

Primljen / Received: 1.2.2022.

Ispravljen / Corrected: 24.8.2022.

Prihvaćen / Accepted: 29.12.2022.

Dostupno online / Available online: 10.7.2023.

Mehanička svojstva morta s dodatkom aditiva EarthZyme

Autori:



Doc.dr.sc. **Mehmet Timur Cihan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Tekirdağ Namık Kemal, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
mehmetcihan@nku.edu.tr



Izv.prof.dr.sc. **Seyhan Yardımlı**, dipl.ing.arh.
Sveučilišta Okan u Istanbulu, Turska
Fakultet za umjetnost, dizajn i arhitekturu
Odsjek za arhitekturu
seyhan.yardimli@okan.edu.tr



Doc.dr.sc. **Burak Özşahin**, dipl.ing.građ.
Sveučilišta Kırklareli, Turska
Arhitektonski fakultet
burak.ozsahin@klu.edu.tr
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Esmâ Mihlayanlar**, dipl.ing.arh.
Sveučilišta Trakya, Turska
Arhitektonski fakultet
emihlayanlar@trakya.edu.tr

Prethodno priopćenje

Mehmet Timur Cihan, Seyhan Yardımlı, Burak Özşahin, Esmâ Mihlayanlar

Mehanička svojstva morta s dodatkom aditiva EarthZyme

Beton je najzastupljeniji građevni materijal na svijetu. Međutim, zbog visoke razine emisije CO₂ iz proizvodnje cementa, njegova se upotreba dovodi u pitanje, te ga se pokušava poboljšati. Za poboljšanje svojstava betona primjenjuju se različiti kemijski aditivi. Enzimi su organski materijali i posebno su favorizirani posljednjih godina zbog svoje niske cijene pri upotrebi u tradicionalnim metodama stabilizacije tla. U ovom se istraživanju primijenio enzim 'EarthZyme' kao aditiv mortu za žbuku te su se ispitali njegovi učinci na mehanička svojstva mortova. EarthZyme je u potpunosti biorazgradiv u prirodi i upotrebljava se za stabilizaciju tla. Izradom uzoraka morta s udjelima enzima od 0 %, 0,01 %, 0,02 %, 0,03 % i 0,04 %, utvrđeni su učinci dodatka enzima na mehanička svojstva morta (brzina ultrazvučnog impulsa (UPV), čvrstoća na savijanje f_f i tlačna čvrstoća f_c). Vrijednosti uzoraka morta dobivene pomoću ispitivanja rasprostiranjem varirale su u rasponu od 15 do 17 cm, pri čemu vrijednosti rastu s povećanjem udjela EarthZymea. Iako udio EarthZymea ne utječe značajno na mehanička svojstva uzoraka morta u ranoj starosti (3 dana), udio enzima smanjuje UPV i f_c , a u isto vrijeme poboljšava f_f kod starijih uzoraka (28 dana). Udio enzima nema značajan učinak na UPV i f_f , ali ima značajan učinak na f_c .

Ključne riječi:

EarthZyme, mort, brzina ultrazvučnog impulsa, tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, ANOVA

Research Paper

Mehmet Timur Cihan, Seyhan Yardımlı, Burak Özşahin, Esmâ Mihlayanlar

Mechanical properties of mortars with EarthZyme additive

Concrete is the most widely used building material in the world. However, owing to the high CO₂ emissions from the production of cement, its use has been questioned, and attempts have been made to improve it. Various chemical additives are being used to improve concrete properties. Enzymes are organic materials and have been especially favoured in recent years owing to their low costs when used in traditional soil stabilisation methods. This study used the 'EarthZyme' enzyme as a plaster mortar additive and investigated its effects on the mechanical properties of mortars. EarthZyme completely biodegrades in nature and is used for soil stabilisation. By producing mortar specimens with additive enzyme ratios of 0 %, 0.01 %, 0.02 %, 0.03 %, and 0.04 %, the effects of the enzyme additions on the mechanical properties of the mortars (ultrasonic pulse velocity UPV, flexural strength f_f and compressive strength f_c) were determined. The flow table values of the mortar specimens in the flow table test varied within the range of 15–17 cm. According to the results, the flow table values of the mortars increase with an increasing addition rate of EarthZyme. Although the additive ratio of the EarthZyme does not significantly affect the mechanical properties of mortars at early ages (3 days), the enzyme addition ratio reduces the UPV and f_c while improving f_f at late ages (28 days). The enzyme addition ratio has no significant effect on the UPV and f_f but has a significant effect on f_c .

Key words:

EarthZyme, mortar, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, flexural strength, ANOVA

1. Uvod

Beton je najzastupljeniji građevni materijal u Turskoj i svijetu zahvaljujući dostupnosti njegovih komponenata, općenitosti proizvodnih tehnologija, otpornosti na požar i utjecaj okoliša, relativno niskoj cijeni, mogućnosti proizvodnje u željenom obliku jednostavnom tehnologijom itd. [1-3]. Međutim, velike količine CO₂ koje se ispuštaju u atmosferu tijekom proizvodnje betona, upotreba velikih količina energije u takvoj proizvodnji i zagađenje okoliša rezultiralo je stajalištima koja dovode u pitanje upotrebu betonskih materijala. Procjenjuje se da je industrija cementa odgovorna za 6-7 % ukupnog CO₂ koji se ispušta u atmosferu [4, 5]. Prvi korak u postizanju održivog, zdravog okoliša za život i sprječavanje nepovoljnih promjena (kao što je porast globalnog zatopljenja zbog povećanja emisija stakleničkih plinova) jest odabir i razvoj građevnih materijala u skladu s mogućnostima koje pruža tehnologija gradnje [6]. Vrste cementa i veziva koji se primjenjuju u cementnim kompozitima ponovno se ispituju zbog zabrinutosti za okoliš. Provede se istraživanja o materijalima i aditivima koji se primjenjuju kao komponente betona; u tom kontekstu nastoji se poboljšati svojstva betona i proizvesti ekološki prihvatljiviji beton dodavanjem novih materijala u njegov sastav [4, 5]. Neprekidno se provode istraživanja kako bi se proizvele održive i ekološki manje štetne vrste betona s poboljšanom trajnošću, obradivošću itd., upotrebom različitih aditivnih materijala [7-14].

Poboljšanje mehaničkih svojstava ovih sve češće upotrebljivanih cementnih kompozita kako bi se zadovoljile novonastale stambene potrebe zbog rasta broja stanovništva, smanjenje potrošnje energije i njezina proizvodnja na način koji manje šteti okolišu iznimno su važna pitanja za sadašnjost i budućnost.

EarthZyme je enzim koji se često primjenjuje za poboljšanje stabilizacije tla i smanjenje prašine na zemljanim cestama. Upotreba EarthZymea za poboljšanje svojstava mortova bila je glavni predmet ovog istraživanja, ali ispituju se i aditivi koji se primjenjuju u betonu i mortu (osim osnovnih komponenti) i razine njihovog učinka na svojstva betona i morta. U skladu s tim, ovo je istraživanje ispitalo učinke upotrebe EarthZyme materijala, koji se najčešće primjenjuje u proizvodnji mortova, na mehanička svojstva takvih mortova.

2. EarthZyme

Enzimi su biološki katalizatori koji se nalaze u svim živim organizmima. Oni su organski materijali i većinom se isporučuju kao koncentrirane tekućine. Dobivaju se ekstrakcijom iz biljaka i životinja, uključujući mikroorganizme, upotrebom odgovarajućih otapala [15]. Enzimi su posljednjih godina favorizirani zbog svoje niske cijene prilikom primjene u tradicionalnim metodama stabilizacije tla. Upotrebljavaju se za poboljšanje svojstava različitih slojeva gornje konstrukcije te drugim primjenama na tlu kao što je vezivanje [16, 17]. Pretpostavlja se da enzimi djeluju kao katalizatori, tj. povećavaju brzinu kemijskih reakcija, a nisu dio konačnog proizvoda. Vežu se na veće organske molekule

kako bi formirali reaktantnog posrednika. U tlu ovaj posrednik izmjenjuje ione sa strukturom gline, razbijajući rešetku gline i zaustavljajući apsorpciju vode [16]. EarthZyme je netoksični stabilizator tla koji se primjenjuje u glinenim tlima za smanjenje troškova održavanja cesta; poboljšava kompresiju i povećava vrijednosti čvrstoće. Tijekom procesa kompresije mješavine, EarthZyme smanjuje optimalne vrijednosti udjela vode i povećava vrijednosti suhe gustoće. Površinski aktivne tvari olakšavaju ionske promjene povećanjem difuzije ionskih otopina u kapilarnu strukturu tla [18]. EarthZyme je biorazgradiv dok obavlja svoju enzimsku funkciju. Konkretno, 82 % EarthZymea biorazgradi se unutar 14 dana, a gotovo se 100 % biorazgradi unutar 28 dana. Kod staza i površina tretiranih EarthZymeom ne dolazi do kemijske, ultraljubičaste ili bilo koje druge degradacije integriteta tijekom vremena [19].

Yardımlı i sur. [20] upotrebljavali su EarthZyme i aditive na bazi polimera za poboljšanje otpornosti materijala tla, koji se upotrebljavaju u građevinama od nepečene opeke, na vodu i pritisak. Proveli su ispitivanja pritiska i apsorpcije vode kako bi usporedili uzorke s enzimima i polimerima i čiste uzorke na kraju razdoblja od 30 dana. S obzirom na to da tlo mora sadržavati 5 % do 30 % gline i mulja kako bi enzimi djelovali kao aditivi, zaključeno je da su tlačne čvrstoće uzoraka s enzimskim i polimernim aditivima povećane u odnosu na one bez aditiva. Osim toga, povećala se njihova vodootpornost. Stoga su aditivi pozitivno utjecali na ispitivana svojstva nepečene opeke.

Abdulkareem i sur. [18] ispitali su upotrebu EarthZymea (nanomaterijala na bazi tekućine) kao aditiva prašini iz cementne peći za poboljšanje svojstava tla. U tu svrhu stvorili su pjeskovite i sitnozrnate mješavine tla EarthZyme s aditivom i bez njega i prašine iz cementne peći. Učinkovitost aditiva u poboljšanju tla ispitana je provođenjem eksperimenta na pripremljenim mješavinama. Utvrđeno je da je proces poboljšanja pomoću enzima učinkovitiji kod tla s visokim udjelom gline.

Društvo za rudarstvo ugljena Shengli testiralo je rudarsku cestu dužine 500 m izgrađenu pomoću EarthZymea i postiglo dobre rezultate. To je rezultiralo cestom dugom 10 km izgrađene 2014. godine pomoću EarthZymea, te su cestu kasnije proučavali Shude i sur. [21] Utvrđeno je da je rudarska cesta izrađena pomoću EarthZymea otpornija od nedopirane ceste. Osim toga, zbog toga što je ravna, dolazi do velikog smanjenja prašine na cesti, potrošnje goriva i trošenja guma vozila koja se kreću cestom.

Khan i sur. [16] proveli su ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti za procjenu tlačne čvrstoće uzoraka dopiranog tla (sedimentnog tla) s tri različita tipa enzima. Različiti udjeli dopiranih i nedopiranih uzoraka tla pripremljeni su i njegovani četiri mjeseca, a zatim potopljeni u vodu četiri dana prije eksperimenta. Rezultati eksperimenta na uronjenim uzorcima pokazali su da dopirani uzorci nisu imali značajno povećanje tlačne čvrstoće u usporedbi s nedopiranim uzorcima.

Khan i Taha [15] upotrijebili su enzime proizvedene pod različitim trgovačkim nazivima u tri različite zemlje za poboljšanje tla na Sveučilištu Kebangsaan u Maleziji. Prema rezultatima ispitivanja

Tablica 1. Kemijski sastav i fizikalna svojstva cementa

Kemijski sastav [%]											
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl	Na ₂ O/K ₂ O	Slobodno vapno	Netopljivi ostatak	Gubitak pri izgaranju	Neidentificirano
62,62	19,88	5,23	3,60	0,85	3,23	0,03	0,58/0,74	1,20	0,96	2,45	0,79
Fizikalna svojstva											
Relativna gustoća [g/cm ³]	Vrijeme vezivanja (Vicat) [min]		Postojanost volumena (Le Chatelier) [mm]	Finoća							
	Početak vezivanja	Kraj vezivanja		Blaineova specifična površina [cm ² /g]							
3,16	119	170	1	3550							

Tablica 2. Udjeli materijala sastavnih dijelova morta (za šest uzoraka)

Udio enzima (EAR) [%]	Cement [g]	Standardni pijesak [g]	Voda [g]	Enzim [g]
0,00	900	2700	450	0,00
0,01	900	2700	450	0,09
0,02	900	2700	450	0,18
0,03	900	2700	450	0,27
0,04	900	2700	450	0,36

triju različitih enzima primijenjenih u dva različita udjela, otkrili su da iako je došlo do blagih poboljšanja u svojstvima kompresije i tlačne čvrstoće dopiranog tla u usporedbi s nedopiranim tlom, ta su poboljšanja bila neznatna.

Zidan i sur. [22] proučavali su upotrebu enzima u okviru poboljšanja tla u cestogradnji i istraživali elastični modul tla dopiranog enzimima. Vrijednosti elastičnih modula povećale su se za 40 % u uzorcima dopiranim enzimima u usporedbi s onima s nedopiranim tlom. Ovaj rezultat pokazao je vrlo značajno poboljšanje kvalitete u smislu čvrstoće tla.

3. Materijali i metode

U istraživanju su ispitivana mehanička svojstva mortova s dodatkom enzima pomoću eksperimenata provedenih u laboratoriju. Učinci dodatka enzima na svojstva morta (brzina ultrazvučnog impulsa (engl. *ultrasonic pulse velocity* - UPV), čvrstoća na savijanje (f_r), i tlačna čvrstoća (f_c)) statistički su utvrđeni iz dobivenih numeričkih podataka.

3.1. Materijal

Uzorci morta pripremljeni su upotrebom pitke vode iz slavine, standardnog referentnog pijeska (u skladu s turskom normom - Europska norma / TS EN 196-1 [23], i cementa CEM I 42.5 R. Kemijska i fizikalna svojstva cementa prikazana su u tablici 1.

Enzim upotrijebljen u istraživanju je EarthZyme, a primjenjuje se kao aditiv mortu za žbuku. Radi se o komercijalnom

proizvodu društva Cypher International Ltd. (EarthZyme HS kod: 3824 9099). Prema navodima proizvođača, EarthZyme može izazvati blagu iritaciju kože i očiju nakon kontakta. Pokazuje vrhunsku biorazgradivost u anaerobnim uvjetima, kao što je definirano metodama Agencije za zaštitu okoliša SAD-a (40 CFR dio 796.3180), te je netoksičan i bez patogena. Kao što je navedeno, EarthZyme je aditiv koji se primjenjuje u izgradnji zemljanih cesta. Proizvođač EarthZyMEA nastoji proizvesti vodeća ekološka rješenja za kontrolu prašine i stabilizaciju tla [19].

3.2. Metoda

U okviru istraživanja, udio enzima (EAR) (prema masi veziva) i starost uzorka određeni su kao varijable učinka, a UPV, čvrstoća na savijanje (f_r), i tlačna čvrstoća (f_c) određene su kao varijable odgovora. Intervali varijacije za udio enzima odabrani su kao 0 %, 0,01 %, 0,02 %, 0,03 % i 0,04 %, a intervali za starost uzorka bili su 3, 7 i 28 dana.



Slika 1. Proizvodnja uzoraka

Za određivanje razine učinka varijabli učinka na varijable odgovora, ukupno je proizvedeno 135 uzoraka pravokutne prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm prema normi TS EN 196-1 (slika 1.) [23]. Vrijednosti uzoraka morta (TS EN 1015-3/A2) [24] dobivene ispitivanjem rasprostiranjem (slika 2) varirale su u rasponu od 15 do 17 cm, a vrijednosti morta dobivene ispitivanjem rasprostiranjem imale su tendenciju povećanja s povećanjem udjela enzima. Udjeli materijala upotrijebljenih u proizvodnji morta i vrijednosti dobivene ispitivanjem rasprostiranjem prikazane su u tablicama 2. i 3.



Slika 2. Ispitivanje rasprostiranjem

Kako bi se odredile razine učinka glavnih i interakcijskih uvjeta varijabli učinka na varijable odgovora, u planu eksperimenta odabrano je 15 točaka izvođenja. Vrijednosti za svaku točku izvođenja dobivene su srednjim vrijednostima rezultata ispitivanja devet uzoraka. U odabranim intervalima varijacije, razine učinka varijabli učinka na varijable odgovora određene su na temelju analize varijable (ANOVA).

Vrijednosti UPV varijabli odgovora dobivene su dijeljenjem duljine uzorka (160 mm) s vremenom ultrazvučnog impulsa (slika 3.a), kako je određeno prema TS EN 12504-4 [25]. Čvrstoće na savijanje uzoraka morta određene su pomoću jednadžbe $f_r = 1,5 \cdot F_f \cdot l/b^3$ (u jednadžbi je b duljina stranice kvadratnog presjeka prizme u mm, F_f je maksimalno

opterećenje primijenjeno na sredinu prizme u njutnima, a l je udaljenost između nosača valjka u mm) prema TS EN 196-1 [23] primjenom opterećenja u tri točke (slika 3.b). Tlačna čvrstoća izračunana je na temelju jednadžbe $f_c = F_c/1600$ (F_c je maksimalno opterećenje u njutnima, a 1600 je površina ploča u mm²) prema TS EN 196-1 [23] pri upotrebi polovica prizme podijeljenih na dva dijela tijekom ispitivanja čvrstoće na savijanje (slika 3.c).

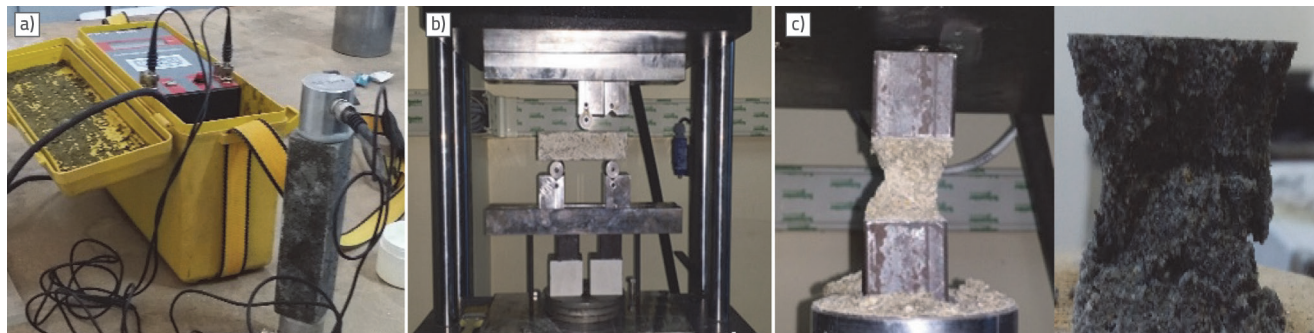
4. Rezultati eksperimenta

Kao što je navedeno, u planu eksperimenta proizvedeno je ukupno 135 uzoraka morta za 15 točaka izvođenja. Točke izvođenja i rezultati eksperimenta prikazani su u tablici 3., a sažeci plana eksperimenta za faktore i odgovore prikazani su u tablici 4.

Razine učinka glavnih i interakcijskih elemenata varijabli učinka na varijable odgovora određene su prema ANOVA. Osim toga, dobiveni su modeli za predviđanje varijabli odgovora ovisno o varijablama učinka. Štoviše, interakcija, grafički prikaz i 3D grafika elemenata s visokim razinama učinka dobiveni su pomoću probnog programa Design Expert Version 13 [26]. Rezultati analize varijable za UPV, f_r i f_c prikazani su u tablici 5.

Prema rezultatima analize varijable, F-vrijednosti modela dobivenih za UPV, f_r i f_c su 29,83 (p-vrijednost < 0,0001), 20,83 (p-vrijednost = 0,0001), odnosno 45,66 (p-vrijednost < 0,0001). P-vrijednosti elemenata u modelu manje su od 0,05, što pokazuje da su elementi modela značajni (značajno utječu na varijablu odgovora). P-vrijednosti veće od 0,10 pokazuju da su elementi modela beznačajni (ne utječu značajno na varijablu odgovora) [26]. Iako elementi B, AB, A² i B² imaju značajne učinke na UPV, element A u ovom slučaju nema značajan učinak. Elementi B i B² imaju značajne učinke na f_r , dok elementi A, AB i A² nemaju. Za f_c , elementi A, B i B² su značajni elementi modela, a elementi AB i A² nisu.

Primijenjene su jednadžbe (modeli) za dobivanje predviđenih vrijednosti varijabli odgovora u odabranim intervalima varijacije svake varijable učinka. Modeli za UPV, f_r i f_c izraženi su u jednadžbama 1, 2, odnosno 3. Rezultati statistike prikladnosti za varijable odgovora prikazani su u tablici 6.



Slika 3. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa: a) UPV; b) f_r ; c) f_c

Tablica 3. Točke izvođenja

Izvođenje	Faktor 1	Faktor 2	Odgovor 1	Odgovor 2	Odgovor 3	Vrijednost dobivena ispitivanjem rasprostiranjem [cm]
	A: EAR [%]	B: Starost uzorka [Dan]	Brzina ultrazvučnog impulsa (UPV) [km/s]	f_f [MPa]	f_c [MPa]	
1	0,00	3	4,15	5,57	29,61	15,5
2	0,00	7	4,28	6,30	34,62	15,5
3	0,00	28	4,42	7,24	42,06	15,5
4	0,01	3	4,19	5,65	31,02	15,5
5	0,01	7	4,33	7,05	37,64	15,5
6	0,01	28	4,45	7,39	40,26	15,5
7	0,02	3	4,22	5,55	30,19	16,0
8	0,02	7	4,39	6,51	35,87	16,0
9	0,02	28	4,53	6,82	39,32	16,0
10	0,03	3	4,20	5,70	29,53	16,4
11	0,03	7	4,32	6,53	34,38	16,4
12	0,03	28	4,39	7,40	39,94	16,4
13	0,04	3	4,20	5,41	30,40	16,6
14	0,04	7	4,33	6,43	33,95	16,6
15	0,04	28	4,33	7,56	38,56	16,6

Tablica 4. Sažetak plana eksperimenta

Faktor	Naziv	Jedinice	Tip	Min.*	Maks.*	Nisko kodirano	Visoko kodirano	Srednja vrijednost	SD*		
A	EAR	%	Numerički	0,00	0,04	-1 ↔ 0,00	+1 ↔ 0,04	0,020	0,015		
B	Starost uzorka	Dan	Numerički	3,00	28,00	-1 ↔ 3,00	+1 ↔ 28,00	12,67	11,35		
Odgovor	Naziv	Jedinice	Zapažanja	Analiza	Min.*	Maks.*	Srednja vrijednost	SD*	Udio	Pretvorba	Model
R1	UPV	km/s	15	Polinomijalna	4,11	4,53	4,32	0,108	1,09	Nema	Kvadratni
R2	f_f	MPa	15	Polinomijalna	5,41	7,56	6,47	0,758	1,40	Nema	Kvadratni
R3	f_c	MPa	15	Polinomijalna	29,53	42,06	35,16	4,320	1,42	Nema	Kvadratni

Min.* - minimum, Maks.* - maksimum, SD* - standardna devijacija

Tablica 5. Analiza varijance (ANOVA) za varijable odgovora

	Izvor	Zbroj kvadrata	df*	Srednja vrijednost kvadrata	F-vrijednost	p-vrijednost	Značajnost
Brzina ultrazvučnog impulsa - UPV	Model	0,1546	5	0,0309	29,83	< 0,0001	značajno
	A - EAR	0,0008	1	0,0008	0,7381	0,4126	nije značajno
	B - starost uzorka	0,1335	1	0,1335	128,77	< 0,0001	značajno
	AB	0,0081	1	0,0081	7,84	0,0207	značajno
	A ²	0,0115	1	0,0115	11,11	0,0088	značajno
	B ²	0,0287	1	0,0287	27,64	0,0005	značajno
	Ostatak	0,0093	9	0,0010			
	Ukupno	0,1640	14				

df* - smanjenje amplitude

Tablica 5. Analiza varijance (ANOVA) za varijable odgovora - nastavak

	Izvor	Zbroj kvadrata	df*	Srednja vrijednost kvadrata	F-vrijednost	p-vrijednost	Značajnost
Čvrstoća na savijanje - f_r	Model	7,39	5	1,48	20,83	0,0001	značajno
	A - EAR	0,0065	1	0,0065	0,0918	0,7688	nije značajno
	B - starost uzorka	7,27	1	7,27	102,38	< 0,0001	značajno
	AB	0,0571	1	0,0571	0,8039	0,3933	nije značajno
	A ²	0,0051	1	0,0051	0,0724	0,7939	nije značajno
	B ²	1,48	1	1,48	20,91	0,0013	značajno
	Ostatak	0,6389	9	0,0710			
	Ukupno	8,03	14				
Tlačna čvrstoća - f_c	Model	251,36	5	50,27	45,66	< 0,0001	značajno
	A - EAR	6,00	1	6,00	5,45	0,0444	značajno
	B - starost uzorka	243,86	1	243,86	221,50	< 0,0001	značajno
	AB	2,09	1	2,09	1,89	0,2020	nije značajno
	A ²	0,6339	1	0,6339	0,5758	0,4674	nije značajno
	B ²	36,59	1	36,59	33,24	0,0003	značajno
	Ostatak	9,91	9	1,10			
	Ukupno	261,27	14				

*df - smanjenje amplitude

Tablica 6. Rezultati statistike prikladnosti

Odgovor	Standardna devijacija	Srednja vrijednost	Koeficijent varijacije [%]	R ²	Prilagođeni R ²	Predviđeni R ²	Odgovarajuća preciznost
UPV [km/s]	0,0322	4,32	0,7560	0,9431	0,9115	0,8558	16,2958
f_r [MPa]	0,2664	6,47	4,12	0,9205	0,8763	0,7813	11,2985
f_c [MPa]	1,05	35,16	2,98	0,9621	0,9410	0,8880	17,6668

$$UPV = 3,9970 + 4,4297 \cdot A + 0,0490 \cdot B - 0,1501 \cdot AB - 165,6066 \cdot A^2 - 0,0012 \cdot B^2 \quad (1)$$

$$f_r = 4,7247 - 0,2174 \cdot A + 0,3248 \cdot B + 0,3978 \cdot AB - 110,6461 \cdot A^2 - 0,0085 \cdot B^2 \quad (2)$$

$$f_c = 25,3402 + 40,2266 \cdot A + 1,7567 \cdot B - 2,4048 \cdot AB - 1228,5094 \cdot A^2 - 0,0424 \cdot B^2 \quad (3)$$

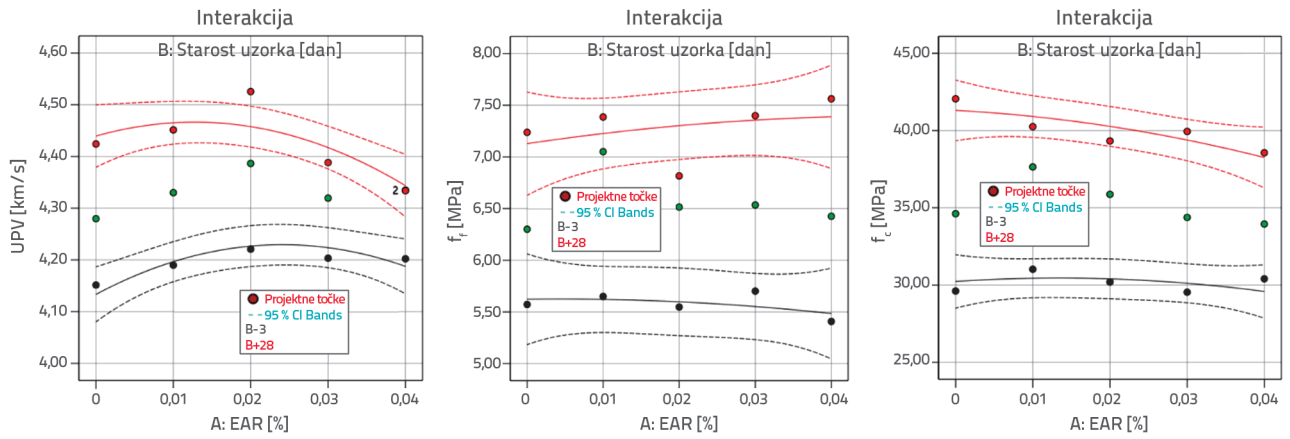
R² vrijednosti za varijable odgovora (UPV, f_r i f_c) iznose 0,94, 0,92, odnosno 0,96. Prilagođena R² vrijednost pokazuje da i usklađenost dobivenog modela i elementi dodani modelu imaju značajne učinke na varijablu odgovora [26]. U idealnom slučaju, prilagođena R² vrijednost trebala bi biti visoka i ne bi trebala pokazivati velika odstupanja od R² vrijednosti. Razlike između R² i prilagođene R² vrijednosti modela dobivenih za UPV, f_r i f_c iznose 0,03, 0,04, odnosno 0,02. Osim toga, prihvatljive razine prilagođenih R² i procijenjenih R² vrijednosti (prilagođena R² -

predviđena R² = 0,20 [26] pokazuju da je raspon varijabilnosti (pogreška procjene) u novim podacima dobivenim iz modela odgovarajući. Prilagođene R² - predviđene R² vrijednosti modela dobivenih za UPV, f_r i f_c iznose 0,056, 0,095, odnosno 0,053.

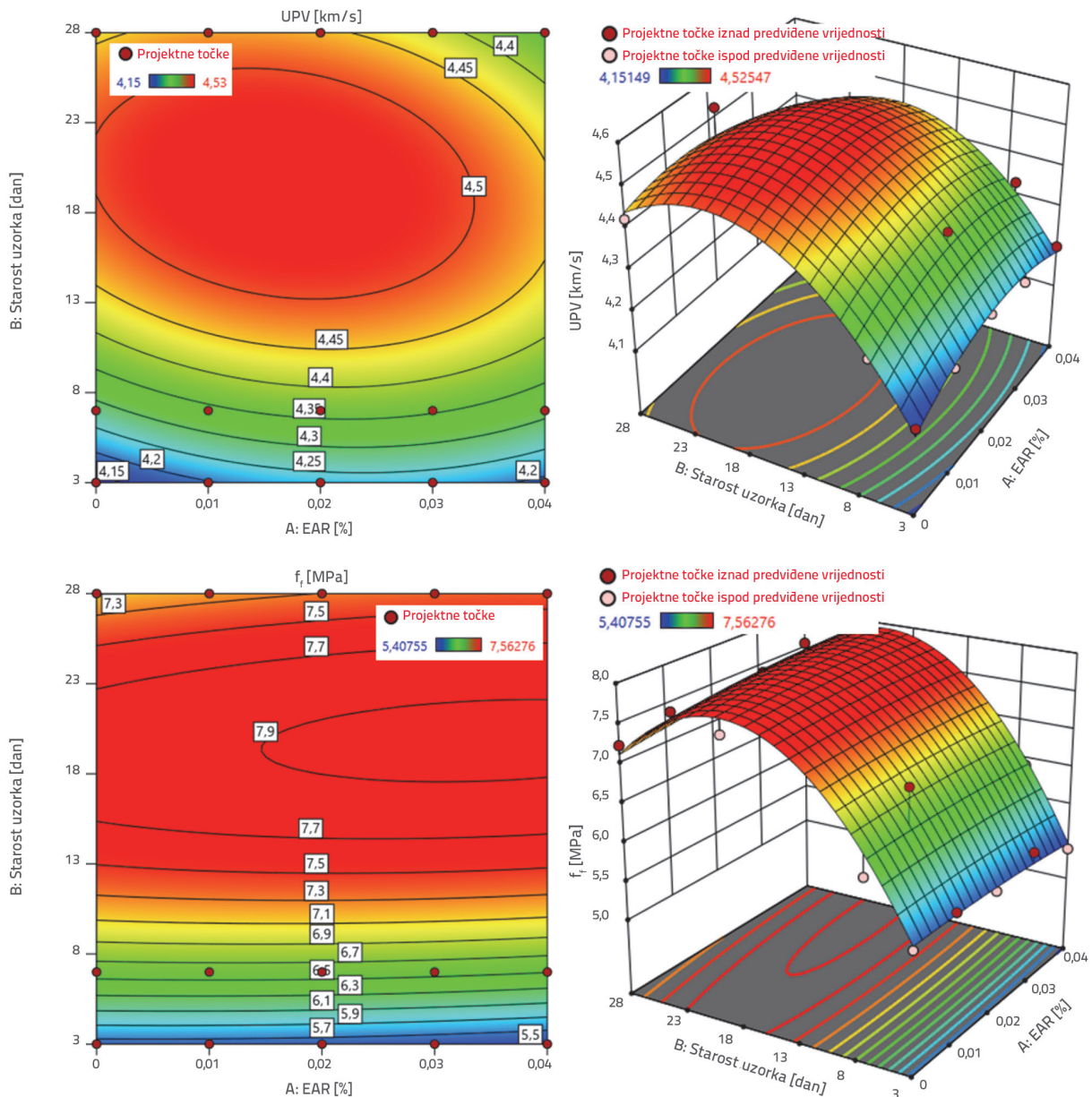
Odgovarajuća vrijednost preciznosti upotrebljava se za izračunavanje omjera signala i šuma; ova je vrijednost veća od 4 [26]. Činjenica da odgovarajuće vrijednosti preciznosti za sve varijable odgovora (UPV; 16,296, f_r ; 11,299, i f_c ; 17,667) premašuju željenu vrijednost označava da modeli stvaraju odgovarajuće (dovoljne) signale unutar predviđenog prostora (unutar odabranih intervala varijacije).

Dijagrami interakcije za UPV, f_r i f_c , ovisno o udjelu enzima pri maksimalnoj i minimalnoj starosti uzorka, prikazani su na slici 4.

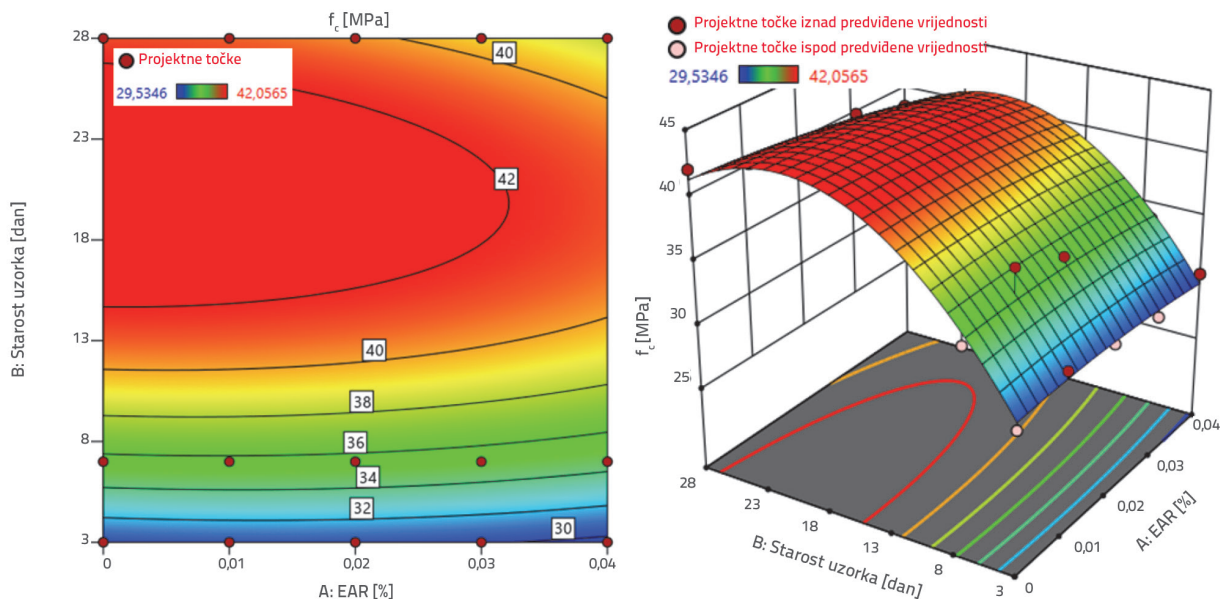
Grafički prikazi interakcija pokazuju da trodnevne f_r i f_c vrijednosti ne variraju s povećanjem EAR-a, ali vrijednost UPV-a ima tendenciju rasta. Stoga se može reći da povećanje udjela



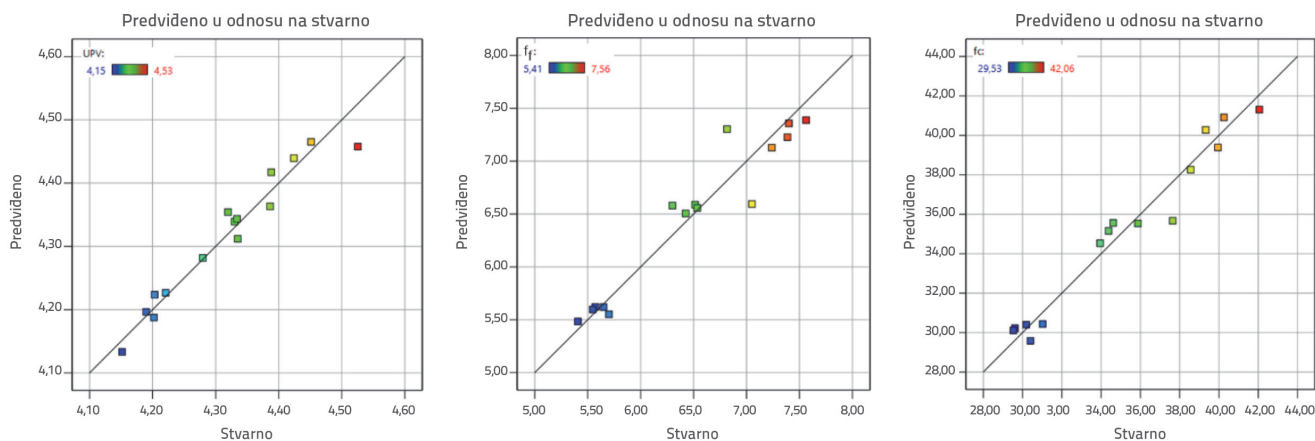
Slika 4. Dijagrami interakcije UPV, f_r i f_c



Slika 5. Grafički i 3D prikazi za UPV, f_r i f_c



Slika 5. Grafički i 3D prikazi za UPV, f_r i f_c - nastavak



Slika 6. Predviđene i stvarne vrijednosti varijabli odgovora

enzima kod uzoraka u ranoj starosti smanjuje broj šupljina u mortu. U uzorcima starima 28 dana, vrijednosti UPV-a i f_c smanjuju se s povećanjem EAR-a, a f_r vrijednost blago raste.

Grafički i 3D prikazi za UPV, f_r i f_c varijable odgovora prikazani su na slici 5. Na slici 5. može se uočiti da odzivne površine i grafički prikazi za UPV pokazuju jednostavan maksimum, ali za f_r i f_c prikazuju rast. Predviđene i stvarne vrijednosti varijabli odgovora dobivene kao rezultat eksperimenta prikazane su na slici 6.

Predviđene vrijednosti dobivene iz modela generiranih za varijable odgovora preklapaju se sa stvarnim vrijednostima (rezultatima eksperimenta) na vrlo visokoj razini (slika 5.).

5. Zaključak

Upotrebljivost materijala s dodatkom enzima (EarthZyme) koji se vrlo učinkovito primjenjuje u zbijanju tla u mortovima

određena je uzimajući u obzir razine učinka EAR-a i varijable učinka starosti uzorka na UPV, f_r i f_c varijable odgovora. Rezultati su sažeti u nastavku.

- S povećanjem EAR-a, povećavaju se vrijednosti morta dobivene ispitivanjem rasprostranjem.
- Kod uzoraka u ranoj starosti (npr. 3 dana), EAR ne utječe značajno na svojstva morta.
- Kod starijih uzoraka (npr. 28 dana), EAR smanjuje UPV i f_c uz povećanje f_r .
- EAR nema značajan učinak na UPV i f_r (p-vrijednost UPV, = 0,4126, p-vrijednost f_r = 0,7688), ali ima značajan učinak na f_c (p-vrijednost f_c = 0,0444).
- Starost uzorka značajno utječe na UPV, f_r i f_c (p-vrijednost < 0,0001) za sve cementne kompozite.
- Kvadratni modeli dobiveni za varijable odgovora, ovisno o odabranim intervalima varijacije varijabli učinka, pokazuju vrlo visoku točnost procjene ($R^2 > 0,92$). Prema generiranim

modelima, stvarne i predviđene vrijednosti varijabli odgovora vrlo su slične (slika 6.).

- Odzivne površine i grafički prikazi za UPV pokazuju jednostavan maksimum, ali i porast za f_t i f_c .

Zahvala

Autori zahvaljuju Melihu Samurkašu na osiguranju EarthZyme (predmet eksperimentalnog rada u ovom istraživanju) i omogućio komunikaciju s društvom Akçansa Cement u nabavci čeličnih kalupa.

LITERATURA

- [1] Güçlüer, K., Günaydın, O.: Microstructures investigation of mineral additive concretes, *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 34 (2019) 1, pp. 83-90, <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.601317>
- [2] Erdoğdu, Ş., Kurbetçi, Ş.: Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri, *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426 (2003) 4, pp. 115, <https://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/253.pdf>
- [3] Topçu, İ.B., Canbaz, M., Karakurt, C.: Utilization of chemical admixtures for concrete production, *Journal of Polytechnic*, 9 (2006) 1, pp. 59-63, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/384549>
- [4] Meyer, C.: The greening of the concrete industry, *The 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM 13)*, Jeju, Korea, September 8-12 (2013), pp. 79-92, http://www.i-asem.org/publication_conf/asem13/003.pdf
- [5] Yaphary, Y.L., Lam, R.H.W., Lau, D.: Chemical technologies for modern concrete production, *In Modern Building Materials, Structures, and Techniques, Procedia Engineering* 172 (2017), pp. 1270-1277, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.150>
- [6] Singh, C.S.: Green construction: analysis on green and sustainable building techniques, *Civil Engineering Research Journal*, 4 (2018) 3, pp. 107-112, <https://doi.org/10.19080/CERJ.2018.04.555638>
- [7] Ekinci, D.: Foamed Concrete in Turkey, *Architecture*, 376 (2014), <http://www.mimarlikdergisi.com/index.cfm?sayfa=mimarlik&DergiSayi=390&ReclD=3355>
- [8] Liu, L., Chen, J., Qu, Y., Xu, T., Wu, H., Huang, G., Zhou, X., Yang, L.: A foamed cement blocks with paraffin/expanded graphite composite phase change solar thermal absorption material, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110038>
- [9] Muntean, R., Grădinaru, C.M., Şerbănoiu, A.A., Sârbu, G.C.: Improved concrete blocks with dispersed fibers as contribution for environmental protection, *Environmental Engineering and Management Journal*, 19 (2020) 1, pp. 85-94, <https://doi.org/10.30638/eemj.2020.009>
- [10] Wang, X., Yuan, J., Wei, P., Zhu, M.: Effects of fly ash microspheres on sulfate erosion resistance and chlorine penetration resistance in concrete, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139 (2020), pp. 3395-3403, <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08705-8>
- [11] Drissi, S., Ling, T.C., Mo, K.H., Eddhahak, A.: A review of microencapsulated and composite phase change materials: Alteration of strength and thermal properties of cement-based materials, *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110 (2019), pp. 467-484, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.072>
- [12] Walach, D., Dybeł, P., Sagan, J., Gicala, M.: Environmental performance of ordinary and new generation concrete structures-a comparative analysis, *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (2019), pp. 3980-3990, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3804-2>
- [13] Campos, H.F., Klein, N.S., Filho, J.M., Bianchini, M.: Low-cement high-strength concrete with partial replacement of portland cement with stone powder and silica fume designed by particle packing optimization, *Journal of Cleaner Production*, 261 (2020), pp. 1-19, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121228>
- [14] Liu, H., Jin, J., Yu, Y., Liu, H., Liu, S., Shen, J., Xia, X., Ji, H.: Influence of halloysite nanotube on hydration products and mechanical properties of oil well cement slurries with nano-silica, *Construction and Building Materials*, 247 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118545>
- [15] Khan, T.A., Taha, M.R.: Effect of three bioenzymes on compaction, consistency limits and strength characteristics of a sedimentary residual soil, *Advances in Materials Science and Engineering*, June (2015), pp. 1-9, <https://doi.org/10.1155/2015/798965>
- [16] Khan, T.A., Taha, M.R., Firoozi, A.A.: California bearing ratio tests of enzyme-treated sedimentary residual soil show no improvement, *Sains Malaysiana*, 46 (2017) 8, pp. 1259-1267, <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2017-4608-11>
- [17] AbouKhadra, A., Zidan, A.F., Gabber, Y.: Experimental evaluation of strength characteristics of different Egyptian soils using enzymatic stabilizers, *Cogent Engineering*, 5 (2018) 1, pp. 1-11, <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1517577>
- [18] Abdulkareem, A.H., Eyada, S.O., Mahmood N.S.: Improvement of a subgrade soil by using EarthZyme and cement kiln dust waste, *Archives of Civil Engineering*, 67 (2021) 2, pp. 525-536, <https://doi.org/10.24425/ace.2021.137183>
- [19] Cypher International, 2021, EARTHZYME MSDS, Cypher International Ltd. 391 Campbell Street, Winnipeg, Manitoba R3N 1B6, Product Name: EarthZyme, HS code:3824 9099, http://www.eco-infrastructureolutions.com/web_documents/cypherearthzymemsds.pdf,
- [20] Yardımlı, S., Işık, A.B., Arslan, K., Samurkaş, M.: Enzyme and Polymer Contributions and Improvements in Adobe Materials, 9. International Earthbuilding Conference, USA, pg:256-269, 2017.
- [21] Shude, L., Hongwang, R., Yuejun, H., Rui, T.: Application of EarthZyme biological enzyme road building technology in field management of Shengli open-pit coal mine, *Safety in Coal Mines*, 46 (2015) 5, pp. 238-242, <https://doi.org/10.13347/j.cnki.mkaq.2015.05.067>
- [22] Zidan, A.F., Aboukhadra, A.A., Gaber, Y.: Enhancement of resilient modulus of cohesive soil using an enzymatic preparation, *[J]. Journal of Central South University*, 26 (2019) 9, pp. 2596-2608, <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4197-1>.

- [23] TS EN 196-1, Turkish Standard: Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength, Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey. 2016.
- [24] TS EN 1015-3/A2, Turkish Standard: Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey. 2007.
- [25] TS EN 12504-4, Turkish Standard.: Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey. 2012.
- [26] StatEase, Design-Expert v13, Design of Experiments (DOE) Made Easy, <https://www.statease.com/software/design-expert/> 23.01.2022