %. Jalal i sur. [14] istraživali su postotak upijanja vode i kapilarnog upijanja vode u samozbijajućim betonima visoke čvrstoće modificiranim s nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % mase cementa nakon 90 dana. Rezultati su pokazali da je smanjena i brzina upijanja vode i kapilarnog upijanja vode. Za koncentracije nanotitanijeva dioksida veće od 4 % uočen je najniži postotak upijanja vode i kapilarnog upijanja vode.

Nazari i Riahi [22-24] istraživali su udio upijene vode u samozbijajućim betonima modificiranim nanotitanijevim dioksidom s 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % mase cementa u starosti od 2, 7 i 28 dana. Nakon 7 i 28 dana, postotak upijene vode se smanjio. Najniži postotak upijanja vode uočen je kada je bilo dodano 4 % nanotitanijeva dioksida. S druge strane, s nanotitanijevim dioksidom, postotak upijene vode povećao se nakon tri dana. Jalal [25] je istraživao postotak upijene vode u betonima koji sadrže 45 % zgyure nakon 7, 28 i 90 dana. Vezivni materijali su ugrađeni s nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 1 %, 2 %, 3 % i 4 % mase. Rezultati su pokazali da nanotitanijev dioksid značajno smanjuje postotak

upijene vode u svim starostima ispitanih uzoraka. Nakon 28 dana, postotak upijene vode smanjen je za 38,42 %, 41,35 %, 45,75 %, odnosno 43,4 %. Udio nanotitanijeva dioksida koji je rezultirao najnižim postotkom upijanja vode bio je 3 %. Shekari i Razzaghi [26] istraživali su postotak vode koju upiju betoni koji sadrže 15 % metakaolina modificiranog s nanotitanijevim dioksidom nakon 28 dana. Nanotitanijev dioksid korišten je u koncentraciji od 1,5 % u cementu, što je rezultiralo smanjenjem upijanja vode za 75,74 %.

Iz navedenog sažetka literature jasno je da nanotitanijev dioksid u većini slučajeva značajno smanjuje postotak upijanja vode. Ipak, povremeno ubrzava brzinu upijanja vode u betonu. Smanjenje postotka upijanja vode može se pripisati pucolanskom učinku i učinku punila čestica nanotitanijevog dioksida [20]. Prema nekim studijama [20, 22], najniži postotak upijanja vode je kod 0,5 % nanotitanijeva dioksida, a druge [13, 14, 25, 27] navode vrijednost od 4 %. Uz 5 % silikatne prašine, optimalni udio nanotitanijeva dioksida je 2 % [28]. Dakle, optimalni raspon nanotitanijeva dioksida varira ovisno o uvjetima njegovanja, dobi hidratacije, veličini i vrsti čestica nanotitanijeva dioksida, omjeru vode i veziva te količini pucolana korištenog umjesto cementa.

2.3. Poroznost

Basalts i sur. [29] otkrili su da zamjena cementa s 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % nanotitanijeva dioksida smanjuje propusnost betona. Najmanja propusnost uočena je nakon dodavanja 4 % nanotitanijeva dioksida. Chen i sur. [17] ispitili su poroznost pasta modificiranih s nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 5 % i 10 % mase cementa u starosti od 3., 7. i 28. dana. Vidljivo je jasno smanjenje poroznosti u svim starostima pasta nakon dodavanja nanotitanijevog dioksida. Poroznost uzoraka koji sadrže 5 % i 10 % P25 smanjila se za 11,68 %, odnosno 14,65 % nakon 28 dana, a u uzorcima s 5 % i 10 % anataze smanjila se za 21,36 % odnosno 21,65 %. Međutim, pokazalo se da nanočestice djeluju kao učinkovita punila. Kako su se konglomerati koji sadrže nanočestice širili, prazni prostor oko njih postupno se popunjavao. Zbog prisutnosti ovih "jezgri", brzina hidratacije se značajno povećala. Kao rezultat toga, smanjena poroznost uzrokovana nakupljenom hidratacijom brzo se proširila prema van u pore ispunjene vodom. Essawy i Abd Elhaleem [19] otkrili su da cement otporan na sulfate pomiješan mikrosilikom, modificiran s 5 % nanotitanijeva dioksida rezultira smanjenom poroznošću, a sa 7 % i 10 % nanotitanijeva dioksida to se ne događa. Mohammadi i dr. [30] otkrili su da dodavanje 2,5 %, 5 % ili 10 % nanotitanijeva dioksida u kalcijev fosfatnom cementu smanjuje ukupnu poroznost. Utjecaj na poroznost zamjene cementa koji su predložili različiti autori prikazan je u tablici 5.

Nazari i Riahi [22, 24] ispitivali su poroznost betona s različitim količinama zgure nakon 90 dana. Vezivni materijali su djelomično zamijenjeni nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 1 %, 2 %, 3 % i 4 % mase. Rezultati su pokazali da dodavanje nanotitanijeva dioksida smanjuje poroznost uzoraka. Najmanja

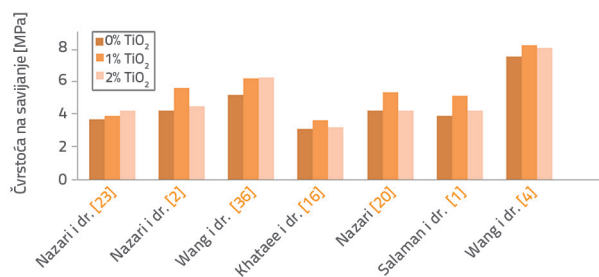
poroznost uočena je pri udjelu nanotitanijeva dioksida od 3 %. Uz dodavanje 1 %, 2 %, 3 % i 4 % nanotitanijeva dioksida, poroznost je smanjena za 1,64 %, 4,3 %, 5,67 %, odnosno 5,07 %.

Tablica 5. Postotak starosti (dani) poroznosti betona pomiješanog s nanotitanijevim dioksidom

Autori	Poroznost [%]	
	0 % TiO ₂	5 % TiO ₂
Chen i sur. [11]	22,92	21,63
Lee [12]	47,41	41,12
Nazari i sur. [8]	45,7	32,95
Teixeira i sur. [13]	35,09	36,64
Nazari [9]	49,95	43,5
Li i sur. [14]	15,6	13,3

2.4. Mehanička svojstva

Prema Li i sur. [34], dodavanjem 1 % nanotitanijeva dioksida masi cementa povećala je tlačnu čvrstoću betonske mješavine za približno 36 %. Nazari [22] i Soleymani [21] istraživali su čvrstoću na savijanje betona modificiranog s nanotitanijevim dioksidom u dobi od 7, 28 i 90 dana. Cement je zamijenjen nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 % mase. Neki primjerci su njegovani u vodi, a drugi u vapnenoj vodi. Rezultati su pokazali da je dodavanje nanotitanijeva dioksida povećalo čvrstoću na savijanje u svim ispitanim starostima (slika 1.). Povećanje čvrstoće na savijanje nakon 28 dana bilo je 13,64 %, 20,45 %, 15,91 %, odnosno 11,36 %, kod njegovanja u vodi. Povećanje čvrstoće na savijanje za uzorke njegovane u vapnenoj vodi iznosilo je 36,58 %, 48,78 %, 56,1 %, odnosno 65,85 %.

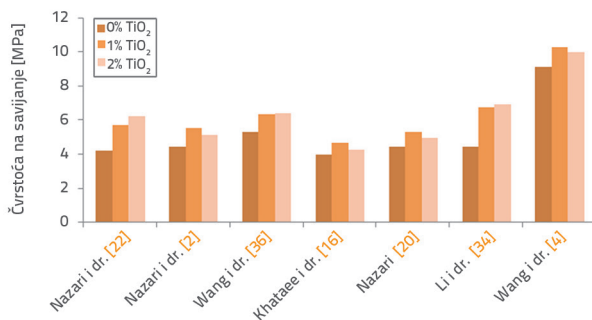


Slika 1. Djelovanje nanotitanijeva dioksida na obični i mješoviti beton, čvrstoća na savijanje nakon 7 dana

Čvrstoća na savijanje bila je veća u uzorcima njegovanim u zasićenoj vapnenoj vodi nego u uzorcima njegovanim u vodi. Dodavanje 1 % nanotitanijeva dioksida rezultiralo je najvećom čvrstoćom na savijanje u vodi, a dodavanje 2 % nanotitanijeva dioksida rezultiralo je najvećom čvrstoćom na savijanje uzorka njegovanog u vapnenoj vodi. Soleymani [21] istraživao je tlačnu čvrstoću betona u starosti 7, 28 i 90 dana koji je modificiran nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 0,5 %, 1

%, 1,5 % i 2 % mase. Rezultat pokazuje da nanotitanijev dioksid povećava tlačnu čvrstoću u svim uvjetima njegovanja. Povećanje tlačne čvrstoće nakon 28 dana iznosilo je 13,86 %, 17,93 %, 15,49 %, odnosno 6,79 % [36]. Povećanje čvrstoće za uzorke njegovane u vapnenoj vodi iznosilo je 21,47 %, 29,1 %, 35,88 %, odnosno 40,96 %. Tlačna čvrstoća bila je veća u uzorcima njegovanim u vapnenoj vodi nego u uzorcima njegovanim u vodi. Dodavanje 1 % nanotitanijeva dioksida rezultiralo je najvećom tlačnom čvrstoćom za uzorke njegovane u vodi, ali dodavanje 2 % rezultiralo je najvećom tlačnom čvrstoćom za uzorke njegovane u vapnenoj vodi. Soleymani [21] uočio je slične rezultate vlačne čvrstoće cijepanjem.

Nazari i sur. [22] ispitivali su vlačnu i čvrstoću na savijanje cijepanjem između 7, 28 i 90 dana. Nanotitanijev dioksid je dodan u beton u koncentracijama od 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 % mase. U svim starostima, rezultati su pokazali da modifikacija nanotitanijevim dioksidom povećava i vlačnu čvrstoću na cijepanje i čvrstoću na savijanje. Povećanje čvrstoće na savijanje nakon 28 dana iznosilo je 15,91 %, 25 %, 22,73 %, odnosno 15,91 %, a povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem nakon 28 dana bilo je 44,44 %, 66,6 %, 50 % i 5,55 %. Nazari i sur. [8] istraživali su tlačnu čvrstoću istih prethodnih mješavina s dodatkom 0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 % nanotitanijeva dioksida. Tlačna čvrstoća porasla je za 13,86 %, 17,93 %, 15,49 %, odnosno 6,79 % nakon 28 dana. Salemi i sur. [7] izvjestili su o povećanju tlačne čvrstoće betona kada je dodano 2 % nanotitanijeva dioksida. Tlačna čvrstoća porasla je za 13,86 %, 17,93 %, 15,49 % i 6,79 % nakon 28 dana. Salemi i sur. [7] izvjestili su o povećanju tlačne čvrstoće betona kada je dodano 2 % nanotitanijeva dioksida. Tlačna čvrstoća porasla je za 12 %, 22,71 % i 27 % u starosti od 7, 28 i 120 dana. Jayapalan i sur. [40] ispitivali su čvrstoću na savijanje betona nakon 28 dana. Cement je zamijenjen nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 1 % i 3 % mase cementa. Kao što je prikazano na slici 2., rezultati pokazuju povećanje čvrstoće na savijanje kada se koristi nanotitanijev dioksid.



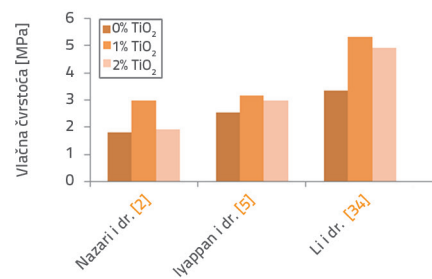
Slika 2. Djelovanje nanotitanijeva dioksida na obični i mješoviti beton, čvrstoća na savijanje nakon 28 dana

Dodavanje 1 % nanotitanijeva dioksida rezultiralo je većom čvrstoćom na savijanje nego dodavanje 3 % nanotitanijeva dioksida, s povećanjem od 10,27 % odnosno 2,93 %. Dodavanje

1 % nanotitanijeva dioksida pokazalo je optimalno ponašanje pri zamoru uslijed savijanja.

Tlačnu i čvrstoću na savijanje betona nakon 28 dana istraživali su Li i sur. [10] te Zhang i Li [11]. Cement je zamijenjen s nanotitanijevim dioksidom u masenim udjelima od 0 %, 1 %, 3 % i 5 %. Rezultati su pokazali da je dodavanje nanotitanijeva dioksida povećalo tlačnu čvrstoću. Tlačna i čvrstoća na savijanje najveće su kada se doda 1 % nanotitanijeva dioksida. Tlačna čvrstoća povećana je za 18,03 %, 12,76 %, odnosno 1,55 %. Dodavanje 1 % i 3 % nanotitanijeva dioksida povećalo je čvrstoću na savijanje za 10,28 % odnosno 3,04 %, a dodavanje 5 % nanotitanijeva dioksida smanjilo je za 3,27 %.

Nazari i Riahi [23] istraživali su tlačnu čvrstoću, čvrstoću na cijepanje i čvrstoću na savijanje samozbijajućeg betona pomiješanog s nanotitanijevim dioksidom starosti uzoraka 2, 7 i 28 dana. Cement je djelomično zamijenjen s 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % mase. Rezultati su pokazali da je dodatak nanotitanijeva dioksida povećao sve čvrstoće. Tlačna čvrstoća porasla je za 11,39 %, 21,2 %, 40,82 %, 58,54 % i 54,1 % nakon 28 dana. Jalal i sur. [14] istraživali su vlačnu čvrstoću cijepanjem i čvrstoću na savijanje samozbijajućeg betona visoke čvrstoće promijenjenog nanotitanijevim dioksidom nakon 7, 28 i 90 dana. Cement je zamijenjen nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % mase. Kao što je prikazano na slici 3., rezultati pokazuju povećanje svih čvrstoća kada se koristi nanotitanijev dioksid.

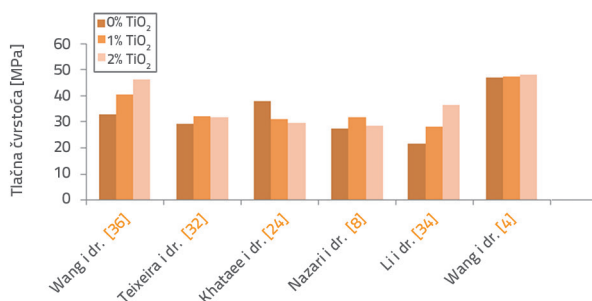


Slika 3. Djelovanje nanotitanijeva dioksida na obični i mješoviti beton, vlačna čvrstoća nakon 28 dana

Najveće vlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje postignute su dodavanjem 4 % nanotitanijeva dioksida. Povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem nakon 28 dana bilo je otprilike 8,8 %, 18,61 %, 27,78 %, 36,67 % i 30 %, a povećanje čvrstoće na savijanje nakon 28 dana bilo je približno 10,58 %, 21,75 %, 29,4 %, 44,67 % i 36,46 %. Senff i sur. [27] primijetili su blagi porast tlačne čvrstoće morta kada je dodano 5 % nanotitanijeva dioksida. S druge strane, Basalts i sur. [30] otkrili su da nanotitanijev dioksid smanjuje tlačnu čvrstoću betona. Tlačna čvrstoća smanjena je 20,73 %, 27,17 %, 14 %, 15,97 %, odnosno 26,3 %, kod dodavanja 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % nanotitanijeva dioksida.

Chen i sur. [17] istraživali su tlačnu čvrstoću mortova modificiranih s dvije vrste nanotitanijeva dioksida, P25 (75 % anataze i 25 % rutila) i anataza (99 % anataza). Cementu je

dodan nanotitanijev dioksid u koncentracijama od 0 %, 5 % i 10 % mase. Rezultati su pokazali da dodavanje nanotitanijeva dioksida povećava tlačnu čvrstoću u svim starostima. Lee [18] je istraživao tlačnu čvrstoću pasta modificiranih nanotitanijevim dioksidom u dobi od 1, 3, 7, 14 i 28 dana. Cement je pomiješan s nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 5 % i 10 % mase. Rezultati su pokazali da je dodavanje 5 % nanotitanijeva dioksida povećalo tlačnu čvrstoću nakon 1, 3 i 7 dana, ali ju je smanjilo nakon 28 dana. Dodavanjem 10 % nanotitanijeva dioksida, tlačna čvrstoća je povećana nakon 1 i 7 dana, ali je tlačna čvrstoća smanjena u ostalim starostima. Mohammadi i sur. [30] otkrili su da dodavanje 5 % i 10 % nanotitanijeva dioksida kalcijevom fosfatnom cementu povećava tlačnu čvrstoću. Meng i sur. [38] ispitili su tlačnu čvrstoću mortova koji sadrže nanotitanijev dioksid u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana. Cement je zamijenjen nanotitanijevim dioksidom u koncentracijama od 0 %, 5 % i 10 % mase. S povećanjem količine nanotitanijeva dioksida dolazi do povećanja rane čvrstoće i smanjenja čvrstoće u kasnijim starostima, slika 4.

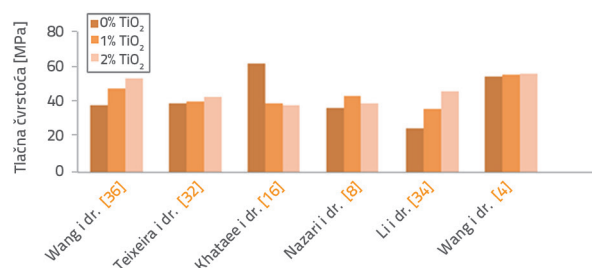


Slika 4. Djelovanje nanotitanijeva dioksida na obični i mješoviti beton, tlačna čvrstoća nakon 7 dana

Dodavanje 5 % i 10 % nanotitanijeva dioksida rezultiralo je povećanjem jednodnevne tlačne čvrstoće za 46 %, odnosno 47 %. Istovremeno, nanotitanijev dioksid na 5 % i 10 % smanjuje 28-dnevnu tlačnu čvrstoću kao što je vidljivo na slici 5. Nazari i Riahi [22, 24] ispitili su čvrstoću na savijanje betona koji sadrži različite količine zgre i djelomično zamijenjen nanotitanijevim dioksidom u 0 %, 1 %, 2 %, 3 % i 4 % mase u starosti od 7, 28 i 90 dana. Rezultati su pokazali da nanotitanijev dioksid povećava čvrstoću na savijanje nakon 7, 28 i 90 dana. Dodavanje 3 % nanotitanijeva dioksida rezultiralo je najvećom čvrstoćom na savijanje u svim starostima. U starosti od 28 dana, povećanje čvrstoće na savijanje dodavanjem 1 %, 2 %, 3 % i 4 % nanotitanijeva dioksida bilo je 5,56 %, 14,81 %, 27,78 %, odnosno 16,67 %. Nazari i Riahi [24, 39] istraživali su tlačnu čvrstoću i vlačnu čvrstoću na cijepanje istih prethodnih mješavina koje sadrže 1 %, 2 %, 3 % i 4 % nanotitanijeva dioksida.

Kao što je prikazano, dodavanje nanotitanijevog dioksida poboljšava čvrstoću. Povećanje čvrstoće uočeno dodavanjem nanotitanijeva dioksida može biti rezultat visoke reaktivnosti nanotitanijeva dioksida, što rezultira brzom potrošnjom kristalnog Ca(OH)₂, koji se brzo stvara tijekom ranih faza

hidratacije cementa. Kao rezultat toga, razvijaju se veće količine ubrzane hidratacije cementa i produkata reakcije [24]. Zbog prisutnosti nano čestica, gustoća pakiranja čestica miješanih čestica cementa se obnavlja, što rezultira smanjenjem volumena većih pora u cementnoj pasti i usmjeravanjem stvaranja kompaktnih produkata hidratacije [24].



Slika 5. Djelovanje nanotitanijeva dioksida na obični i mješoviti beton, tlačna čvrstoća nakon 28 dana

Prema nekim zapažanjima [17], nanotitanijev dioksid povećava mehaničku čvrstoću. Ipak, stopa povećanja čvrstoće bila je veća u ranijim starostima nego u kasnijim uzoraka koji su djelomično zamijenjeni nanotitanijevim dioksidom. To bi moglo biti zato što nanočestice imaju sporiju reakciju hidratacije C₂S, a to pridonosi njihovim dugotrajnim svojstvima. Nanotitanijev dioksid može utjecati samo na rane faze hidratacije (C₃A i C₃S), dok većina hidrata cementne paste može biti nepromijenjena [40]. To znači da uvjeti njegovanja, vrijeme njegovanja, omjer voda/vezivo, vrsta i količina cementnog materijala utječu na optimalni udio nanotitanijeva dioksida u matrici.

3. Zaključak

Ovaj pregledni rad sažima prijašnja istraživanja o učinku nanotitanijeva dioksida na nekoliko svojstava običnih ili mješovitih cementnih sustava (obradivost, vrijeme vezanja, mehanička čvrstoća, upijanje vode i poroznost). Stoga se pregled zasniva na sljedećim ključnim nalazima:

- Povećanjem udjela nanotitanijeva dioksida u cementnom sustavu, smanjuje se obradivost, protočnost, početno vrijeme vezivanja i kraj vremena vezivanja.
- Općenito, dodavanje nanotitanijeva dioksida poboljšava mehanička svojstva materijala do određene granice. Optimalna količina ovisi o nizu čimbenika, uključujući omjer mase/volumena, uvjete njegovanja, vrijeme njegovanja, vrste pucolana, količinu pucolana, kemijski dodatak i veličinu nanočestica [41]. Međutim, čini se da je količina 1-4 % nanotitanijeva dioksida u betonu prikladna, što upućuje na poželjnu čvrstoću [42].
- Dodavanjem nanotitanijeva dioksida u matricu, s vremenom postotak upijanja vode i propusnosti se smanjuje, ali se upijanje vode povremeno povećava u ranim starostima. Većina istraživanja utvrdila je da je optimalni udio 4 %, ali nekoliko drugih je pokazalo da su 0,5 %, 1 %, 2 % i 3 % također prihvatljivi optimalni udjeli za smanjeno upijanje vode.

LITERATURA

- [1] Salman, M.M., Eweed, K.M., Hameed, A.M.: Influence of partial replacement TiO₂ nanoparticles on the compressive and flexural strength of ordinary cement mortar, *Engineering Journal*, 19 (2016) 2, pp. 265–270
- [2] Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S.F., Khademno, A.: Improvement of the mechanical properties of the cementitious composite by using TiO₂ nanoparticles, *J. Am. Sci.*, 6 (2010) 4, pp. 98–101
- [3] Nazari, A., Riahi, S.: The effects of TiO₂ nanoparticles on properties of binary blended concrete, *J. Compos. Mater.*, 45 (2011) 11, pp. 1181–1188, <https://doi.org/10.1177/0021998310378910>
- [4] Wang, L., Zhang, H., Gao, Y.: Effect of TiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of cement at low temperatures, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, (2018), <https://doi.org/10.1155/2018/8934689>
- [5] Franklin, F., et.al.: Replacement of Cement by using Nano Titanium Dioxide in Concrete, *IJSRD-International J. Sci. Res. Dev.*, 5 (2017) 7, pp. 2321
- [6] Joshaghani, A.: Evaluating the effects titanium dioxide on resistance of cement mortar against combined chloride and sulfate attack, *Struct. Concr.*, 19 (2018) 5, pp. 1318–1327, <https://doi.org/10.1002/suco.201800002>
- [7] Salemi, N.: Effect of nanoparticles on frost durability of concrete, *Asian Journal of Civil Engineering*, 15 (2014) 3, pp. 411–420
- [8] Nazari, A., Riahi, S., Shamekhi, S.F., Khademno, A.: Assessment of the effects of the cement paste composite in presence of TiO₂ nanoparticles, *J. Am. Sci.*, 6 (2010) 4, pp. 43–46
- [9] Li, H., Hua Zhang, M., Ping Ou, J.: Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement, *Int. J. Fatigue*, 29 (2007) 7, pp. 1292–1301, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.10.004>
- [10] Li, H., Hua Zhang, M., Ping Ou, J.: Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement, *Wear*, 260 (2006) 11–12, pp. 1262–1266, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.08.006>
- [11] Zhang, M.H., Li, H.: Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2011) 2, pp. 608–616, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.032>
- [12] Sorathiya, J., Shah, S., Kacha, S.: Effect of Addition of Nano "Titanium Dioxide (TiO₂) on Compressive Strength of Cementitious Concrete, *Proceedings of the International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering & Technology, Birla Vishvakarma Mahavidyalaya, Gujarat, India, 2018*, pp. 219–211
- [13] Mostafa, J., Ramezani-pour, A.A., Pool, M.K.: Effects of titanium dioxide nanopowder on rheological properties of self-compacting concrete, *J. Am. Sci.*, 8 (2012) 4, pp. 285–288
- [14] Jalal, M., Fathi, M., Farzad, M.: Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on the rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self-compacting concrete, *Mech. Mater.*, 61 (2013), pp. 11–27, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.01.010>
- [15] Senff, L., Hotza, D., Lucas, S., Ferreira, V.M., Labrincha, J.A.: Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars, *Mater. Sci. Eng.*, 532 (2012), pp. 354–361, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.102>
- [16] Khataee, R., Heydari, V., Moradkhannejhad, L., Safarpour, M., Joo, S.W.: Self-cleaning and mechanical properties of modified white cement with nanostructured TiO₂, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 13 (2013) 7, pp. 5109–5114, <https://doi.org/10.1166/jnn.2013.7586>
- [17] Chen, J., Kou, S.C., Poon, C.S.: Hydration and properties of nano-TiO₂ blended cement composites, *Cem. Concr. Compos.*, 34 (2012) 5, pp. 642–649, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.009>
- [18] Lee, Y., et.al.: Effect of titanium dioxide nanoparticles on early age and long term properties of cementitious materials, <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/44834>, 1.8.2012.
- [19] Essawy, A.A., Abd, S.: Physico-mechanical properties, potent adsorptive and photocatalytic efficacies of sulphate-resistant cement blends containing micro silica and nano-TiO₂, *Constr. Build. Mater.*, 52 (2014), pp. 1–8, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.026>
- [20] Nazari, A.: The effects of curing medium on flexural strength and water permeability of concrete incorporating TiO₂ nanoparticles, *Mater. Struct. Constr.*, 44 (2011) 4, pp. 773–786, 2011, <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9664-y>
- [21] Soleymani, F.: Assessments of the effects of limewater on water permeability of TiO₂ nanoparticles binary blended palm oil clinker aggregate-based concrete, *J. Am. Sci.*, 2 (2012) July, p. 32, 2012, [Online]. Available: <http://www.americanscience.org>
- [22] Nazari, A., Riahi, S.: The effects of TiO₂ nanoparticles on physical, thermal and mechanical properties of concrete using ground granulated blast furnace slag as binder, *Mater. Sci. Eng.*, 528 (2012) 4–5, pp. 2085–2092, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.070>
- [23] Nazari, A., Riahi, S.: The effect of TiO₂ nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete, *Mater. Sci. Eng.*, 528 (2010) 2, pp. 756–763, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.074>
- [24] Nazari, A., Riahi, S.: TiO₂ nanoparticles effects on physical, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag as binder, *Energy Build.*, 43 (2011) 4, pp. 995–1002, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.025>
- [25] Jalal, M.: Durability enhancement of concrete by incorporating titanium dioxide nanopowder into binder, *J. Am. Sci.*, 8 (2012) 4, pp. 289–294
- [26] Shekari, A.H., Razzaghi, M.S.: Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete, *Procedia Eng.*, 14 (2011), pp. 3036–3041, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.382>
- [27] Senff, L., Tobaldi, D.M., Lucas, S.S., Hotza, D., Ferreira, V.M., Labrincha, J.A.: Formulation of mortars with nano-SiO₂ and nano-TiO₂ for degradation of pollutants in buildings, *Compos. Part B Eng.*, 44 (2013) 1, pp. 40–47, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.022>
- [28] Farzadnia, N., Abang Ali, A.A., Demirboga, R., Anwar, M.P.: Characterization of high strength mortars with nano Titania at elevated temperatures, *Constr. Build. Mater.*, 43 (2013), pp. 469–479, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.044>
- [29] Basalts, Ree, F.: "ch i Ar ve of Ar ch i of", 16 (2009) 4, pp. 617–630

- [30] Mohammadi, M., Hesarakhi, S., Hafezi-Ardakani, M.: Investigation of biocompatible nanosized materials for development of strong calcium phosphate bone cement: Comparison of nanotitania, nano-silicon carbide and amorphous nano-silica, *Ceram. Int.*, 40 (2014) 6, pp. 8377–8387, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.044>
- [31] Lee, B.Y., Kurtis, K.E.: Influence of TiO₂ nanoparticles on early C3S hydration, *J. Am. Ceram. Soc.*, 93 (2010) 10, pp. 3399–3405, <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03868.x>
- [32] Teixeira, K.P., Rocha, I.P., Carneiro, L.D.S., Flores, J., Dauer, E.A., Ghahremaninezhad, A.: The effect of curing temperature on the properties of cement pastes modified with TiO₂ nanoparticles, *Materials*, 9 (2016) 11, pp. 1–15, <https://doi.org/10.3390/ma9110952>
- [33] Ma, B., Li, H., Mei, J., Li, X., Chen, F.: Effects of nano-TiO₂ on the toughness and durability of cement-based material, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, (2015), <https://doi.org/10.1155/2015/583106>
- [34] Li, H., Xiao, H., Guan, X., Wang, Z., Yu, L.: Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO₂ under coupled effect of scouring, *Compos. Part B Eng.*, 56 (2014), pp. 698–704, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.024>
- [35] Лобач, У.А.: Полацкі Этнаграфічны Зборнік. Вып. 2. Ч. 1: Народная Проза Беларусаў Падзвіння, *Elektronička knjižnica Državnog sveučilišta Polotsk*, 7 (2011) 12, pp. 290
- [36] Wang, H., Zhao, P., Wang, S., Lu, L., Cheng, X.: Effect of well-dispersed nano-TiO₂ on sulphoaluminate cement hydration and its application in photo-degradation, *Ceram. Silikaty*, 61 (2017), 4 (2017), pp. 301–308, <https://doi.org/10.13168/cs.2017.0029>
- [37] Jayapalan, A.R., Lee, B.Y., Kurtis, K.E.: Effect of Nano-sized Titanium Dioxide on Early Age Hydration of Portland Cement, *Nanotechnol. Constr.*, 3(2009), pp. 267–273, https://doi.org/10.1007/978-3-642-00980-8_35
- [38] Meng, T., Yu, Y., Qian, X., Zhan, S., Qian, K.: Effect of nano-TiO₂ on the mechanical properties of cement mortar, *Constr. Build. Mater.*, 29 (2012), pp. 241–245, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.047>
- [39] Nazari, A., Riahi, S.: TiO₂ nanoparticles effects on properties of concrete using ground granulated blast furnace slag as binder, *Sci. China Technol. Sci.*, 54 (2011) 11, pp. 3109–3118, <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4421-1>
- [40] Jayapalan, A.R., Lee, B. Y., Fredrich, S.M., Kurtis, K. E.: Influence of additions of anatase TiO₂ nanoparticles on early-age properties of cement-based materials, *Transp. Res. Rec.*, 2 (2010), pp. 41–46, <https://doi.org/10.3141/2141-08>
- [41] Nadu, T.: Experimental Investigation of Concrete Using Titanium, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6 (2019) 5, pp. 2326–2330
- [42] Rahim, A., Nair, S.R.: Influence of Nano-Materials