

Primljen / Received: 21.11.2024.

Ispravljen / Corrected: 11.3.2025.

Prihvaćen / Accepted: 30.3.2025.

Dostupno online / Available online: 10.6.2025.

Ponašanje *Bubble Deck* ploča pod statičkim i cikličkim opterećenjem

Autori:



Anni Anto G., dipl.ing.građ.

Državni fakultet inženjerstva, Tamilnadu, Indija

Odjel za građevinarstvo

gannie2019@gmail.com

Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Murugan M.**, dipl.ing.građ.

Državni fakultet inženjerstva, Tamilnadu, Indija

Odjel za građevinarstvo

murugan@gcetly.ac.in

Prethodno priopćenje

Anni Anto G., Murugan M.

Ponašanje "Bubble Deck" ploča pod statičkim i cikličkim opterećenjem

Tehnologija "Bubble Deck" ploča nudi inovativan pristup za izradu betonskih ploča koje kombiniraju malu težinu s učinkovitošću. Ovaj sustav obuhvaća šupljine unutar konstrukcijskog elementa. Primarna je svrha šupljina smanjenje vlastite težine ploče uz očuvanje njene nosivosti. To omogućava veće raspone i smanjuje opterećenje nosive konstrukcije. Ovo istraživanje ispitivalo je ponašanje betona pod statičkim i rastućim cikličkim opterećenjem, pri čemu su plastične kuglice korištene za stvaranje šupljina ispod neutralne osi u različitim omjerima. "Bubble Deck" ploče uspoređivane su s klasičnim armiranim betonom pod oba opterećenja, a rezultati su analizirani radi procjene utjecaja različitih postotaka šupljina. Uz osnovno istraživanje provedena je i detaljna analiza ponašanja dana krivuljom odnosa opterećenja i progiba, kao i degradacije krutosti ploča.

Ključne riječi:

statičko opterećenje, rastuće cikličko opterećenje, plastične kuglice, postotak šupljina, granično opterećenje, krivulja opterećenje-progib

Research Paper

Anni Anto G., Murugan M.

Static and cyclic behaviour of Bubble Deck slab with plastic balls

Bubble deck slab technology offers an innovative approach for crafting concrete slabs that combine lightweight properties with efficiency. This system incorporates voids within the system. The primary purpose of voids is to minimise the self-weight of a slab considering its structural integrity. This enables extended spans and decreases the load on the supporting structures. This study investigated the static and progressive cyclic load behaviours of concrete in which plastic balls were used as void makers below the neutral axis in various proportions. Bubble deck slabs were evaluated alongside conventional concrete under both loading conditions, and the results were analysed to assess the impact of varying void percentages. In addition to the primary investigations, a detailed analysis of the load–deflection curve behaviour and stiffness degradation of the slabs was conducted.

Key words:

static load, progressive cyclic load, plastic balls, percentage of voids, ultimate load, load–deflection curve

1. Uvod

Tehnologija "Bubble Deck" ploča napredna je metoda gradnje koja se fokusira na povećanje učinkovitosti i djelotvornosti betonskih ploča [1]. Temeljni koncept tehnologije "Bubble Deck" ploča uključuje ugradnju šupljih elemenata ili kugli unutar jezgre betonske ploče. Umetnute šupljine smanjuju potrebnu količinu betona, čime se smanjuje vlastita težina ploče uz zadržavanje njene nosivosti [2, 3]. Smanjenje volumena betona provedeno je s namjerom da se umani vlastita težina konstrukcije, čime se omogućava upotreba manjih i ekonomičnijih potpornih stupova i temelja [4]. Ovaj pristup također omogućava projektiranje konstrukcija većih raspona.

Ova tehnologija omogućava veću fleksibilnost projektiranju, dopuštajući stvaranje otvorenih tlocrta bez stupova i većih raspona [5, 6]. Ova je mogućnost posebno korisna za komercijalne i stambene objekte [7]. Klasične armaturne šipke ugrađuju se u "Bubble Deck" ploču kako bi se učinkovito preuzela vlačna naprezanja i očuvala cjelovitost konstrukcije. Glavna je prednost smanjenje vlastite težine ploče, čime se smanjuje opterećenje nosivih konstrukcija i temelja [8]. Ova učinkovitost materijala ne samo da smanjuje troškove izgradnje, već i povećava održivost smanjenjem potrošnje resursa [3, 9]. "Bubble Deck" ploče tipično nude poboljšanu toplinsku i zvučnu izolaciju zahvaljujući smanjenoj masi [8, 10]. U građevinskom inženjerstvu beton se uglavnom projektira za prijenos tlačnih sila, a čelik je zadužen za preuzimanje vlačnih sila, stoga beton nije potreban u vlačnoj zoni ploče koja se nalazi ispod neutralne osi [11]. Šupljine se uvode u područja gdje beton nije potreban, čime se omogućava smanjenje vlastite težine i učinkovitija uporaba materijala. U vlačnom području beton je neophodan kako bi se zaštitila armatura i osigurala trajnost betona. Prijenos opterećenja može se postići kroz šupljine lučnim djelovanjem kod "Bubble Deck" ploča. Lučno djelovanje pomaže u učinkovitijoj raspodjeli opterećenja između oslonaca, stvarajući čvršću, kruću ploču s manje betona [10].

Lučno djelovanje gradiva sa šupljinama omogućava ploči da premosti veće raspone s manje materijala, što je čini učinkovitim projektantskim rješenjem. To također dovodi do ušteda materijala, što može biti značajno na velikim građevinskim projektima, smanjujući i utjecaj na okoliš i troškove.

Korišteni su različiti materijali za stvaranje šupljina u "Bubble Deck" pločama, uključujući otpadne cijevi, plastične kuglice, PET boce, pjenu, staklene boce i karton [12, 13]. Korištenje reciklirane plastike i drugih održivih materijala u građevinarstvu pomaže smanjiti potrebu za proizvodnjom nove plastike, rješavajući sve veći problem plastičnog otpada koji predstavlja značajnu prijetnju okolišu [14, 15]. Iako nisu biorazgradive, plastične kuglice smanjuju količinu otpada tijekom gradnje, a buduće inovacije u recikliranju rješavaju pitanja odlaganja. U šupljim pločama određeni dijelovi betona zamijenjeni su

ekološkim alternativama kao što su ljuske kokosovog oraha, čime se učinkovito smanjuje ukupna težina konstrukcije uz zadržavanje cjelovitosti konstrukcije. Različiti oblici mjehurića, kao što su eliptični, cilindrični, okrugli, zaobljeni, kubni i pojačani mjehurići, također su korišteni za optimizaciju svojstava konstrukcije [16, 17].

Čvrstoća betona u "Bubble Deck" pločama s konkavnim-kubičnim tijelima manja je u usporedbi s onom kod sfernih šupljina, što je posljedica razlika u geometriji i raspodjeli naprezanja. Sfere omogućavaju ravnomjerniji prijenos opterećenja i smanjuju koncentracije naprezanja, što rezultira poboljšanim strukturnim učinkom. Suprotno tome, konkavna kubična tijela stvaraju izražene rubove i lokalizirane točke naprezanja, što dovodi do slabijeg prijanjanja s betonom i smanjenja ukupne čvrstoće [16]. Veće šupljine zamjenjuju znatne količine betona iz nosivih zona, što značajno smanjuje čvrstoću i krutost ploče te dovodi do smanjenja granične nosivosti. Nasuprot tome, veći broj manjih šupljina omogućava ravnomjerniju preraspodjelu volumena, čime se smanjuje negativan utjecaj na graničnu nosivost [18]. Za optimalne performanse preporučuje se postavljanje kugli do 50 % visine ploče jer se time zadržava granična nosivost uz minimalno smanjenje krutosti, duktilnosti i žilavosti [19].

Iako su provedena brojna ispitivanja klasičnih armiranobetonskih ploča pod različitim vrstama opterećenja, uključujući cikličko, harmonijsko i udarno opterećenje [20], još uvijek postoje značajne nepoznanice u pogledu ponašanja "Bubble Deck" ploča pod tim uvjetima. Provedeno je ograničeno istraživanje njihove učinkovitosti pod cikličkim opterećenjem, uključujući degradaciju krutosti i mehanizme sloma. Optimalni postotak šupljina koji uravnotežuje smanjenje mase i očuvanje nosivosti još uvijek nije precizno definiran. Usporedbe između utjecaja statičkog i cikličkog opterećenja nisu dovoljno istražene, što otežava jasno razumijevanje utjecaja šupljina na ponašanje opisano krivuljom opterećenja i progiba, tipove loma te dugoročnu krutost, stoga su potrebna dodatna istraživanja kako bi se ovi aspekti bolje razumjeli i poboljšao dizajn "Bubble Deck" ploča. U ovom istraživanju šupljine u obliku kugle ostvarene su ugradnjom recikliranih plastičnih kuglica u različitim postocima, s ciljem smanjenja količine plastičnog otpada i poticanja održiva gradnja. Tako pripremljene ploče izložene su statičkom te progresivnom ili inkrementalnom cikličkom opterećenju, a njihova granična nosivost uspoređena je s graničnom nosivosti klasičnih armiranobetonskih ploča.

Prethodna istraživanja uglavnom su bila usredotočena na dvostruko armirane "Bubble Deck" ploče u kojima su šupljine stvorene uklanjanjem betona iz sredine ploče uvođenjem šupljina. Ovo istraživanje predstavlja inovativan pristup kroz strateško pozicioniranje plastičnih kuglica ispod neutralne osi, s ciljem optimizacije potrošnje materijala uz očuvanje granične nosivosti. Za razliku od ranijih istraživanja koja su se uglavnom fokusirala na statička opterećenja, ovo istraživanje ispituje utjecaj cikličkog opterećenja na "Bubble Deck" ploče analizom smanjenja krutosti i odnosa opterećenja i progiba.

Tablica 1. Svojstva korištenog običnog portland cementa (OPC) klase 53

Naziv testova	Dobiveni rezultati	Zahtjev prema IS 12269-2013
Finoća [m ² /kg]	257	Ne manje od 225
Specifična težina	3,14	-
Standardna konzistencija [%]	29	-
Strukturiranost [min] (prema Le-Chatelierovom načelu ekspanzije)	1,0	Ne više od 10
Početno vrijeme vezivanja [min]	40	Ne manje od 30
Vrijeme konačnog vezivanja [min]	520	Ne više od 600
Tlačna čvrstoća nakon 3 dana [MPa]	36,50	Ne manja od 27
Tlačna čvrstoća nakon 7 dana [MPa]	45,17	Ne manja od 37
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana [MPa]	55,25	Ne manja od 53

Tablica 2. Svojstva krupnog agregata

Svojstva	Rezultati ispitivanja	Zahtjev prema IS 2386-1963
Najveća veličina agregata [mm]	20	-
Oblik	uglat	-
Vodoupojnost [%]	0,70	-
Specifična težina	2,71	-
Nasipna gustoća[kg/m ³]	1637	-
Udarna vrijednost agregata [%]	14,08	< 45 %
Otpornost na deformaciju [%]	10,23	< 45 %
Indeks ljuskavosti [%]	5,72	< 40 % (kombinirano)
Indeks izduženja [%]	8,03	

Također se razmatra utjecaj plastičnih šupljina na poboljšanju lučnog djelovanja i učinkovitiju preraspodjelu naprezanja unutar konstrukcije. Osim toga, istraživanjem je utvrđen optimalan udio šupljina koji omogućuje postizanje ravnoteže između smanjenja mase i očuvanja granične nosivosti, čime se doprinosi razvoju učinkovitijih i održivijih sustava "Bubble Deck" ploča.

2. Svojstva materijala

Indijski standardi (IS), Eurokodovi i ASTM dijele slične strukturne principe, uključujući primjenu faktora sigurnosti,

Tablica 3. Svojstva sitnih agregata

Svojstva	Rezultati ispitivanja	Zahtjev prema IS 2386-1963
Specifična težina	2,67	-
Modul finoće	4,62	-
Vodoupojnost [%]	1,5 %	< 3 %
Nasipna gustoća [kg/m ³]	1518	-
Struktura površine	Glatka	-
Granulometrijska zona	Zona III	Zona I, II ili III

svojstava materijala te razmatranja djelovanja opterećenja. Također primjenjuju slične metode ispitivanja i temelje se na pristupu projektiranja prema graničnim stanjima za betonske konstrukcije. Ipak, u aspektima projektiranja betonske mješavine i smjernica za trajnost, IS standardi razlikuju se od ostalih normi [21]. U okviru ovog istraživanja za ispitivanje materijala, sastav mješavine, izradu te testiranje ploča primijenjeni su propisi definirani IS normama. Svojstva cementnog betona od ključne su važnosti za postizanje zadovoljavajuće nosivosti i trajnosti. Za izradu ispitnih ploča korišteni su sljedeći materijali, pri čemu su svi materijali udovoljavali zahtjevima definiranim IS normama.

2.1. Cement

Za izradu ploče upotrijebljen je obični portland cement (OPC) klase 53, koji zadovoljava zahtjeve indijske norme IS 12269:2013. Mehanička svojstva cementa prikazana su u tablici 1.

2.2. Krupni agregat

Kao krupni agregat korišten je drobljeni kamen iz kamenoloma koji se sastoji od

60 % agregata maksimalne veličine 20 mm i 40 % veličine od 12,5 mm. Agregat je zadovoljio zahtjeve prema IS 2386 (1. dio): iz 1963. i prikazan je u tablici 2.

2.3. Sitni agregat

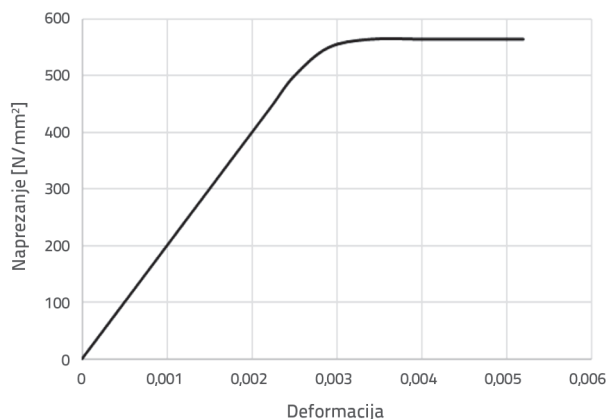
Za izradu betona korišten je pijesak iz lokalnog kamenoloma. Proizvedeni pijesak (M-sand) ima veličinu čestica manju od 4,75 mm. Provedena su ispitivanja sitnih agregata, a rezultati su uspoređeni sa zahtjevima navedenim u IS 2386 (1. Dio) iz 1963., kako je navedeno u tablici 3.

2.4. Voda

Za pripremu betona korištena je čista, pitka i lokalno raspoloživa pitka voda. pH vode iznosio je 7,1.

2.5. Armaturne šipke

Korištene su armaturne šipke promjera 8 mm i klase Fe550 u uzdužnom i poprečnom smjeru. Dijagram odnosa naprezanje-deformacija armaturne šipke prikazan je na slici 1.



Slika 1. Krivulja naprezanje-deformacija armaturne šipke Fe550

2.6. Plastične kuglice

Male okrugle plastične kuglice promjera 30 i 40 mm, izrađene od kemijski inertnog polietilena, korištene su za izradu ploče s mjehurićima.

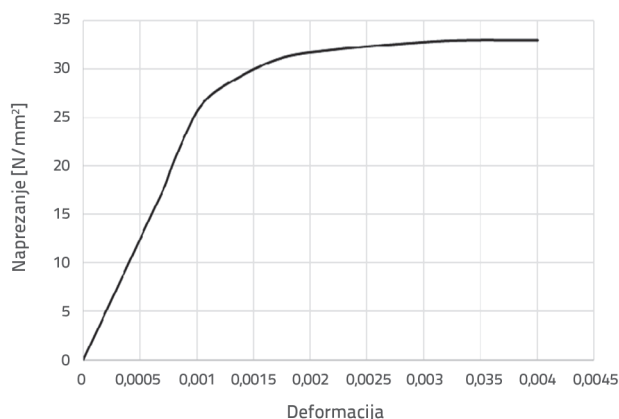
2.7. Mješavine

Betonske ploče izrađene su od betona klase C 20/25. Omjeri betonske mješavine određeni su u skladu s odredbama standarda IS 456:2000 i IS 10262:2009. Na temelju provedenog projektiranja definirani su sljedeći omjeri mješavine:

Cement	Sitni agregat	Krupni agregat		Voda
		12,5 mm	20 mm	
1	1,92	1,39	2,09	0,50

2.8. Tlačna čvrstoća betonske kocke

Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, mjerena pomoću standardiziranih uzoraka kocke (150 × 150 × 150 mm), bila je 33,42 MPa. Dijagram odnosa naprezanje-deformacija za beton C 20/25 (M25) prikazana je na slici 2.



Slika 2. Krivulja naprezanje-deformacija betona klase C 20/25

3. Detalji izrade

Za potrebe ispitivanja korištene su betonske ploče dimenzija 600 × 450 × 100 mm, s različitim razinama zamjene betona u vlačnoj zoni, i to u iznosima od 0 %, 10 %, 20 %, 30 % i 40 % ukupnog volumena betona.

Ukupni volumen betonske ploče = 600 × 450 × 100 mm = 2,7 × 10⁷ mm³. 10 % zamjene betona u vlačnoj zoni = 2,7 × 10⁶ mm³, 20 % = 5,4 × 10⁶ mm³, 30 % = 8,1 × 10⁶ mm³, a 40 % = 1,08 × 10⁷ mm³. Plastičnim kuglicama zamijenjeno je 10 %, 20 %, 30 % i 40 % ukupnog volumena betona.

3.1. Izrada klasične armiranobetonske ploče

Ploče su izvedene pomoću kalupa od šperploče dimenzija 600 × 450 × 100 mm. Kao zaštitni sloj izveden je sloj betona C 20/25 debljine 20 mm. Čelična armatura koja se sastoji od čeličnih šipki promjera 8 mm postavljena je u rešetkastom uzorku s razmakom od 140 mm u oba smjera, kao što je prikazano na slici 3. Nakon što je armatura postavljena, beton je ugrađen i zbijen kako bi se osiguralo uklanjanje šupljina.

3.2. Izrada *Bubble Deck* ploče

Za izradu betonskih ploča tipa "Bubble Deck" pripremljeni su kalupi od šperploče dimenzija 600 × 450 × 100 mm. U kalup je izliven sloj betona debljine 20 mm kako bi se osigurala odgovarajuća zaštita armature, a na taj sloj postavljena je armaturna mreža, kao što je prikazano na slici 3. Potreban broj kuglica koji odgovara navedenom postotku zamjene ravnomjerno je postavljen na vrh betona. Kako bi se kuglice učvrstile na mjestu, na armaturnu mrežu vezana je mreža od vlakana, kao što je prikazano na slici 4. Preostali dio kalupa potom je ispunjen betonom, koji je pažljivo vibriran kako bi se uklonio sav zarobljeni zrak.



Slika 3. Izvedba klasične ab ploče



Slika 4. Izvedba "Bubble Deck" ploča

Ploče su izvađene iz kalupa nakon 24 sata i potopljene u vodu tijekom 28 dana kako bi se osigurala odgovarajuća hidratacija cementa. Voda u kojoj se beton stvrdnjavao održavana je na temperaturi od $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, uz 100 % relativne vlažnosti (potpuno uronjeno stvrdnjavanje). Nakon stvrdnjavanja ploče su osušene na normalnoj atmosferskoj temperaturi od $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ prije ispitivanja.

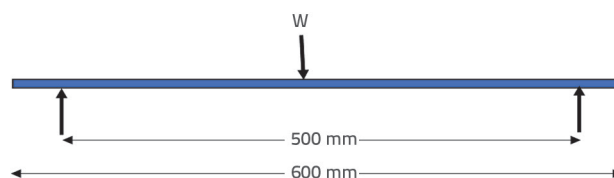
4. Ispitivanje na pločama

4.1. Statičko ispitivanje na pločama

Nosivost klasičnih ab ploča i "Bubble Deck" ploča, koje uključuju kuglaste šupljine, ispitana je pomoću uređaja za ispitivanje na savijanje. Uređaj ima točnost mjerenja opterećenja unutar $\pm 1\%$ u skladu sa zahtjevima standarda IS 1828. Ploče su bile oslonjene na oba kraja i podvrgnute monotonom središnjem opterećenju sve do sloma, kao što je prikazano na slici 5. Raspon između oslonaca iznosio je 600 mm, dok je opterećenje primijenjeno na udaljenosti od 500 mm od svake potpore. Opterećenje se postupno primjenjivalo brzinom od 0,2 do 0,5 kN/s do sloma.

Za svako primijenjeno inkrementalno opterećenje zabilježen je središnji progib kako bi se analiziralo ponašanje ploče od opterećenja i progiba. Pojava prvih pukotina zabilježena je na vlačnoj strani ploče s porastom opterećenja. Unatoč pukotinama, ploča je zbog armature nastavila podnositi dodatna opterećenja.

Vrijednosti prvog opterećenja pri pucanju, kao i najvećeg opterećenja prije loma, dokumentirane su i prikazane u tablici 1.



Slika 5. Specifikacije nosivosti i potpore ploče

Ploče su pokazale postupno smanjenje kapaciteta kako pri početnom pucanju, tako i pri dosezanju graničnog opterećenja. Početno opterećenje uslijed pucanja, koje označava trenutak pojave prvih vidljivih pukotina, kretalo se između 40,8 kN i 24,21 kN, što ukazuje na jasan trend pada. Isto tako, granično opterećenje, koje definira maksimalnu nosivost prije sloma, smanjilo se s 55,02 na 42,92 kN, naglašavajući trend smanjenja granične nosivosti. Na slici 6. prikazano je postupno opadanje granične-nosivosti ploča s porastom udjela plastičnih kuglica. Ovaj trend ukazuje na to da su šupljine unutar vlačne zone, nastale ugradnjom kuglica, blago umanjile sposobnost ploča da podnesu veća opterećenja prije sloma.

Kao što je prikazano u tablici 4., zamjena 20 % betona u vlačnoj zoni dovela je do smanjenja nosivosti koje je ostalo ispod 8 %, što ukazuje na tek blagi pad čvrstoće. Sudeći po tim podacima, ploče sa stopom zamjene od 20 % funkcioniraju slično kao pune ploče, što ih čini obećavajućom alternativom za gradnju. Slična opažanja zabilježena su u prethodnim istraživanjima. Pregled literature pokazao je da "Bubble Deck" ploče zadržavaju 75 % nosivosti klasičnih armiranobetonskih ploča [22].

Tablica 4. Vrijednosti graničnog opterećenja za klasične armiranobetonske ploče i "Bubble Deck" ploče koje sadrže plastične kuglice utvrđene su tijekom statičkog ispitivanja

Br. ploče	Postotak zamjene betona u vlačnoj zoni	Opterećenje uslijed prvog pucanja [kN]	Granično opterećenje [kN]	Postotak smanjenja krajnjeg opterećenja u usporedbi s konvencionalnim betonom [%]
1	0 %	40,8	55,02	0,00
2	10 % kuglica	37,65	54,1	1,67
3	20 % kuglica	33,84	50,68	7,89
4	30 % kuglica	29,52	47,3	14,03
5	40 % kuglica	24,21	42,92	21,99

Drugo je istraživanje pokazalo da je razlika u čvrstoći između klasičnih armiranobetonskih ploča "Bubble Deck" ploča zanemariva [23]. Osim toga, istraživanje je pokazalo da je smanjenje volumena betona za 15 % rezultiralo smanjenjem granične nosivosti za 11,5 %, dok smanjenje od 18 % dovodi do smanjenja nosivosti za 15,93 % u usporedbi s punim pločama [24]. Osim toga, još jedno istraživanje pokazalo je da "Bubble Deck" ploče mogu podnijeti do 80 % naprezanja koje imaju klasične armiranobetonske ploče, uz minimalne razlike u deformacijama [25].



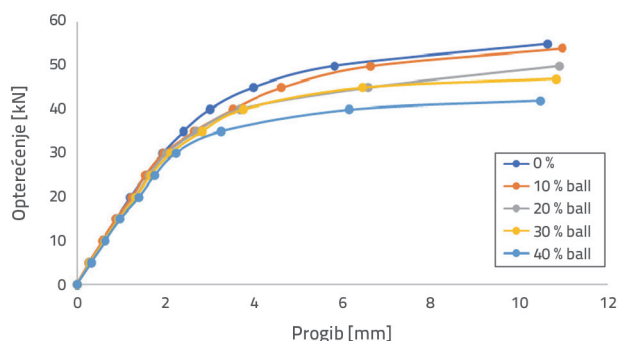
Slika 6. Granično opterećenje "Bubble Deck" ploče pri statičkom ispitivanju

"Bubble Deck" ploče prvenstveno su otkazale zbog drobljenja betona u sredini raspona, s početnim pukotinama na savijanje u području konstantnog momenta. Posmične pukotine također su uočene u blizini oslonaca, a neke su se širile dijagonalno prema točkama opterećenja kako se opterećenje povećavalo. Prisutnost plastičnih kuglica utjecala je na širenje pukotine, ali zadržala je strukturni integritet do sloma.

4.2. Opterećenje u odnosu na progib pri statičkom ispitivanju

"Bubble Deck" ploče pokazale su veći progib od punih ploča pod određenim opterećenjem zbog prisutnosti šupljina,

što je smanjilo njihovu ukupnu krutost i nosivost, kao što je prikazano u tablici 5. Smanjenje količine betona učinio je ploče fleksibilnijima, što je rezultiralo većim savijanjem u usporedbi s čvrstim punim pločama kada su podvrgnute istom opterećenju. Slična istraživanja pokazala su da smanjenje krutosti pri savijanju uzrokuje da ploče sa šupljinama pokazuju fleksibilniji odgovor na opterećenje i progib u odnosu na pune ploče, pri čemu se krutost smanjuje u rasponu od 11,1 % do 23,7 % [18]. Istraživanje je pokazalo da su "Bubble Deck" ploče imale za 5,88 % veću deformaciju u odnosu na pune ploče, što se pripisuje smanjenoj krutosti zbog prisutnosti šupljih dijelova [26]. Dijagram opterećenja i progiba za klasični armirani beton i beton s različitim postocima kuglica prikazani su na slici 7.



Slika 7. Dijagram opterećenje-progibi konvencionalnog betona i ploča s mjehurićima s kuglicama

U početnoj fazi krivulje opterećenje-progib zabilježeno je linearno ponašanje, što ukazuje na elastični odziv materijala, a ploča se nakon uklanjanja opterećenja vraćala u prvobitni oblik. S daljnjim povećanjem opterećenja materijal je dostigao granicu elastičnosti te je započelo postupno savijanje i trajna deformacija, zbog čega krivulja gubi linearnost. Najviša točka na krivulji označava maksimalno opterećenje koje ploča može podnijeti. Nakon tog vrhunca materijal ulazi u fazu slabljenja, pri čemu dolazi do smanjenja nosivosti, što se očituje padom u krivulji.

Tablica 5. Opterećenje u odnosu na progib

Opterećenje [kN]	Središnji otklon [mm]				
	0 %	10 % kuglica	20 % kuglica	30 % kuglica	40 % kuglica
0	0	0	0	0	0
5	0,28	0,27	0,29	0,3	0,32
10	0,59	0,58	0,62	0,62	0,65
15	0,9	0,89	0,95	0,96	0,99
20	1,22	1,25	1,32	1,34	1,41
25	1,56	1,55	1,64	1,67	1,76
30	1,94	1,96	2,02	2,12	2,23
35	2,42	2,66	2,72	2,84	3,26
40	3,01	3,53	3,68	3,76	6,17
45	3,98	4,62	6,58	6,46	10,48 (za 42,92 kN)
50	5,83	6,64	10,91 (za 50,68 kN)	10,83 (za 47,3 kN)	-
-	10,64 (za 55,02 kN)	10,98 (za 54,1 kN)	-	-	-

4.3. Progresivno cikličko ispitivanje na pločama

Ploče su bile slobodno oslonjene na oba kraja i podvrgnute monotonom opterećenju u svom središtu do sloma, kao što je objašnjeno u statičkom testu. Raspon nosača iznosio je 600 mm, dok je primijenjeno opterećenje bilo 500 mm od svakog nosača. Ploča je postavljena na platformu za ispitivanje, poduprta na oba kraja i podvrgnuta cikličkom opterećenju koje je uključivalo opetovanu primjenu i uklanjanje opterećenja tijekom vremena, izazivajući naizmjenično naprezanje i deformaciju. Na početku je primijenjeno predopterećenje kako bi se osigurao pravilni rad sustava i uklonile sve nepravilnosti. U postupku rastućeg cikličkog opterećenja, opterećenje je postupno povećavano za 10 kN u svakom ciklusu. Prvo je primijenjeno minimalno opterećenje od nula do 10 kN, a zatim je smanjeno natrag na nulu. Ovaj ciklus ponovljen je uz povećanje razine opterećenja, na 20 kN, 30 kN, i tako dalje, sve dok ploča u konačnici nije doživjela lom.

Granična nosivost kontrolne ploče (0 % zamjene) iznosila je 47,28 kN, što je poslužilo kao referentna vrijednost, kao što je prikazano u tablici 6. U slučaju 10 %-tne zamjene zabilježeno je blago smanjenje nosivosti na 46,25 kN, što predstavlja smanjenje od 2,18 %. Daljnje povećanje zamjene na 20 % rezultiralo je izraženijim padom, pri čemu je granično opterećenje iznosilo 42,85 kN (smanjenje od 9,37 %). S 30 %-tnom zamjenom nosivost se dodatno smanjila na 39,85 kN, što odgovara smanjenju od 15,71 %. Najveće smanjenje uočeno je kod zamjene od 40 %, gdje je nosivost dosegla 35,52 kN, što je smanjenje od 24,87 % u odnosu na kontrolnu ploču.

Povećanje postotka šupljina unutar vlačne zone rezultiralo je postupnim smanjenjem granične nosivosti ploča, kao što je prikazano na slici 8. Kada je zamijenjeno do 20 % betona, smanjenje nosivosti ostalo je unutar 10 %, što ukazuje na to da je konstrukcijska izvedba još uvijek unutar prihvatljivog raspona. Međutim, kada je zamjena premašila 30 %, uočeno

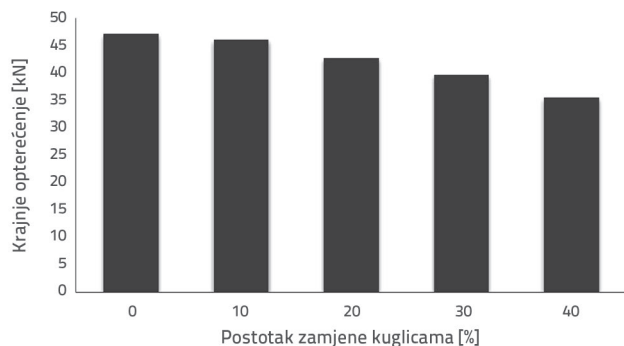
Tablica 6. Najveća opterećenja klasičnih ploča od armiranog betona i “Bubble Deck” ploče u cikličkim ispitivanjima

Br. ploče	Postotak zamjene betona u vlačnoj zoni pomoću kuglica	Granično opterećenje [kN] pri cikličkom ispitivanju	Postotak smanjenja krajnjeg graničnog opterećenja u usporedbi s klasičnim betonom [%]
1	0 %	47,28	0,00
2	10 % kuglica	46,25	2,18
3	20 % kuglica	42,85	9,37
4	30 % kuglica	39,85	15,71
5	40 % kuglica	35,52	24,87

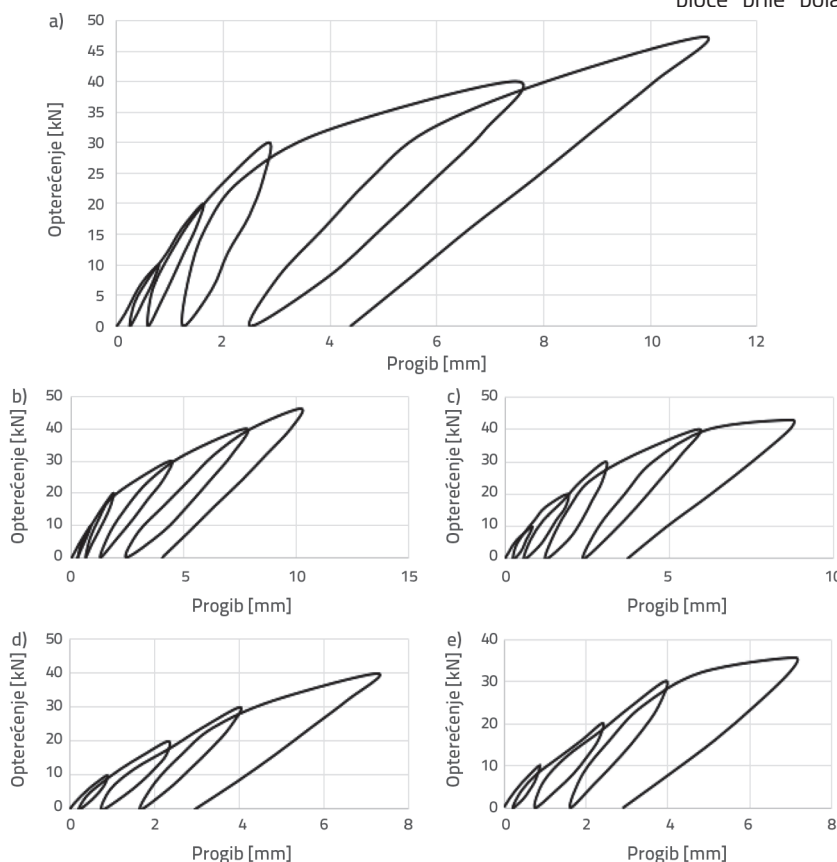
je značajno smanjenje čvrstoće, što ukazuje da je veći postotak šupljina negativno utjecao na sposobnost ploče da izdrži cikličko opterećenje. Potrebna su daljnja istraživanja o cikličkom ponašanju "Bubble Deck" ploča jer se većina postojećih studija usredotočuje na statičko opterećenje.

4.4. Opterećenje u odnosu na progib pri progresivnom cikličkom ispitivanju

Ploče su bile podvrgnute cikličkom opterećenju kako bi se simuliralo realno opterećenje. Cilj je bio analizirati ponašanje



Slika 8. Krajnje opterećenje ploče s plastičnim kuglicama pri cikličkim ispitivanjima



Slika 9. Dijagram opterećenje-progib pri progresivnom cikličkom ispitivanju: a) klasični beton; b) 10 % kuglica; c) 20 % kuglica; d) 30 % kuglica; e) 40 % kuglica

odnosa opterećenja i progiba te usporediti rezultate s klasičnim armiranobetonskim pločama kako bi se procijenile posljedice zamjene dijela betonskog volumena ispod neutralne osi kuglicama na ukupna svojstva "Bubble Deck" ploča.

Krivulje histereze opterećenje-progib, prikazane na slici 9., prikazuju ponašanje klasičnog armiranog betona i betona s različitim udjelima kuglica pod cikličkim opterećenjem. U inkrementalnom cikličkom ispitivanju klasični armirani beton izdržao je više ciklusa od "Bubble Deck" ploče, a kako se postotak šupljina povećavao, broj ciklusa se smanjivao. Klasični armirani beton i ploče s 10 % i 20 % šupljina prošli su pet ciklusa, dok su oni s 30 % i 40 % šupljina prošli četiri ciklusa.

U klasičnom armiranom betonu maksimalno postignuto opterećenje iznosilo je 47,28 kN, s odgovarajućim progibom od 11,02 mm. Za ploču s 10 % šupljina vršno opterećenje bilo je 46,25 kN, praćeno progibom od 10,18 mm. Za ploču s 20 % šupljina najveće zabilježeno opterećenje bilo je 42,85 kN, s progibom od 8,76 mm. Ploča s 30 % šupljina podnijela je maksimalno opterećenje od 39,85 kN, što je rezultiralo progibom od 7,24 mm. Ploča s 40 % šupljina postigla je maksimalno opterećenje od 35,52 kN, s odgovarajućim progibom od 7,12 mm.

Početni dio krivulje opterećenje-progib odražava početnu krutost ploče prije pojave pukotina ili izraženih trajnih deformacija,

a njegova linearna forma označava elastično ponašanje materijala. S povećanjem opterećenja, dolazi do pojave mikropukotina koje postupno smanjuju krutost ploče, čime krivulja postaje nelinearna u blizini granice popuštanja. Tijekom cikličkog opterećenja pojavljuju se petlje histereze, koje su rezultat gubitka energije uslijed pucanja i unutarnjeg trenja. Sa svakim ciklusom površina unutar petlji povećavala se, što ukazuje na veće rasipanje energije od akumuliranog oštećenja. Nakon nekoliko ciklusa, osobito pri većim opterećenjima, progib se nije u potpunosti vratio na nulu, što ukazuje na plastičnu deformaciju. U završnoj fazi ispitivanja, dolazi do naglog povećanja progiba uz vrlo malo dodatnog opterećenja, što označava početak sloma i gubitka kapaciteta opterećenja ploče.

4.5. Smanjenje krutosti pri cikličkom ispitivanju

Cikličko ispitivanje rezultiralo je smanjenjem krutosti ploče sa svakim uzastopnim ciklusom. Tablica 7. prikazuje postupno smanjenje krutosti materijala ili konstrukcijskog elementa

Tablica 7. Smanjenje krutosti pri cikličkom ispitivanju

Klasični beton				
Br. ciklusa	Vršno opterećenje [kN]	Pomak [mm]	Krutost [kN/mm]	Smanjenje krutosti [%]
1	10	0,78	12,82	0
2	20	1,62	12,35	3,70
3	30	2,85	10,53	17,89
4	40	7,47	5,35	58,23
5	47,28	11,02	4,29	66,53
20 % zamjene kuglicama				
Br. ciklusa	Vršno opterećenje [kN]	Pomak [mm]	Krutost [kN/mm]	Smanjenje krutosti [%]
1	10	0,84	11,90	0
2	20	1,91	10,47	12,01
3	30	2,95	10,17	14,54
4	40	5,92	6,76	43,22
5	42,85	8,76	4,89	58,89
40 % zamjene kuglicama				
Br. ciklusa	Vršno opterećenje [kN]	Pomak [mm]	Krutost [kN/mm]	Smanjenje krutosti [%]
1	10	0,88	11,36	0
2	20	2,42	8,26	27,25
3	30	3,97	7,56	33,48
4	35,52	7,12	4,99	56,08
10 % zamjene kuglicama				
Br. ciklusa	Vršno opterećenje [kN]	Pomak [mm]	Krutost [kN/mm]	Smanjenje krutosti [%]
1	10	0,85	11,76	0
2	20	1,85	10,81	8,07
3	30	4,41	6,80	42,15
4	40	7,75	5,16	56,11
5	46,25	10,18	4,54	61,37
30 % zamjene kuglicama				
Br. ciklusa	Vršno opterećenje [kN]	Pomak [mm]	Krutost [kN/mm]	Smanjenje krutosti [%]
1	10	0,89	11,24	0
2	20	2,33	8,58	23,63
3	30	4,02	7,46	33,61
4	39,85	7,24	5,50	51,03

dok prolazi kroz ponovljene cikluse opterećenja i rasterećenja. Kako se broj ciklusa povećavao, postotak degradacije krutosti neprestano se povećavao. U klasičnom armiranom betonu utvrđeno je da krutost kontinuirano opada s 12,82 na 4,29 kN/mm nakon pet ciklusa opterećenja. S 10 % šupljina krutost se progresivno smanjivala tijekom svih ciklusa, uz smanjenje s 11,76 na 4,54 kN/mm nakon pet ciklusa opterećenja. U slučaju 20 % šupljina krutost je postojano opadala s 11,9 na 4,89 kN/mm po završetku pet ciklusa. S 30 % šupljina krutost se smanjila s 11,24 na 5,5 kN/mm na kraju četiri ciklusa. U prisutnosti 40 % šupljina krutost se smanjila s 11,36 na 4,99 kN/mm na kraju četiri ciklusa.

U "Bubble Deck" pločama s plastičnim kuglicama koje su podvrgnute progresivnom cikličkom opterećenju krutost se progresivno smanjivala sa svakim ciklusom. U početku je ploča pokazala visoku krutost, kao što je naznačeno strmim početnim nagibom krivulje opterećenje-progib. Međutim, kako se cikličko opterećenje nastavlja, mikropukotine i akumulirana oštećenja unutar ploče postupno smanjuju njezinu krutost.

U zonama podložnim potresima i opterećenjima koja uzrokuju zamor, kod "Bubble Deck" ploča obično dolazi do

progresivnog smanjenja krutosti tijekom vremena. Na ovo pogoršanje utječe postotak kuglica koje stvaraju šupljine koje se upotrebljavaju u ploči. Veća koncentracija ovih šupljina može oslabiti vezu između cementne paste i okolnih materijala, potencijalno ugrožavajući raspršivanje energije i otpornost na širenje pukotina. Zato su ciljane promjene u dizajnu od presudne važnosti za unaprjeđenje dugoročne učinkovitosti i otpornosti ploča kada su izložene cikličkim opterećenjima.

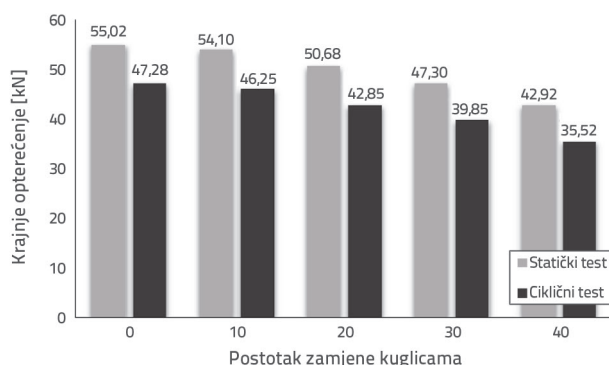
4.6. Usporedba graničnog opterećenja kod statičkih i cikličkih ispitivanja

Kako je rastao postotak zamjene, nosivost ploča postupno se smanjivala u oba ispitna uvjeta, što je prikazano u tablici 8. Pod cikličkim opterećenjem smanjenje čvrstoće u usporedbi s onim pod statičkim opterećenjem kretalo se od 14,1 % do 17,2 % zbog šupljina nastalih zamjenom kuglica, koje su oslabile betonski presjek i krutost. Slika 10. prikazuje nagli pad graničnog opterećenja pod cikličkim opterećenjem, posebno na višim razinama zamjene. "Bubble Deck" ploče slomile su se ranije pri cikličkim ispitivanjima zbog akumulirane štete od ponavljajućeg

Tablica 8. Usporedba graničnih opterećenja kod statičkih i cikličkih ispitivanja

Br. ploče	Postotak zamjene betona u vlačnoj zoni kuglicama	Granično opterećenje [kN]		Postotak smanjenja u cikličkom ispitivanju u usporedbi sa statičkim ispitivanjem [%]
		Statičko ispitivanje	Cikličko ispitivanje	
1	0 %	55,02	47,28	14,1
2	10 % kuglica	54,1	46,25	14,5
3	20 % kuglica	50,68	42,85	15,4
4	30 % kuglica	47,3	39,85	15,8
5	40 % kuglica	42,92	35,52	17,2

opterećenja. Za razliku od statičkog opterećenja, gdje do sloma dolazi pod stalno rastućim opterećenjem, cikličko opterećenje ubrzava zamor, smanjenje krutosti i širenje mikropukotina tijekom više ciklusa.



Slika 10. Usporedba graničnih opterećenja kod statičkih i cikličkih ispitivanja

5. Zaključak

Jednostruko armirane "Bubble Deck" ploče predstavljaju suvremenu metodu gradnje pri kojoj se šupljine uvode u betonsku ploču dodavanjem plastičnih kuglica u različitim postocima od 0 %, 10 %, 20 %, 30 % i 40 %. Zaključci ovog ispitivanja su sljedeći:

- Dodavanje kuglica rezultiralo je ekonomičnijim rješenjem u odnosu na klasične betonske ploče.
- Ovaj pristup podržava korištenje recikliranih materijala kao što je plastika, pridonoseći održivijim građevinskim praksama.
- Izvedba "Bubble Deck" ploča evaluirana je pod uvjetima statičkog i cikličkog opterećenja kako bi se procijenio utjecaj različitih postotaka šupljina na ponašanje ploče.
- Budući da su šupljine smanjile krutost i nosivost, "Bubble Deck" ploče imale su veću deformaciju pod opterećenjem od punih ploča pri statičkom ispitivanju.

- Rezultati cikličkih ispitivanja pokazali su da ploče s do 20 % zamjene betona plastičnim kuglicama uspješno podnose pet ciklusa opterećenja, što ukazuje na očuvanje cjelovitosti strukture unatoč ponovljenom opterećenju. Međutim, s porastom broja ciklusa dolazilo je do postupnog gubitka krutosti, što je karakteristično za materijale izložene zamoru, gdje ponavljajuće opterećenja uzrokuju progresivno oštećenje konstrukcije.
- U inkrementalnim cikličkim ispitivanjima, zamjena do 20 % plastičnim kuglicama rezultirala je manje značajnim smanjenjem savojne čvrstoće "Bubble Deck" ploča.
- U betonskim "Bubble Deck" pločama s plastičnim kuglicama razlika između rezultata dobivenih statičkim i cikličkim ispitivanjima kvantificirana je kao postotak u rasponu od 14 % do 17,2 %. Ovaj postotak pokazuje u kojoj se mjeri performanse ploče razlikuju u uvjetima statičkog opterećenja u usporedbi s cikličkim opterećenjem. Uočena odstupanja istaknula su utjecaj vrste opterećenja na strukturno ponašanje ploča, naglašavajući da bi cikličko opterećenje moglo dovesti do povećane deformacije i potencijalne degradacije krutosti tijekom vremena, što je kritično za procjenu dugoročne trajnosti i uporabljivosti.
- Povećanje zamjene betona plastičnim kuglicama do 20 % rezultiralo je smanjenjem nosivosti za manje od 10 % u statičkim i cikličkim ispitivanjima, a promjena je ocijenjena zanemarivom. Ovo smanjenje ima mali učinak na čvrstoću ili stabilnost betonske ploče.
- Međutim, mehanička svojstva ploče značajno su se smanjila kada je postotak šupljina premašio 20 %, naglašavajući štetan utjecaj prekomjernih šupljina na graničnu nosivost.

Betonska "Bubble Deck" ploča s do 20 % zamjene plastičnim kuglicama smanjuje težinu uz minimalan utjecaj na čvrstoću i krutost, što ju čini održivom za praktičnu upotrebu.

LITERATURA

- [1] Nicácio, W., Barros, J., Melo, G.: Punching behavior of Bubble Deck type reinforced concrete slabs, fib. International Federation for Structural Concrete Structural Concrete, (2019), pp. 262-277, <https://doi.org/10.1002/suco.201900176>
- [2] Hashemi, S., Sadeghi, K., Vaghefi, M., Siadat, S.: Evaluation of ductility of RC structures constructed with bubble deck system, International Journal of Civil Engineering, 16 (2017) 5, pp. 513-526, <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0158-y>
- [3] Garg, A., Goyal, A., Prince, T., Jangid, C., Mohit Hussain, A.: Bubble deck slab construction and its applications, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6 (2019) 8, pp. 936-942.
- [4] Ali, S., Kumar, M.: Analytical study of conventional slab and bubble deck slab under various support and loading conditions using ANSYS workbench 14.0 International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4 (2017) 5, pp. 1467-1472.
- [5] Gasham, T., Mhalhal, J., Al-Magsusy, L.: Bubble slabs burned at 800 °C with different periods, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, February 2021, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1058/1/012058>
- [6] Al-Fwadhil, M., Waryosh, W.: Punching shear behavior of a self-compacted bubble deck slab subjected to fire and water cooled, Journal of Engineering and Sustainable Development, 26 (2022) 2, pp. 40-55.
- [7] Kumar, R., Dhiman, S.: Structural behaviour of bubble deck slab and its applications, International Journal of Research Publication and Reviews, 3 (2022) 8, pp.1576-1589.
- [8] Kim, K., Shin, H., Park, J., Chung, J.: Vibration and floor impact sound isolation performance in bubble deck slab, Key Engineering Materials, 777 (2018), pp. 523-527 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.777.523>
- [9] Gajewski, T., Staszak, N., Garbowski, T.: Optimal design of bubble deck concrete slabs: Serviceability limit state, Optimal design of bubble deck concrete slabs: Serviceability limit state, 16 (2023), <https://doi.org/10.3390/ma16144897>
- [10] Bhowmik, R., Mukherjee, S., Das, A., Banerjee, S.: Review on bubble deck with spherical hollow balls, International Journal of Civil Engineering and Technology, 8 (2017) 8, pp. 979-987.
- [11] Mohan, A., Sukumaran, A.: Performance analysis of bubble deck slab using elliptical balls, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ETCEA - 2K18, Conference Proceedings, 6 (2018) 6, <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV6IS06010>
- [12] Dadzie, D., Kaliluthin, A.K.: Implications of palm kernel shell-filled plastic bottles on the structural behavior of concrete, Civil Engineering Journal, 9 (2023) 3, pp. 731-751, <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-016>
- [13] Lee, C., Mansouri, I., Kim, E., Ryu, J., Woo, W.: Experimental analysis of one-way composite steel deck slabs voided by circular paper tubes: Shear strength and moment-shear interaction, Engineering Structures, 182 (2019) 1, pp. 227-240, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.063>
- [14] Ashna, T., Febeena, K.K., Jahfar, P.A., Anna, B.: An experimental study on flexural strength of bubble deck slab, International Research Journal of Engineering and Technology, 6 (2019) 5, pp. 5804-5809.
- [15] Carević, I., Naletilić, H., Štirmer, N.: Life cycle analysis of reinforced concrete floor slab through three different waste management scenarios, Građevinar, 75 (2023) 8, pp. 765-773, <https://doi.org/10.14256/JCE.3696.2023>
- [16] Yan, X., Chen, P., Al-Fakih, A., Liu, B., Mohammed, B., Jin, J.: Experiments and mechanical simulation on bubble concrete: Studies on the effects of shape and position of hollow bodies mixed in concrete, Crystals, 11 (2021) 8, <https://doi.org/10.3390/cryst11080858>
- [17] Jamal, J., Jolly, J.: A study on structural behaviour of bubble deck slab using spherical and elliptical balls, International Research Journal of Engineering and Technology, 4 (2017) 5, pp. 2090-2095.
- [18] Mahdi, A.A., Ismael, M.A.: Structural behavior of hollow-core one-way slabs of high strength self-compacting concrete, International Journal of Engineering, 34 (2021) 1, pp. 39-45, <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.01a.05>
- [19] Thaar, S.A., Ali, N.H., Manal, A.A.: Structural behavior of reinforced concrete one-way slabs voided by polystyrene balls, Case Studies in Construction Materials, 11 (2019), <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00292>
- [20] Tuğrul Erdem, R., Berberoğlu, M., Gücüyen, E.: Investigation of concrete slabs made with cement-based mortars under impact loads, Građevinar, 75 (2023) 2, pp. 117-127, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.3159.2021>
- [21] Al-Haddad, D.B., Jokhio, G.A.: Durability design approach and exposure conditions in Eurocode, British Standard and ISO 13823 standards: A review, BUIID Doctoral Research Conference 2023 Multidisciplinary Studies.
- [22] Devi, S.S., Mrithulaa, R., Gihath, M.A., Kumar, S., Mydeen, Y.A.: An investigational study on variable volume bubble slab under static loading and comparison with packed volume slab, International Journal of Advanced Research in Science and Engineering, 12 (2023) 4, pp. 172-183.
- [23] Ashna, T., Febeena, K.K., Jahfar, P.A., Anna, B.: An experimental study on flexural strength of bubble deck slab, International Research Journal of Engineering and Technology, 6 (2019) 5, pp. 5804-5809.
- [24] Mahdi, A.S., Mohammed, S.D.: Structural behaviour of bubble deck slab under uniformly distributed load, Civil Engineering Journal, 7 (2021) 2, pp. 304-319, <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091655>
- [25] Devi, S.S., Mrithulaa, R., Gihath, M.A., Kumar, S., Mydeen, Y.A.: An investigational study on variable volume bubble slab under static loading and comparison with packed volume slab, International Journal of Advanced Research in Science and Engineering, 12 (2023) 4, pp. 172-183.
- [26] Lakshmikanth, L., Poluraju, P.: Performance of structural behaviour of bubble deck slab: A review, International Journal of Recent Technology and Engineering, 7 (2019) 6, pp. 865-870.