

Primljen / Received: 16.6.2025.

Ispravljen / Corrected: 17.9.2025.

Prihvaćen / Accepted: 30.10.2025.

Dostupno online / Available online: 10.2.2026.

Predviđanje savojne nosivosti djelomično obloženih kompozitnih greda pomoću strojnog učenja

Autori:



^{1,2}Prof.dr.sc. **Hongxin Liu**
Liuhx@aisa.com.cn



³**Ping Yang**
316376606@qq.com



^{1,2}Prof.dr.sc. **Yaming Li**
Liyam@aisa.com.cn



^{1,2}Prof.dr.sc. **Shuizhong Jia**
jiasz@aisa.com.cn



⁴Dr.sc. **Xiaomeng Xie**
xiexiaomeng2024@163.com
Autor za korespondenciju

¹ Šangajski institut za arhitektonski dizajn i istraživanje, d.o.o., Kina

² Šangajski istraživački centar za inženjerstvo prostorne strukture, Kina

³ Vladin centar za građevinske projekte okruga Kangbashi, Kina

⁴ Šangaj Jieyi Construction Technology Co., Ltd., Kina

Izvorni znanstveni rad

Hongxin Liu, Ping Yang, Yaming Li, Shuizhong Jia, Xiaomeng Xie

Predviđanje savojne nosivosti djelomično obloženih kompozitnih greda pomoću strojnog učenja

Radi prevladavanja ograničenja tradicionalnih metoda u ovome istraživanju ispitana je savojna nosivost djelomično obavijenih kompozitnih (PEC) greda velikog presjeka s različitim otvorima u hrptu pomoću eksperimentalnih ispitivanja i strojnog učenja (ML). Ispitivanja savijanjem u četirima točkama na uzorcima različitih presjeka i tipova otvora pokazala su vrlo dobru duktilnost (koeficijenti $> 4,0$), pri čemu su otvori u hrptu blago smanjili granicu popuštanja, ali bez znatnijeg gubitka nosivosti. Baza podataka s 15 parametara korištena je za treniranje i validaciju četiriju modela ML (RF, CatBoost, KNN, LightGBM). Model Random Forest pokazao je najveću točnost ($\approx 2,6$ % MAE). Primjenom analize Shapley unaprijeđena je interpretabilnost modela te su identificirani ključni parametri. Integracija objašnjivoga strojnog učenja znatno poboljšava točnost i razumljivost predviđanja savojne nosivosti PEC greda, nudeći učinkovit pristup za inteligentno projektiranje i procjenu konstrukcija.

Ključne riječi:

PEC grede, oblik otkazivanja, savojna nosivost, duktilnost, strojno učenje

Original research paper

Hongxin Liu, Ping Yang, Yaming Li, Shuizhong Jia, Xiaomeng Xie

Flexural capacity prediction of partially encased composite beams using machine learning

To address traditional limitations, this study investigated the flexural performance of large-section PEC beams with varied web openings using experiments and machine learning (ML). Four-point bending tests on specimens with different sections and openings demonstrated excellent ductility (coefficient > 4.0), although openings slightly reduced yield strength without significantly affecting overall performance. A database of 15 variables was used to train and validate four ML models (RF, CatBoost, KNN, LightGBM). The RF model achieved the highest accuracy (~ 2.6 % MAE). Shapley analysis improved interpretability by identifying key parameters. Integrating explainable ML substantially enhances the prediction accuracy and interpretability of PEC flexural capacity, offering a promising approach for intelligent structural design and assessment.

Key words:

PEC beams, failure mode, flexural capacity, ductility, machine learning

1. Uvod

Čelično-betonske kompozitne grede predstavljaju vrstu kompozitnih konstrukcija koje učinkovito kombiniraju visoku tlačnu čvrstoću betona i veliku vlačnu čvrstoću i duktilnost čelika [1-5]. Djelomično obavijeni kompozitni (engl. *Partially encased composite* - PEC) elementi formiraju se postavljanjem spojnica unutar pojasnice čeličnog profila i ulijevanjem betona oko njih [6-9]. Tijekom prefabrikacije PEC elementi zahtijevaju oblaganje samo s bočnih strana, čime se pojednostavljuje izvedba obloge. Prisutnost betona u pojasnicama učinkovito smanjuje rizik globalnog i lokalnog izvijanja, što znatno doprinosi povećanju ukupne nosivosti konstrukcije [10]. U usporedbi s tradicionalnim čeličnim elementima, PEC grede pokazuju izvrsnu otpornost na požar [11-13] te znatno bolja savojna i posmična svojstva [14, 15]. Brojni istraživači bavili su se mehaničkim svojstvima i primjenom PEC greda. Nakamura i dr. [16] utvrdili su da su savojna i posmična nosivost PEC greda 2,08 odnosno 2,98 puta veće u odnosu na tradicionalne I-profilne čelične grede. He i dr. [17, 18] eksperimentalno i numerički pokazali su da PEC grede s valovitim čeličnim hrptovima imaju veću posmičnu čvrstoću i modul loma te su predložili metodu proračuna posmične nosivosti. Nardin i dr. [19] ispitali su utjecaj različitih izvedbi na savojno ponašanje PEC greda i zaključili da vijci u donjoj pojasnici poboljšavaju modul loma. Kindmann i dr. [20] proveli su ispitivanja savijanja na 12 PEC greda različitih tipova presjeka i utvrdili da beton u pojasnicama povećava savojnu nosivost i krutost. Upotreba betona s većom vlačnom čvrstoćom dodatno poboljšava savojnu nosivost čelično-betonskih kompozitnih greda [21-23]. Hao i dr. [24] pokazali su da PEC-UHPC kompozitne grede imaju superiornu posmičnu nosivost. Zhao i dr. [25] predložili su dvije nove vrste PEC greda sa "sačastom" mrežom, ispitujući utjecaj otvora u stijenci, tlačno opterećenih pojasnicama, i ispunskog betona, ali sustavna istraživanja još uvijek nedostaju.

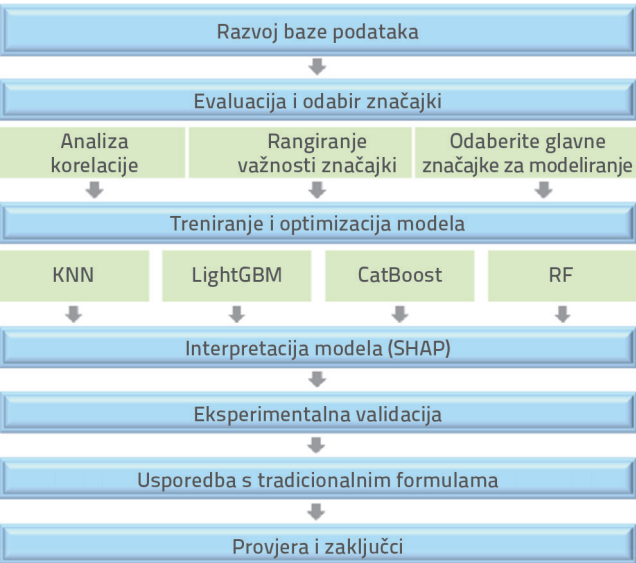
Unatoč poboljšanoj nosivosti i duktilnosti, metode proračuna savojne nosivosti PEC greda još uvijek nisu jasno definirane. Zato treba razviti naprednije analitičke postupke. Strojno učenje pokazuje znatne prednosti u obradi velikih baza podataka i prepoznavanju nelinearnih odnosa te poboljšava točnost filtriranjem manje važnih varijabli. Primjena ML metoda u građevinarstvu posljednjih je godina u porastu [26-32], no sustavna primjena strojnog učenja (engl. *machine learning* - ML) u predviđanju savojne nosivosti PEC greda još nije zabilježena. Radi rješavanja navedenog problema u ovome radu razvijen je model strojnog učenja za predviđanje savojne nosivosti PEC greda, interpretiran pomoću aditivnih objašnjenja *Shapley* (SHAP). Provedena su eksperimentalna ispitivanja greda s otvorima različitih oblika i veličina u hrptu radi provjere valjanosti modela. Nadalje, točnost predviđanja uspoređena je s postojećim proračunskim izrazima.

2. Metodologija

Kako bi se pružio jasan pregled istraživačkog procesa, cjelokupna metodologija primijenjena u ovome istraživanju sažeta je na slici 1. Postupak rada sastoji se od sljedećih koraka:

- 1. Izrada baze podataka:** Baza podataka od 152 PEC grede sastavljena je iz literature i eksperimentalnih programa, uključujući 15 ključnih geometrijskih, materijalnih i konstrukcijskih parametara.
- 2. Procjena i odabir značajki:** Provedeni su analiza korelacije i rangiranje važnosti značajki kako bi se identificirale najrelevantnije ulazne varijable, osigurala robusnost modela i izbjegla suvišnost podataka.
- 3. Treniranje i optimiranje modela:** Razvijena su četiri algoritma strojnog učenja (KNN, *LightGBM*, *CatBoost* i RF) te su podešena pomoću križne validacije i Bayesovova optimiranja radi poboljšanja točnosti predviđanja. To su:
 - *K-Nearest Neighbors* (KNN) [33]: jednostavan i učinkovit algoritam nadziranog učenja poznat po dobroj izvedbi u regresiji i klasifikaciji
 - *Light Gradient Boosting Machine* (*LightGBM*) [34]: okvir gradijentnog poboljšanja optimiran za brzo treniranje i nisku potrošnju memorije, dobro prilagođen velikim skupovima podataka
 - *CatBoost* [35]: algoritam temeljen na poboljšanju gradijenta dizajniran za smanjenje pristranosti pri obradi kategoriziranih značajki
 - *Random Forest* (RF) [36]: ansambl metoda koji kombinira više stabala odlučivanja radi smanjenja varijance i poboljšanja generalizacije.
- 4. Tumačenje modela:** Metoda SHAP primijenjena je za interpretaciju rezultata predviđanja i identifikaciju najutjecajnijih konstrukcijskih parametara koji određuju savojnu nosivost.
- 5. Eksperimentalna provjera:** Provedena su ispitivanja savijanjem u četirima točkama na PEC gredama s otvorima različitih konfiguracija u hrptu radi provjere praktične primjenjivosti predloženih modela.
- 6. Usporedba s tradicionalnim formulama:** Predviđanja iz modela strojnog učenja uspoređena su s rezultatima dobivenima primjenom konvencionalnih izraza teorije plastičnosti radi procjene točnosti i konzervativnosti.
- 7. Verifikacija i zaključci:** Uspoređena je prediktivna učinkovitost svih metoda te je identificiran najpouzdaniji model, uz raspravu o mogućoj primjeni u inženjerskoj praksi.

Takav strukturirani okvir osigurava transparentnost metodologije i omogućuje da svaki korak izravno doprinosi točnome i objašnjivome predviđanju savojne nosivosti PEC greda.



Slika 1. Dijagram cjelokupnog tijeka rada

3. Metoda procjene savojne nosivosti na temelju strojnog učenja

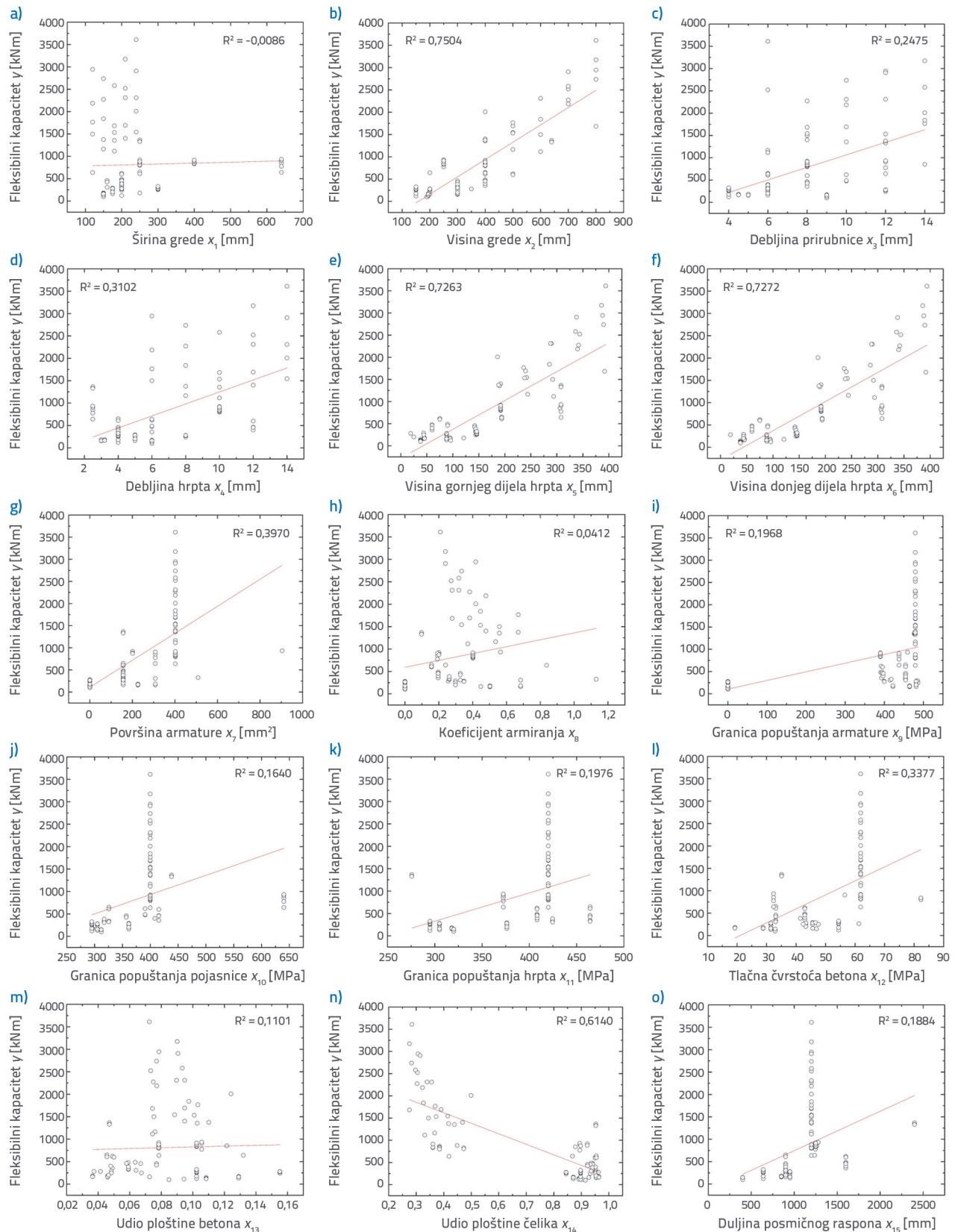
S porastom primjene umjetne inteligencije u građevinarstvu algoritmi strojnog učenja postali su snažni alati za brzo ponavljanje eksperimentalnih rezultata i točno predviđanje ponašanja konstrukcija. Cilj ovog istraživanja jest razviti model procjene savojne nosivosti PEC greda na temelju strojnog učenja i provjeriti njegovu točnost pomoću eksperimentalnih podataka.

Tablica 1. Detaljno objašnjenje 15 varijabli

Varijabla	Jedinica	Opis
x_1	mm	Širina grede
x_2	mm	Visina grede
x_3	mm	Debljina pojasnice
x_4	mm	Debljina hrpta
x_5	mm	Visina gornjeg dijela hrpta
x_6	mm	Visina donjeg dijela hrpta
x_7	mm ²	Površina armature
x_8	/	Koeficijent armiranja
x_9	MPa	Granica popuštanja armature
x_{10}	MPa	Granica popuštanja pojasnice
x_{11}	MPa	Granica popuštanja hrpta
x_{12}	MPa	Udio ploštine betona
x_{13}	/	Udio betonskog područja
x_{14}	/	Udio ploštine čelika
x_{15}	mm	Duljina posmičnog raspona
y	kNm	Savojna nosivost

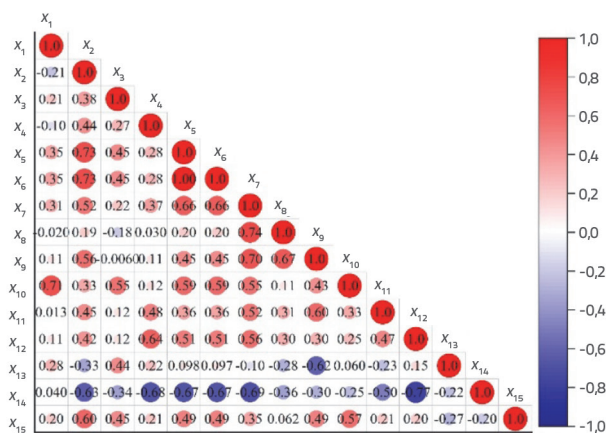
3.1. Prikaz i evaluacija baze podataka savojne nosivosti PEC greda

Kako bi se poboljšala prediktivna učinkovitost predloženog modela, sastavljena je opsežna baza podataka korištenjem eksperimentalnih rezultata istraživača iz više zemalja, uključujući 152 PEC grede podvrgnute prednaprezanju, a kako je to navedeno u referencama [37-53]. Izlazni parametar definiran je kao savojna nosivost y , a odabrano je petnaest ključnih ulaznih varijabli koje utječu na savojno ponašanje djelomično obavijenih kompozitnih (PEC) greda, kao što je to prikazano u tablici 1. Na slici 2. prikazana je raspodjela 15 ulaznih varijabli u odnosu na savojnu nosivost y . Analiza linearne regresije pokazala je da varijabla x_2 pokazuje najjaču korelaciju s y , uz koeficijent determinacije R^2 od 0,7504. Slijede x_5 , x_6 i x_{14} , s pripadajućim R^2 vrijednostima od 0,7263, 0,7272 i 0,6140. Nasuprot tome, preostale varijable pokazuju relativno slabe korelacije sa savojnom nosivošću, pri čemu je najveća vrijednost R^2 među njima iznosila samo 0,3970. Visoke korelacije među ulaznim varijablama mogu dovesti do pretjeranog prilagođavanja (*overfittinga*) modela i smanjene interpretabilnosti, što u konačnici narušava pouzdanost predviđanja. Kako bi se procijenili međusobni odnosi između ulaznih značajki, provedena je Spearmanova analiza korelacije. Za razliku od tradicionalnog Pearsonova koeficijenta, koji mjeri samo linearne veze, Spearmanova korelacija obuhvaća i linearne i nelinearne ovisnosti, pružajući sveobuhvatniju procjenu. Matrica korelacije prikazana je na slici 3. Izlazni parametar y također je uključen u matricu radi vizualizacije, kako bi se čitateljima omogućilo izravno uočavanje povezanosti između



Slika 2. Prikaz skupa podataka: a) širina grede x_1 ; b) visina grede x_2 ; c) debljina pojasnice x_3 ; d) debljina hrpta x_4 ; e) visina gornjeg dijela hrpta x_5 ; f) visina donjeg dijela hrpta x_6 ; g) površina armature x_7 ; h) koeficijent armiranja x_8 ; i) granica popuštanja armature x_9 ; j) granica popuštanja pojasnice x_{10} ; k) granica popuštanja hrpta x_{11} ; l) tlačna čvrstoća betona x_{12} ; m) udio ploštine betona x_{13} ; n) udio ploštine čelika x_{14} ; o) duljina posmičnog raspona x_{15}

svake ulazne varijable i savojne nosivosti. Međutim, y nije uzet u obzir u procjeni kolinearnosti. Rezultati su pokazali jake korelacije (koeficijent $> 0,70$) između nekoliko parova varijabli, uključujući x_1 i x_{10} , x_2 i x_5 , x_2 i x_6 , x_5 i x_6 , x_7 i x_8 .



Slika 3. Matrica Spearmanovih koeficijenata korelacije za ulazne i izlazne parametre

Napomena: Uključivanje Y služi samo u vizualizacijske svrhe, kako bi se prikazao stupanj korelacije između svake ulazne značajke i ciljane izlazne vrijednosti. Analiza kolinearnosti provedena je isključivo među ulaznim varijablama, pri čemu se parovi s koeficijentom većim od 0,70 smatraju snažno koreliranim.

Na slici 4.a prikazani su rezultati važnosti varijabli dobiveni iz četiriju prediktivnih modela (KNN, *LightGBM*, *CatBoost*, RF), pri čemu svaki primjenjuje vlastiti postupak izračuna važnosti:

- KNN: važnost permutacije uz 5-presječnu (*5-fold*) unakrsnu provjeru (R^2 kao metrika, $n_repeats = 30$, $random_state = 42$); najbolji hiperparametri odabrani su ručnom pretragom u rasponu $n_neighbors \in \{3, \dots, 15\}$ i $weights \in \{uniform, distance\}$.
- *LightGBM*: važnost na temelju dobitka (gain-based importance) iz optimiranog *LGBMRegressor* (hiperparametri

optimirani Bayesovom pretragom unutar $num_leaves \in [31, 127]$, $learning_rate \in [0,05, 0,25]$, $n_estimators \in [200, 800]$, ostali zadani).

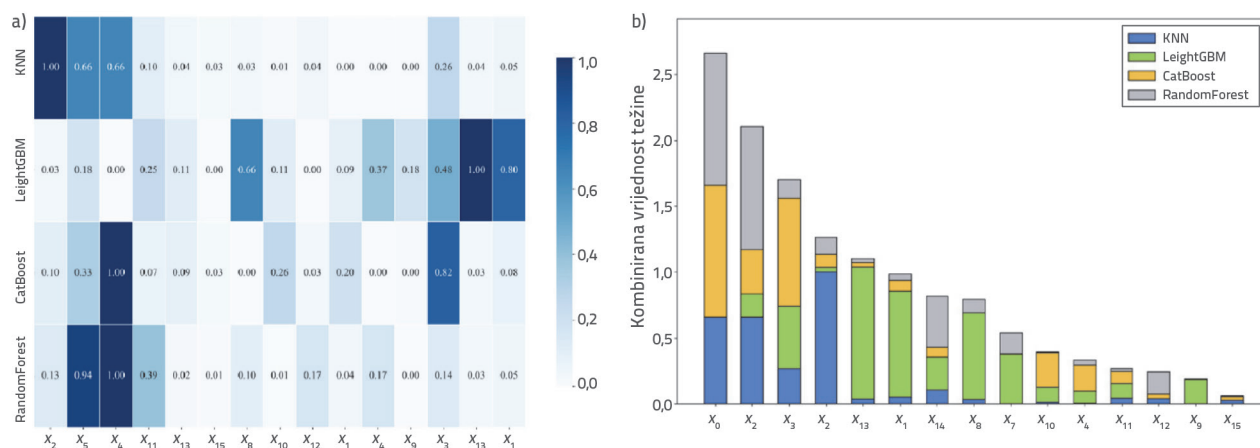
- *CatBoost*: važnost *PredictionValuesChange* iz optimiranog modela ($iterations \in [300, 1000]$, $depth \in [4, 8]$, $learning_rate \in [0,05, 0,25]$, $random_state = 42$), uz SHAP kao provjeru robusnosti.
- *Random Forest*: važnost na temelju nečistoće (MDI) iz optimiranog RF modela ($n_estimators = 500$, $max_features = \text{"sqrt"}$, $min_samples_leaf = 2$, $random_state = 42$; ostalo zadano), provjerena permutacijskom važnošću ($n_repeats = 30$).

Sve vrijednosti važnosti normalizirane su metodom *min-max* i zatim zbrojene kroz modele. Složene stupčaste vrijednosti na slici 4.b prikazuju ukupnu vrijednost važnosti (ukupna visina) te relativne doprinose pojedinih metoda (bojom označeni segmenti).

Napomena, oznake na slici 4. znače: KNN - permutacijska važnost s 5-prosjječnom križnom validacijom CV (R^2 metrike, $n_repeats = 30$, $random_state = 42$); *LightGBM* - važnost zasnovana na dobitku iz podešenog *LGBMRegressor*; *CatBoost* - *Prediction Values Change* važnost iz podešenog modela (s provjerom SHAP); RF - važnost zasnovana na nečistoći (MDI) iz podešenog modela, provjerena permutacijskom važnošću. Sve vrijednosti važnosti normalizirane su metodom *min-max* i zbrojene. Ukupna visina stupca predstavlja kombiniranu vrijednost važnosti, dok obojeni segmenti prikazuju doprinos svake metode.

3.2. Prediktivni model zasnovan na strojnome učenju

Kako bi se adresirala potencijalna kolinearnost među 15 ulaznih varijabli, prvo je provedena Spearmanova analiza korelacije. Parovi varijabli s koeficijentom većim od 0,70 označeni su kao snažno korelirani. Kako bi se smanjila redundantnost, agregirane su ocjene važnosti varijabli iz više metoda (*Random Forest*, *XGBoost* i uzajamna informacija), a zadržane su samo najviše rangirane varijable za daljnje modeliranje. Na taj je način



Slika 4. Mjere važnosti varijabli: a) matrica važnosti značajki; b) kombinirana razina važnosti

minimiziran rizik da kolinearnost utječe na modele. Prekomjerno prilagođavanje kontrolirano je pomoću nekoliko zaštitnih mjera. Podaci su očišćeni primjenom analiza *Z-score* i *Isolation Forest* za uklanjanje šuma i nepravilnosti. Dinamički odabir varijabli proveden je kako bi se ograničio broj ulaznih varijabli i smanjila složenost modela. Performanse modela validirane su primjenom 5-presječne unakrsne validacije, dok je Bayesovo optimiranje primjenjivano za podešavanje hiperparametara i poboljšanje generalizacije.

Svaki je model neovisno treniran i evaluiran korištenjem četiriju standardnih metrika performansi, i to: R^2 (koeficijent determinacije), MAE (srednja apsolutna pogreška), RMSE (korijen srednje kvadratne pogreške) i MAPE (srednja apsolutna postotna pogreška). Odgovarajući izrazi prikazani su u nastavku.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(y_i - \hat{y}_i) / y_i| \cdot 100 \% \quad (4)$$

U izrazima za performanse $\hat{y}_i$ predstavlja stvarnu vrijednost, $\bar{y}$ predviđenu vrijednost, srednju vrijednost, a n broj uzoraka. Viša vrijednost R^2 i niže vrijednosti RMSE, MAE i MAPE označavaju bolju izvedbu modela i manja odstupanja između predviđenih i stvarnih vrijednosti.

Skup podataka od 152 uzorka nasumično je podijeljen u skup za obuku, tj. treniranje (80 %) i testiranje (20 %), s random_state = 42 radi reproduktivnosti. Sažetak statistika (min, max, mean, std) za oba skupa prikazan je u Dodatku B (Dodatni materijal), potvrđujući

da su njihove raspodjele dosljedne i statistički usporedive. U tablici 2. sažete su metrike performansi modela, dok su na slici 5. predviđeni rezultati uspoređeni sa stvarnim vrijednostima.

U tablici 2. iznesene su vrijednosti R^2 , MAE, RMSE i MAPE za sva četiri algoritma na oba skupa, omogućujući jasan uvid u prilagodbu modela i sposobnost generalizacije. Na skupu za treniranje KNN i *CatBoost* postigli su gotovo savršene performanse s vrijednostima R^2 od 0,9999, a MAE i RMSE u rasponu 3 do 8. Suprotno tome, RF i *LightGBM* dali su niže vrijednosti R^2 (0,9853 i 0,9413), s većim pogreškama.

Na neviđenim podacima (testnome skupu) RF zadržao je najviši R^2 (0,981) i kontrolirao vrijednosti MAE i RMSE unutar 58,2 i 98,4, što pokazuje snažnu sposobnost generalizacije. *CatBoost* postigao je usporedivi R^2 od 0,9798, s nešto većim RMSE-om (101,3), ali prihvatljivim MAE-om i MAPE-om, sugerirajući stabilnu prediktivnu izvedbu. Suprotno tome, R^2 KNN-a naglo je pao na 0,9583, uz porast MAE-a i RMSE-a (> 80 i 145), što pokazuje znatno prekomjerno prilagođavanje. *LightGBM* je u tome pogledu pokazao najlošije rezultate, s testnim R^2 od samo 0,8357, RMSE-om od približno 289 i MAPE-om većim od 30 %, ne zadovoljavajući zahtjeve preciznosti.

Sveukupno, *Random Forest* učinkovito je balansirao prilagodbu i generalizaciju, čineći ga preferiranim modelom. *CatBoost* je također snažan kandidat, s nešto nižom testnom točnošću. Međutim, KNN i *LightGBM* pokazali su znatno prekomjerno prilagođavanje i zahtijevaju podešavanje parametara ili inženjering značajki prije nego što budu prikladni za primjenu.

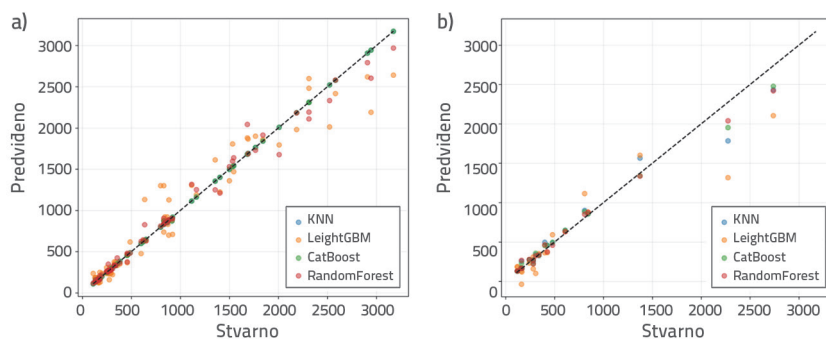
Ti su rezultati u skladu s nedavnim primjenama strojnog učenja u građevinarstvu. Taffese i Zhu [54] postigli su $R^2 \approx 0,94$ i MAE $\approx 11,5$ kNm za UHPC grede, Agarwal i sur. [55] izvijestili su o ≈ 18 % pogrešci u predviđanju pukotina u AB gredi primjenom *XGBoosta*, a Liu i sur. [56] pokazali su da *XGBoost* pruža najbolju izvedbu ($R^2 \approx 0,99$, MAE $\approx 5,4$ kN) u predviđanju posmične čvrstoće 174 FRCM-om ojačane RC grede. U usporedbi s tim referentnim vrijednostima, ovaj RF model postigao je veću točnost (MAE $\approx 2,6$ %, $R^2 \approx 0,98$), potvrđujući robusnost i novost za PEC grede.

Iako modeli strojnog učenja pokazuju snažne prediktivne

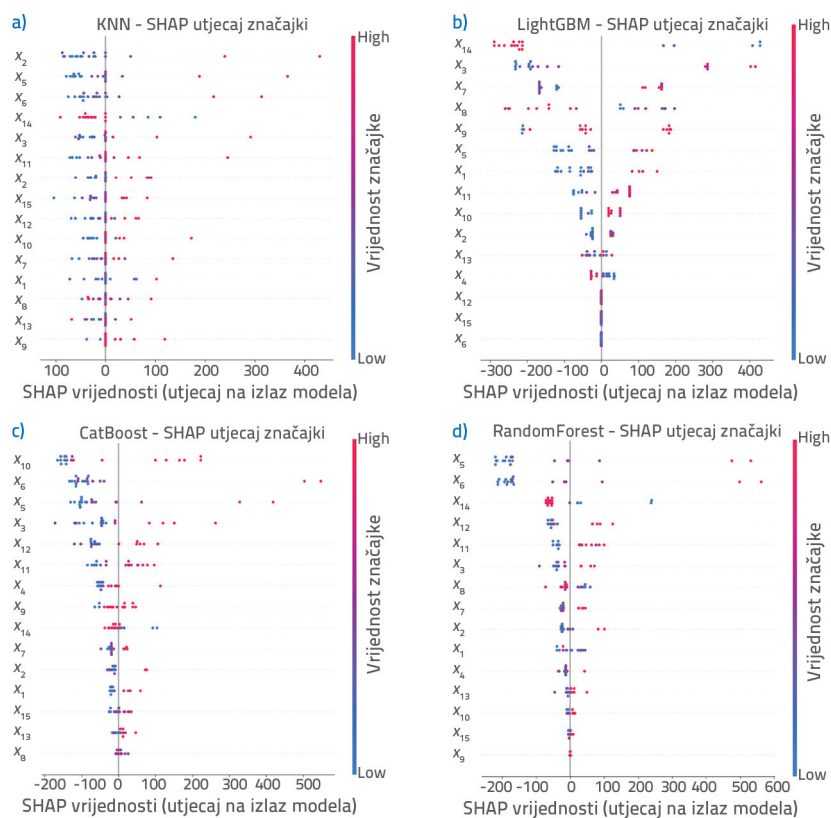
Tablica 2. Performanse svakog modela

	Model	R^2	MAE	RMSE	MAPE	Najbolji hiperparametri
Treniranje	KNN	0.9999	3.1082	8.3942	1.0564	n_neighbors = 5, weights = distance
	LightGBM	0.9413	122.3384	192.5837	18.1147	num_leaves = 95, learning_rate = 0.12, n_estimators = 450
	CatBoost	0.9999	3.1497	8.3944	1.0659	iterations = 600, depth = 6, learning_rate = 0.12
	RF	0.9853	50.8568	96.3420	5.8881	n_estimators = 500, max_depth = 12, min_samples_leaf = 2
Testiranje	KNN	0.9583	80.3360	145.6488	12.1285	n_neighbors = 5, weights = distance
	LightGBM	0.8357	166.9297	288.9514	30.4131	num_leaves = 95, learning_rate = 0.12, n_estimators = 450
	CatBoost	0.9798	58.7677	101.3208	10.3942	iterations = 600, depth = 6, learning_rate = 0.12
	RF	0.9809	58.2261	98.4188	11.4303	n_estimators = 500, max_depth = 12, min_samples_leaf = 2

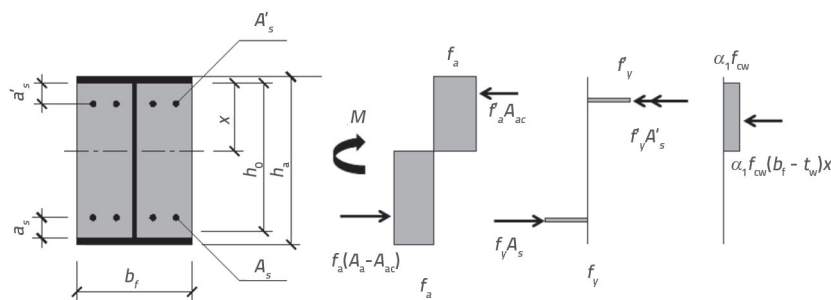
Napomene: Svi su modeli podešeni, a nisu korišteni zadani parametri. Optimiranje hiperparametara provedeno je 5-presječnom unakrsnom validacijom (R^2 kao metrika uspješnosti). Hiperparametri za KNN odabrani su ručnim pretraživanjem mreže (n_neighbors, weights). Parametri za *LightGBM*, *CatBoost* i *Random Forest* optimirani su primjenom Bayesove pretrage unutar prethodno definiranih raspona. Prikazani rezultati odgovaraju najboljim hiperparametrima identificiranim za svaki model.



Slika 5. Usporedba stvarnih i predviđenih vrijednosti: a) Treniranje; b) Testiranje



Slika 6. SHAP vrijednosti: a) KNN; b) LightGBM; c) CatBoost; d) RandomForest



Slika 7. Dijagram presjeka i ekvivalentni pravokutni dijagram naprezanja PEC greda

sposobnosti, njihova inherentna priroda crne kutije često ograničava interpretabilnost i razumijevanje procesa donošenja odluka. Kako bi se to riješilo, primijenjena je metoda SHAP za

interpretaciju prediktivnih rezultata različitih modela kao što je to prikazano na slici 6. U modelu KNN varijabla x_2 pokazala je najširi raspon vrijednosti SHAP, pretežno pozitivnih, što upućuje na snažan i dosljedan pozitivan doprinos predviđenome izlazu, čime postaje najkritičniji čimbenik. Varijable x_5 i x_6 također su imale znatan utjecaj, iako su njihove vrijednosti SHAP bile simetričnije raspodijeljene, sugerirajući nijansiran i dvostrani utjecaj.

U modelu *LightGBM* varijabla x_{14} pojavila se kao dominantni čimbenik, dok su varijable x_3 , x_7 , x_8 i x_9 pokazale umjerene i ovisne o smjeru uticne, što znači da je njihov doprinos varirao s ulaznim vrijednostima.

U modelu *CatBoost* varijabla x_{10} imala je vrijednosti SHAP u rasponu od -200 do $+550$, s izraženim pomakom prema pozitivnome doprinosu, što znači da veće vrijednosti x_{10} znatno povećavaju predviđenu savojnu nosivost. Varijable x_5 i x_6 slijedile su s uravnoteženijom raspodjelom vrijednosti SHAP.

Za model *Random Forest* varijabla x_5 istaknuta je s vrijednostima SHAP između -250 i $+600$, s izrazito snažnim pozitivnim učinkom, čime postaje najutjecajnija varijabla u predviđanjima RF. Općenito, varijabla x_{14} identificirana je kao najkritičniji prediktor savojne nosivosti i trebala bi biti u fokusu pri modeliranju. Varijable x_5 i x_6 pokazale su složen i dvosmjernan utjecaj te zahtijevaju pažljivo praćenje. Suprotno tome, varijable poput x_3 , x_{11} i x_{12} pokazale su blage supresijske učinke, dok su ostale varijable pridonosile prediktivnim rezultatima samo marginalno.

4. Tradicionalna metoda izračuna savojne nosivosti PEC greda

Raspodjela naprezanja i pojedini parametri poprečnog presjeka PEC grede prikazani su na slici 7. Tijekom procesa dostizanja krajnje nosivosti neutralna os uzorka kontinuirano se pomiče prema gore, a visina tlačne zone smanjuje se. Dio presjeka iznad neutralne osi nalazi se u tlačnoj zoni, dok je presjek ispod neutralne osi u vlačnoj zoni, pri čemu i pojasnice i vlačna

armatura dosežu svoju graničnu čvrstoću. Izrazi za izračun savojne nosivosti PEC greda dani su u izrazima (5) do (9), a proračunani rezultati prikazani su u tablici 6.

$$M_u = \alpha_1 f_{cw} (b_f - t_w) \frac{x^2}{2} + f_y A_s (h_a - x - 2t_f - a_s) + f_y' A_s' (x - a_s') + f_a S_{at} + f_a' S_{ac} \quad (5)$$

$$\alpha_1 f_{cw} (b_f - t_w) x + f_y' A_s' + f_a' A_{ac} - f_y A_s - f_a (A_a - A_{ac}) = 0 \quad (6)$$

$$2a_s' \leq x \leq \xi_b h_0 \quad (7)$$

$$\xi_b = \frac{1}{1 + \frac{f_y + f_a}{2 \times 0.003 E_s}} \quad (8)$$

$$A_{ac} = t_w x + b_f t_f \quad (9)$$

gdje je:

M_u - projektirana vrijednost savojne nosivosti presjeka (N·mm)

f_{cw} - projektirana aksijalna tlačna čvrstoća betona u hrptu glavnoga čeličnog člana (N/mm²)

x - udaljenost od neutralne osi kompozitnog presjeka do tlačnog ruba betona (mm)

α_1 - koeficijent utjecaja tlačnog naprezanja u tlačnoj zoni

f_y, f_y' - projektirane vrijednosti tlačne i vlačne čvrstoće armature (N/mm²)

f_a, f_a' - projektirane vrijednosti tlačne i vlačne čvrstoće glavnoga čeličnog presjeka grede (N/mm²)

A_s, A_s' - površine presjeka vlačne i tlačne armature (mm²)

A_a, A_{ac} - ukupna površina presjeka glavnoga čeličnog presjeka i površina presjeka tlačne zone glavnoga čeličnog presjeka (mm²)

a_s, a_s' - udaljenosti od rezultatne sile vlačne armature do vlačnog ruba betona i od rezultatne sile tlačne armature do tlačnog ruba betona (mm)

S_{at}, S_{ac} - plastični moment presjeka vlačne i tlačne zone glavnoga čeličnog presjeka u odnosu na plastičnu neutralnu os kompozitnog presjeka (mm³)

h_0 - efektivna visina betonskog presjeka (mm)

E_s, E_s - moduli elastičnosti glavnog čeličnog presjeka i armature (N/mm²)

h_a, b_f, t_w, t_f - visina, širina pojasnice, debljina hrpta i debljina pojasnice glavnoga čeličnog presjeka grede (mm).

5. Eksperimentalni program i analiza rezultata

5.1. Projektiranje uzoraka

Kako bi se potvrdio predloženi model za procjenu savojne nosivosti PEC greda, projektirano je, proizvedeno i podvrgnuto ispitivanju pet skupina uzoraka PEC greda (PECB1-PECB5). Uzorci su dizajnirani u skladu sa specifikacijom T/CECS 719-2020 [57].

Uzorak PECB1 bio je primarna greda, PECB2 sekundarna greda, PECB3 i PECB5 primarne grede s otvorima u hrptu (tipovi 1 i 2), dok je PECB4 bila sekundarna greda s otvorima u hrptu. Svi uzorci imali su visinu poprečnog presjeka veću od 600 mm.

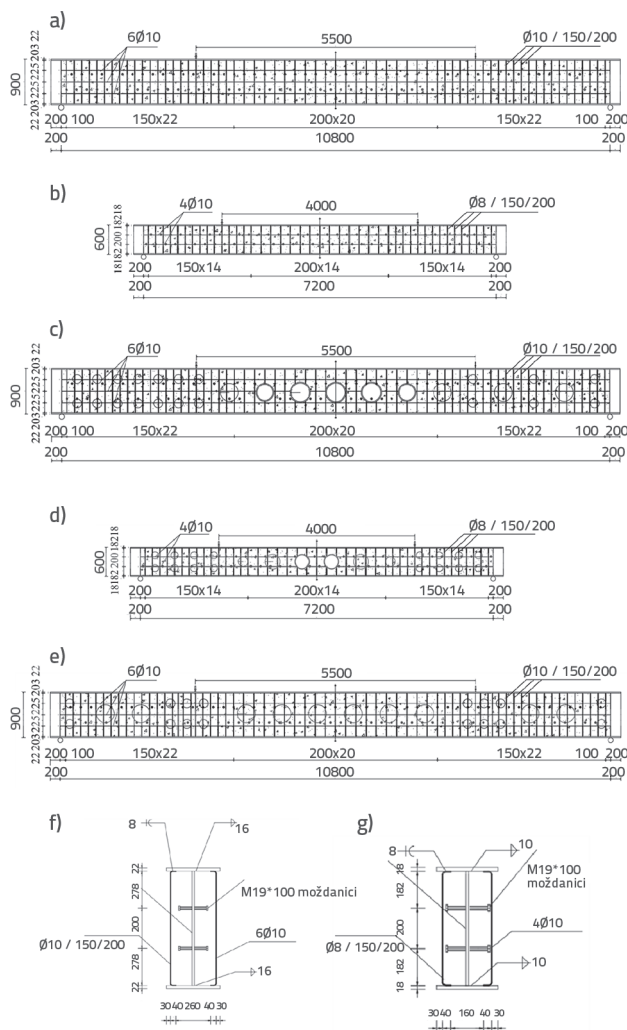
Konstruktivski čelik bio je Q355-B, korišteni su stezne šipke i armatura protiv pukotina od čelika HRB400, a čvrstoća betona bila je klase C30. Projektirana duljina iznosila je 10.800 mm za uzorke PECB1, PECB3 i PECB5, te 7200 mm za uzorke PECB2 i PECB4. Što se tiče otvora u hrptu:

- na uzorku PECB3 otvori u sredini raspona imali su promjer od 400 mm, na četvrtini raspona od 350 mm, a preostali otvori od 175 mm, pri čemu je pet otvora u sredini raspona ostalo neispunjeno
- na uzorku PECB4 otvori u sredini raspona imali su promjer 300 mm, otvori na četvrtini raspona od 200 mm, a preostali otvori od 140 mm, pri čemu su dva otvora u sredini raspona ostala neispunjena
- na uzorku PECB5 otvor u sredini raspona imao je promjer 350 mm, preostali otvori od 175 mm, a svi otvori ispunjeni su betonom radi olakšavanja lijevanja.

Dodatno, razmak steznih šipki iznosio je 200 mm u zoni čistog savijanja i 150 mm u zoni savijanje - posmik. Izračun udjela čeličnog presjeka temeljen je isključivo na površini poprečnog presjeka konstrukcijskog čelika. Detaljne konfiguracije uzoraka prikazane su na slici 8.

Tablica 3. Osnovni parametri dizajna uzoraka

Oznaka uzorka	Duljina l_0 [mm]	Visina h_a [mm]	Širina b_f [mm]	Debljina prirubnice t_f [mm]	Debljina mreže t_w [mm]	Omjer čelika [%]
PECB1	10800	900	400	22	18	8,63
PECB2	7200	600	300	18	12	9,04
PECB3	10800	900	400	22	18	8,63
PECB4	7200	600	300	18	12	9,04
PECB5	10800	900	400	22	18	8,63



Slika 8. Shematski dijagram PEC greda: a) uzorak PECB1 - prikaz u pogledu s prednje strane; b) uzorak PECB2 - prikaz u pogledu s prednje strane; c) uzorak PECB3 - prikaz u pogledu s prednje strane; d) uzorak PECB4 - prikaz u pogledu s prednje strane; e) uzorak PECB5 - prikaz u pogledu s prednje strane; f) srednji presjek raspona glavne grede; g) srednji presjek raspona sekundarne grede

Materijalna svojstva betona testirana su u laboratoriju građevnih materijala na Tongji Universityju, u skladu s nacionalnom standardnom metodom ispitivanja *Standard for Test Methods of Physical and Mechanical Properties of Concrete* (GB/T50081-2019) [58]. Pod istim uvjetima njegovanja tlačna čvrstoća betonskoga kockastog uzorka iznosila je 31,1 MPa.

Tablica 4. Materijalna svojstva čelika

Broj	T [mm]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [MPa]
1.	12	408,13	524,31	231378
2.	18	390,81	488,79	223478
3.	22	408,49	499,13	215244

Svojstva čelika određena su prema standardu *Metallic Materials - Tensile Testing* (GB/T 228.1-2010) [59]. Standardna ispitivanja vlačne čvrstoće provedena su korištenjem univerzalnoga ispitnog stroja u laboratoriju za konstrukcijsko inženjerstvo na Tongji Universityju s uređajem za opterećenje prikazanim na slici 3. Sve čelične ploče korištene za uzorke uzete su iz iste serije čelika i izrezane u proporcionalne uzorke za ispitivanje. Granična čvrstoća f_y , vlačna čvrstoća f_u i modul elastičnosti E čeličnih materijala različitih debljina navedeni su u tablici 4.

5.2. Protokol opterećenja i mjerenje

Uzorci PECB1, PECB3 i PECB5, koji imaju veće raspon i veću nosivost, opterećeni su monotonim opterećenjem pomoću dvaju aktuatora snage 350 t, postavljenih u točkama jedne trećine raspona, dok su uzorci PECB2 i PECB4, s manjim rasponom i manjom nosivošću, testirani jednim aktuatorom koji distribuira opterećenje kroz krutu gredu na sličnim pozicijama.

Uvjeti oslonaca bili su jednostruko oslonjeni, s kliznim i fiksnim osloncem na suprotnim krajevima. U početku primijenjeno je opterećenje kontrolirano silom, koje je postupno povećavano (60 kN po koraku za veće uzorke pri 20 kN/min, 30 kN po koraku za manje uzorke pri 10 kN/min) do polovine procijenjene granice popuštanja. Nakon toga opterećenje je prešlo na kontrolu pomaka, povećavajući se po 5 mm po koraku pri brzini od 5 mm/min, sve dok nije došlo do otkazivanja uzorka, pri čemu su pomaci prelazili 300 mm.



Slika 9. Dijagram opterećenja uzoraka: a) Uređaj za punjenje PECB1, PECB3 i PECB5; b) Uređaj za punjenje PECB2 i PECB4

5.3. Oblici sloma uzoraka

Konačni oblici sloma uzoraka PECB1-PECB5 prikazani su na slikama 10. do 14. Svi su uzorci inicijalno pokazali pojavu pukotina u betonu, nakon čega su popustile gornje i donje



Slika 10. Konačno stanje sloma uzorka PECB1: a) područje sjeverne strane; b) područje srednjeg raspona; c) područje južne strane



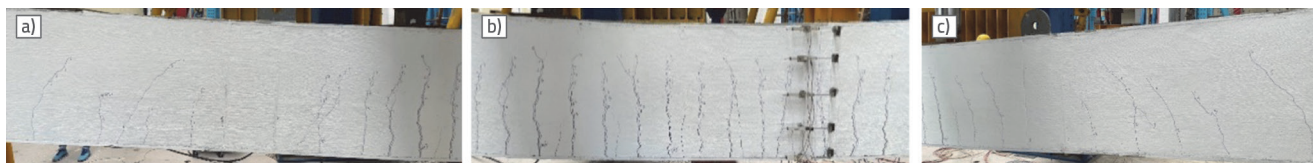
Slika 11. Konačno stanje sloma uzorka PECB2: a) područje sjeverne strane; b) područje srednjeg raspona; c) područje južne strane



Slika 12. Konačno stanje sloma uzorka PECB3: a) područje sjeverne strane; b) područje srednjeg raspona; c) područje južne strane



Slika 13. Konačno stanje sloma uzorka PECB4: a) područje sjeverne strane; b) područje srednjeg raspona; c) područje južne strane



Slika 14. Konačno stanje sloma uzorka PECB5: a) područje sjeverne strane; b) područje srednjeg raspona; c) područje južne strane

čelične pojasnice, a na kraju je došlo i do odlamanja betona na gornjoj površini u sredini raspona, pri čemu je progib u sredini premašio kriterij otkazivanja ($1/50$ raspona).

Pukotine su se obično počele pojavljivati pri približno $0,11$ do $0,23 P_u$, a širina pukotina i deformacije postupno su se povećavale dok nisu premašile granične vrijednosti upotrebljivosti, oko $0,69 - 0,85 P_u$.

Za uzorke PECB3 i PECB4 otvori u hrptu znatno su promijenili putove prijenosa opterećenja, što je rezultiralo karakterističnim radijalnim pukotinama koje su se širile od otvora prema dolje, širim pukotinama i izraženijim odlamanjem i ispučenjem betona iznad tih otvora.

5.4. Krivulja opterećenje - progib u sredini raspona

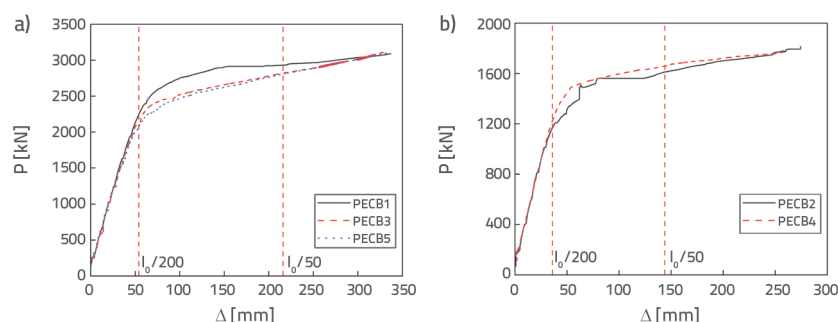
Krivulje opterećenje - progib u sredini raspona za uzorke prikazane su na slici 15., pokazujući dvije faze:

- **elastičnu fazu:** Prije nego što popusti pojasnica u vlačnoj zoni, primarni čelični element i armatura ograničavaju beton, što dovodi do sporog širenja pukotina i zanemarljivih

promjena u krutosti presjeka. Krivulja opterećenje - progib u sredini pokazuje uglavnom linearan odnos.

- **fazu nakon popuštanja pojasnice u vlačnoj zoni:** Uzorak ulazi u elastoplastičnu fazu. Pukotine u središnjemu betonu brzo se šire i postupno gube doprinos strukturnoj stabilnosti, što rezultira smanjenjem krutosti presjeka. Krivulja opterećenje - progib u sredini raspona počinje pokazivati infleksijske točke, prelazi u nelinearno ponašanje s vidljivim progibom u sredini raspona i izraženim savijanjem. Međutim, kako opterećenje raste, tako donja pojasnica primarnoga čeličnog elementa ulazi u fazu očvršćivanja deformacija, sprječavajući pad savojne nosivosti presjeka. Kada gornja pojasnica popusti, tada dolazi do djelomičnog odlamanja gornjeg betona u sredini raspona, a progib doseže dopuštenu granicu, što dovodi do prekida ispitivanja.

Uspoređujući krivulje opterećenje - pomak u sredini raspona uzoraka s otvorima u hrptu i bez njih, uočeno je da početna krutost pokazuje minimalne razlike. Naime, iako otvori u hrptu smanjuju krutost poprečnog presjeka primarnoga čeličnog



Slika 15. Krivulja opterećenje - pomak u sredini: a) PECB1, PECB3 i PECB5; b) PECB2 i PECB4

elementa, to je ublaženo punjenjem betona i armaturom. Po ulasku uzoraka u fazu popuštanja nosivost uzorka PECB1 bila je nešto veća od nosivosti uzoraka PECB3 i PECB5. Međutim, pri konačnome otkazivanju njihove nosivosti bile su praktički iste. Krivulje za uzorke PECB2 i PECB4 nisu pokazale znatne razlike u trendu.

To upućuje na to da otvori u hrptu i blago smanjuju nosivost uzoraka, ali imaju ograničen ukupni utjecaj. To je zato što savojna nosivost PEC greda ponajprije ovisi o čeličnim pojasnicama, hrptu i betonu, pri čemu hrbat igra relativno manju ulogu.

5.5. Analiza nosivosti

Na temelju krivulja opterećenje - progib u sredini rasponi uzoraka, nosivosti i pomaci u karakterističnim točkama sažeti su u tablici 5. Teorijska sila pri kojoj su se pojavile pukotine P'_{cr} izračunana je prema *Tehničkoj specifikaciji za djelomično obložene čelično-betonske konstrukcije* (T/CECS 719-2020) [37], dok je stvarna sila P_{cr} dobivena eksperimentalno. Teorijska sila popuštanja P'_y izračunana je pomoću granice popuštanja dobivene iz ispitivanja materijala prema kriteriju popuštanja rubnih dijelova presjeka, a stvarna sila popuštanja P_y izmjerena je eksperimentalno metodom Park. Teorijska krajnja sila P'_u izvedena je prema kriteriju plastičnosti cijelog presjeka, dok je stvarna krajnja sila P_u određena eksperimentalno. Koeficijent duktilnosti μ korišten je za procjenu duktilnih svojstava uzoraka, a definiran kao: $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, gdje je Δ_u krajnji progib, a Δ_y progib pri popuštanju. Kao što je prikazano u tablici 5.

Tablica 5. Nosivost i pomaci u karakterističnim točkama

Oznaka uzorka	Sila pucanja [kN]		Sila popuštanja [kN]		Δ_y [mm]	P_y / P'_y	Krajnja sila [kN]		Δ_u [mm]	P_u / P'_u	P_u / P_y	μ
	P'_{cr}	P_{cr}	P'_y	P_y			P'_u	P_u				
PECB1	155,4	348,2	2185,4	2605,9	77,75	1,19	2734,5	3090,2	336,88	1,07	1,19	4,33
PECB2	88,7	193,5	1241,6	1504,2	63,19	1,21	1474,4	1813,6	274,38	1,32	1,21	4,34
PECB3	155,4	339,9	2185,4	2450,3	81,82	1,12	2734,5	3107,9	328,44	1,31	1,27	4,01
PECB4	88,7	201,5	1241,6	1511,1	60,45	1,22	1474,4	1776,7	261,27	1,14	1,18	4,32
PECB5	155,4	323,4	2185,4	2386,6	82,43	1,09	2734,5	3100,1	334,16	1,13	1,30	4,05

Eksperimentalne vrijednosti opterećenja u karakterističnim točkama uzoraka bile su veće od proračunanih, što pokazuje da se nosivost može odrediti primjenom kriterija popuštanja rubova presjeka i kriterija plastičnosti cijelog presjeka.

Opterećenje pri kojemu su se pojavile pukotine kretalo se od $0,1 P_u$ do $0,2 P_u$, što upućuje na njihovu ranu pojavu, vjerojatno zbog inicijalnih pukotina u betonu. Međutim, razvoj pukotina zadovoljavao je zahtjeve specifikacija, a nosivost je premašila $0,7 P_u$ u

normalnome graničnom stanju upotrebljivosti.

Omjer rezervne čvrstoće uzoraka kretao se od 1,18 do 1,30, što upućuje na to da su uzorci zadržali određenu rezervu čvrstoće nakon što su dostigli silu popuštanja.

Na kraju ispitivanja nosivost svih uzoraka nije se smanjila, no degradacija krutosti bila je znatna, a pomak je dosegao $I_o/50$. Svi uzorci pokazali su izvrsnu duktilnost, s koeficijentima duktilnosti većima od 4,0.

U usporedbi s uzorkom PECB1, granična čvrstoća uzoraka PECB3 i PECB5 smanjena je za 6,0 % i 8,4 %, dok su progibi pri popuštanju povećani za 5,2 % i 6,0 %. Granična čvrstoća i pomaci uzoraka PECB2 i PECB4 pokazali su minimalne razlike, što upućuje da otvori u hrptu u čeličnome presjeku imaju znatniji utjecaj na PEC grede.

5.6. Verifikacija metoda izračuna

Na temelju modela strojnog učenja obrađenih u 2. poglavlju, provedena je prediktivna analiza za procjenu savojne nosivosti PEC greda korištenih u eksperimentalnim ispitivanjima. Predviđene vrijednosti uspoređene su s teorijskim vrijednostima izračunanim pomoću teorije plastičnosti cijelog presjeka, izraza (5), a rezultati su sažeti u tablici 6.

Za uzorke PECB1-PECB5 tradicionalni izraz pokazao je znatnu konzervativnost, precijenivši krajnji moment i do 23 %. Među modelima strojnog učenja:

- KNN pokazao je i precjenjivanja i podcjenjivanja (od -23 % do +6 %), što upućuje na nestabilnost.

Tablica 6. Rezultati izračuna savojne nosivosti u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima

Oznaka uzorka	KNN		LightGBM		CatBoost		RF		Proračunana vrijednost		Eksperimentalne vrijednosti [MPa]
	Vrijednost [MPa]	Odstupanje [%]	Vrijednost [MPa]	Odstupanje [%]	Vrijednost [MPa]	Odstupanje [%]	Vrijednost [MPa]	Odstupanje [%]	Vrijednost [MPa]	Odstupanje [%]	
PECB1	6658,6	-19,7	4828,8	13,2	4510,0	18,9	5587,8	-0,5	4922,1	11,5	5561,28
PECB2	2621,7	-14,2	2107,1	8,2	2250,6	2,0	2348,9	-2,3	1769,3	23,0	2296,32
PECB3	5244,2	6,3	4935,3	11,8	5446,0	2,6	5747,4	-2,7	4922,1	12,0	5594,22
PECB4	2622,9	-23,0	2414,4	-13,2	2028,5	4,9	2034,5	4,6	1769,3	17,0	2132,04
PECB5	5244,2	6,0	4935,3	11,6	5446,0	2,4	5747,4	-3,0	4922,1	11,8	5580,18

- *LightGBM* konstantno je precjenjivao rezultate (pogreške 8 - 13 %), što odražava pristranost.
- *CatBoost* pokazao je veću točnost, zadržavajući pogreške predikcije ispod 5 % za većinu uzoraka.
- *Random Forest* (RF) dao je najtočnije i najstabilnije rezultate, s apsolutnim pogreškama ispod 5 % za sve uzorke.

Na temelju procjene svih uzoraka pomoću *mean absolute percentage error* (MAPE) RF postigao je najbolju izvedbu (~2,6 %), zatim *CatBoost* (~6 %), dok su *LightGBM* (~11,6 %) i KNN (~13,8 %) pokazali veće pogreške. Tradicionalni izraz pokazao je najlošije rezultate, s prosječnom pogreškom od približno 15 %.

Zato se RF preporučuje kao primarni model procjene, *CatBoost* kao sekundarni izbor, dok KNN i *LightGBM* zahtijevaju dodatno optimiranje za poboljšanje stabilnosti procjene.

6. Zaključak

Ova studija provela je ispitivanja savijanjem u četirima točkama na PEC gredama kako bi se istražili učinci parametara poput dimenzija presjeka, otvora u hrptu i konfiguracije otvora na karakteristike loma, ponašanje pri savijanju, savojna nosivost, duktilnost i raspodjela naprezanja u presjeku PEC greda. Glavni su zaključci sljedeći:

Identificirano je petnaest ključnih varijabli koje utječu na savojnu nosivost PEC greda, a četiri modela strojnog učenja procijenjena su korištenjem posebno prikupljene baze podataka. Među tim modelima algoritam RF pokazao je najveću točnost na testnome skupu uz učinkovito smanjenje pretjeranog prilagođavanja (*overfitting*). Nadmašio je *CatBoost*, KNN i *LightGBM*, što upućuje na to da je RF najprikladniji model za predviđanje savojnog ponašanja PEC greda.

Interpretabilnost modela RF dodatno je poboljšana analizom SHAP. Rezultati su pokazali da su omjer armature (x_{14}), debljina pojasnice (x_5) i debljina hrpta (x_6) najutjecajnije varijable. Veći omjer armature dosljedno je dao visoke pozitivne SHAP vrijednosti, što upućuje na njegov izravan

doprinos povećanju savojne nosivosti. Debljina pojasnice i hrpta pokazala je znatne, ali dvostrane učinke, reflektirajući interakciju između poboljšanja krutosti i ravnoteže presjeka. Ostali parametri poput veličine otvora u hrptu (x_3) i čvrstoće betona (x_{11}) pokazali su manje SHAP vrijednosti, sugerirajući sekundarnu ulogu.

Eksperimentalna ispitivanja potvrdila su da otvori u hrptu PEC greda imaju određeni oslabljeni učinak na nosivost uzoraka, no ukupni je utjecaj zanemariv. U usporedbi s uzorkom PECB1, granična čvrstoća uzoraka PECB3 i PECB5 smanjena je za 6,0 % i 8,4 %, dok granična čvrstoća uzoraka PECB2 i PECB4 nije pokazala znatnu razliku. Svi uzorci pokazali su koeficijente duktilnosti veće od 4,0, demonstrirajući izvrsnu duktilnost PEC greda.

Komparativna analiza pogrešaka procjene kroz pet skupina uzoraka pokazala je da je model RF dao najveću točnost, s prosječnom apsolutnom pogreškom od približno 2,6 %. Ta izvedba bila je znatno bolja od *CatBoosta* (~6 %), *LightGBM-a* (~11,6 %), KNN-a (~13,8 %) i konvencionalne projektne formule (~15 %). Prema tome, RF se identificira kao najpouzdaniji model za predviđanje savojne nosivosti PEC greda.

Zahvala

Autor zahvaljuje Hongxinu Liu, Pingu Yangu i Yamingu Liju na doprinosu u konceptualizaciji, metodologiji i osiguranju financiranja istraživanja. Shuizhongu Jiu priznaje se doprinos u izradi izvornog nacrtu, a Xiaomengu Xieu u pisanju, recenziranju i uređivanju. Autor također zahvaljuje Yukunu Yangu iz tvrtke *Shanghai Jieyi Construction Technology Co., Ltd.* i Jie Liju sa Sanda Universityja i Tongji Universityju na vrijednim doprinosima istraživanju, unatoč tome što nisu navedeni kao autori. Njihov rad u metodologiji i razvoju softvera bio je ključan za dovršetak ove studije. Ovo istraživanje financijski je podržao Znanstveno-istraživački projekt Komisije za znanost i tehnologiju Šangaja (21DZ1203002) te Projekt East China Construction Group Co., Ltd. (Class 20-1-0073-Junction).

LITERATURA

- [1] Huang, H., Xue, C., Zhang, W., et al.: Torsion design of CFRP-CFST columns using a data-driven optimization approach, *Engineering Structures*, 251 (2022), Paper 113479, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113479>
- [2] Correia, A.J.P.M., Rodrigues, J.P.C.: Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation, *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (2011) 4, pp. 593-601, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.12.002>
- [3] Chen, Q., Hou, Z., Hao, T., et al.: Web buckling analysis of steel-concrete composite beams considering flange restraints, *Građevinar*, 77 (2025) 2, pp. 113-123, <https://doi.org/10.14256/JCE.3693.2023>
- [4] Tian, Y., Liu, D., Chen, X., et al.: Damage evolution of steel-UHPC composite beams using AE and DIC techniques, *Journal of Constructional Steel Research*, 224 (2025), Paper 109163, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109163>
- [5] Jakovljević, I., Spremić, M., Marković, Z.: Demountable composite steel-concrete floors: A state-of-the-art review, *Građevinar*, 73 (2021) 3, pp. 249-236, <https://doi.org/10.14256/JCE.2932.2020>
- [6] Zhang, A.L., Li, S.H., Jiang, Z.Q., et al.: Design theory of earthquake-resilient prefabricated sinusoidal corrugated web beam-column joint, *Engineering Structures*, 150 (2017), pp. 665-673, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.088>
- [7] Chen, Z., Niu, X., Liu, J., et al.: Seismic study on an innovative fully-bolted beam-column joint in prefabricated modular steel buildings, *Engineering Structures*, 234 (2021), Paper 111875, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111875>
- [8] De Angelis, A., Pecce, M.R., Logorano, G.: Evaluation of the plastic hinge length of steel-concrete composite beams under hogging moment, *Engineering Structures*, 191 (2019), pp. 674-685, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.077>
- [9] Yao, Y., Huang, H., Zhang, W., et al.: Seismic performance of steel-PEC spliced frame beam, *Journal of Constructional Steel Research*, 197 (2022), Paper 107456, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107456>
- [10] Chen, Y., Li, W., Fang, C.: Performance of partially encased composite beams under static and cyclic bending, *Structures*, 9 (2017) 2, pp. 29-40, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.09.004>
- [11] Jiang, Y., Hu, X., Hong, W., et al.: Experimental study and theoretical analysis of partially encased continuous composite beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 117 (2016), pp. 152-160, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.009>
- [12] Wang, Z., Ye, Y., Ma, Y., et al.: Experimental and finite element flexural performance study of HPEC beam, *Journal of Constructional Steel Research*, 211 (2023), Paper 108189, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108189>
- [13] Ahn, J.K., Lee, C.H.: Fire behavior and resistance of partially encased and slim-floor composite beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 129 (2017), pp. 276-285, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.11.018>
- [14] He, J., Wang, S., Liu, Y., et al.: Mechanical behavior of a partially encased composite girder with corrugated steel web: Interaction of shear and bending, *Engineering*, 3 (2017) 6, pp. 806-816, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.11.005>
- [15] Piloto, P.A.G., Ramos-Gaviñán, A.B., Gonçalves, C., et al.: Experimental bending tests of partially encased beams at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, 92 (2017), pp. 23-41, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.014>
- [16] Nakamura, S., Momiyama, Y., Hosaka, T., et al.: New technologies of steel/concrete composite bridges, *Journal of Constructional Steel Research*, 58 (2002) 1, pp. 99-130, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00030-X)
- [17] He, J., Liu, Y., Lin, Z., et al.: Shear behavior of partially encased composite I-girder with corrugated steel web: Numerical study, *Journal of Constructional Steel Research*, 79 (2012), pp. 166-182, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.07.018>
- [18] He, J., Liu, Y., Chen, A., et al.: Bending behavior of concrete-encased composite I-girder with corrugated steel web, *Thin-walled structures*, 74 (2014), pp. 70-84, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.08.003>
- [19] De Nardin, S., El Debs, A.L.H.C.: Study of partially encased composite beams with innovative position of stud bolts, *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (2009) 2, pp. 342-350, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.021>
- [20] Kindmann, R., Bergmann, R., Cajot, L.G., et al.: Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 27 (1993) 1-3, pp. 107-122, [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(93\)90009-h](https://doi.org/10.1016/0143-974X(93)90009-h)
- [21] Barros, J.A.O., Figueiras, J.A.: Flexural behavior of SFRC: testing and modeling, *Journal of materials in civil engineering*, 11 (1999) 4, pp. 331-339, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:4\(331\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:4(331))
- [22] Li, V.C.: Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance, 2008.
- [23] Yoo, D.Y., Yoon, S.: Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers, *Engineering Structures*, 102 (2015), pp. 409-423, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.029>
- [24] Hao, N., Yang, Y., Xue, Y., et al.: Shear performance of partially encased composite beams with high-strength steel and UHPC, *Journal of Constructional Steel Research*, 211 (2023), Paper 108217, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108217>
- [25] Zhao, B., Huo, H., Ran, C., et al.: Flexural behavior of castellated partially encased composite (PEC) beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 214 (2024), Paper 108509, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108509>
- [26] Guvel, S.T., Budak, A., Karatas, I.: Novel meta-ensemble modelling approach and comparison of machine-learning models for rebar price estimation, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 1, pp. 27-41, <https://doi.org/10.14256/JCE.4029.2024>
- [27] Kovačević, M., Ivanišević, N., Petronijević, P., Despotović, V.: Construction cost estimation of reinforced and prestressed concrete bridges using machine learning, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 1, pp. 1-13, <https://doi.org/10.14256/JCE.2738.2019>
- [28] Fang, X., Wang, C., Li, H., et al.: Influence of mesoscopic pore characteristics on the splitting-tensile strength of cellular concrete through deep-learning based image segmentation, *Construction and Building Materials*, 315 (2022), Paper 125335, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125335>
- [29] Rabi, M., Jweihan, Y.S., Abarkan, I., et al.: Machine learning-driven web-post buckling resistance prediction for high-strength steel beams with elliptically-based web openings, *Results in Engineering*, 21 (2024), Paper 101749, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101749>

- [30] Ma, C., Chi, J., Kong, F., et al.: Prediction on the seismic performance limits of reinforced concrete columns based on machine learning method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 177 (2024), Paper 108423, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108423>
- [31] Liu, T., Wang, Z., Zeng, J., et al.: Machine-learning-based models to predict shear transfer strength of concrete joints, *Engineering Structures*, 249 (2021), Paper 113253, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113253>
- [32] Zhang, T., Xu, W., Wang, S., et al.: Seismic response prediction of a damped structure based on data-driven machine learning methods, *Engineering Structures*, 301 (2024), Paper 117264, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117264>
- [33] Gatheeshgar, P., Ranasinghe, R.S.S., Simwanda, L., et al.: Machine learning prediction of web-crippling strength in cold-formed steel beams with staggered slotted perforations, *Structures*, 71 (2025), Paper 108079, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108079>
- [34] Alshboul, O., Almasabha, G., Shehadeh, A., et al.: A comparative study of LightGBM, XGBoost, and GEP models in shear strength management of SFRC-SBWS, *Structures*, 61 (2024), Paper 106009, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106009>
- [35] Taffese, W.Z., Zhu, Y.: Explainable machine learning for predicting flexural capacity of reinforced UHPC beams, *Engineering Structures*, 343 (2025), Paper 121188, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121188>
- [36] Wang, C., Guo, H., Jiang, C., et al. Physics guided neural network framework for predicting shear strength of corroded reinforced concrete beams, *Engineering Failure Analysis*, (2025), Paper 109970, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109970>
- [37] Yan, H.: Test and Theoretical Research on Flexural Performance of PEC Honeycomb Beams with Different Structural Forms, Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [38] Li, Q.Z.: Test and Theoretical Research on the Bending Performance of Open-Web PEC Beams, Zhengzhou University, 2022. (in Chinese)
- [39] Zhao, B.D., Zhang, X.F., Wang, W., et al.: Experimental Study on Flexural Performance of Partially Coated Honeycomb steel-concrete composite Beams, *Journal of Building Structures*, 44 (2023) 7, pp. 161–171. (in Chinese)
- [40] Zou, C.R., Ke, M.Z., Zhou, H.B., et al.: The influence of web opening of main steel components on the performance of partially coated steel-concrete composite beams, *Building Structures*, 53 (2023) S1, pp. 1842–1847. (in Chinese)
- [41] Wang, N., Hou, H., Wang, Y., et al.: Flexural behavior of partially encased cellular beams: Tests and design implications, *Engineering Structures*, 293 (2023), Paper 116631, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116631>
- [42] Liang, J., Zou, W., Wang, C., et al.: Flexural performance of partially encased steel-concrete composite beams with web opening, *Structures*, 64 (2024), Paper 106666, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106666>
- [43] Ye, Y., Yao, Y., Liao, H., et al.: Flexural performance of hollow-core partially-encased composite beams, *Journal of Building Engineering*, 45 (2022), Paper 103432, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103432>
- [44] Bai, Y.Z., Cheng, X., An, Y., et al.: Experimental Study on Flexural Performance of Light Steel - Lightweight Aggregate Concrete PEC Beams, *Engineering Mechanics*, 3 (2025), pp. 1–13. (in Chinese)
- [45] Zhang, J.X.: Research on the Bearing Capacity of Lightweight Aggregate Concrete PEC Beams, Taiyuan University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [46] He, Z.L.: Research on the Bending Performance of Prestressed Partially Wrapped Composite Beams, Guangxi University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [47] Qi, H., Li, J., Wang, X., et al.: Experimental Study on Bending Performance of PEC Beam with Sinusoidal Waveform Web, *Steel Structure*, 38 (2023) 6, pp. 22–31. (in Chinese)
- [48] Chu, L., Guo, X., Li, J., et al.: Experimental study on the flexural behavior of partially encased composite beams with corrugated steel webs, *Advances in Structural Engineering*, 27 (2024) 6, pp. 1071–1084, <https://doi.org/10.1177/13694332241242974>
- [49] Liao, H.Y.: Research on the Mechanical Performance of Hollow Part Outsourced Concrete Composite Beams, Chang 'an University, 2023. (in Chinese)
- [50] Yan, J.: Research on the Bending Performance of Normal Sections of Double-C Light Steel Partially Wrapped FSLC Composite Beams, Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [51] Yao, Y.F.: Research on the Mechanical Properties and Design Methods of Concrete Composite Beams with Hollow Part Cladding, Chang 'an University, 2023. (in Chinese)
- [52] Deng, J.: Research on Flexural Performance of Partially Coated Concrete Beams with Honeycomb Steel, East China University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [53] Deng, C.J.: Experimental and Theoretical Research on Bending Performance of Wave-Web PEC Beams, Zhengzhou University, 2023. (in Chinese)
- [54] Taffese, W.Z., Zhu, Y.: Explainable machine learning for predicting flexural capacity of reinforced UHPC beams, *Engineering Structures*, 343(2025), Paper 121188, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121188>
- [55] Agarwal, H., Shariff, M.N., Mangalathu, S.: Prediction of flexural crack width of reinforced concrete beams using interpretable machine learning algorithms, *Construction and Building Materials*, 485 (2025), Paper 141628, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141628>
- [56] Liu, X., Figueredo, G.P., Gordon, G.S.D., et al.: Data-driven shear strength prediction of RC beams strengthened with FRCM jackets using machine learning approach, *Engineering Structures*, 325 (2025), Paper 119485, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119485>
- [57] Technical specification for partially clad steel-concrete composite structures: T/CECS 719-2020, Beijing: China Architecture and Construction Press, 2020. (in Chinese)
- [58] Test method standard for physical and mechanical properties of concrete: GB/T50081-2019, Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [59] Tensile test method for metal materials at room temperature GB/T 228-2002, Beijing: Standards Press of China, 2002. (in Chinese)

Dodatak A

Literatura	Broj	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	Y
[37]	1	150.00	300.00	5.00	3.00	95.00	95.00	226.08	0.50	464.70	296.00	318.00	28.82	0.05	0.95	850	104.50
	2	150.00	300.00	5.00	3.00	95.00	95.00	226.08	0.50	464.70	296.00	318.00	28.82	0.05	0.95	850	120.40
	3	150.00	300.00	5.00	3.00	95.00	95.00	307.72	0.68	422.20	296.00	318.00	28.82	0.05	0.95	850	106.30
	4	150.00	300.00	5.00	3.00	95.00	95.00	226.08	0.50	464.70	296.00	318.00	28.82	0.05	0.95	850	107.10
[38]	5	200.00	400.00	10.00	6.00	60.00	60.00	157.00	0.20	390.81	390.81	408.13	42.96	0.06	0.94	1600	319.04
	6	200.00	500.00	10.00	6.00	75.00	75.00	157.00	0.16	391.81	390.81	408.13	42.96	0.05	0.95	1600	412.54
	7	200.00	400.00	8.00	6.00	60.00	60.00	157.00	0.20	392.81	415.50	408.13	42.96	0.05	0.95	1600	236.42
	8	200.00	400.00	10.00	6.00	90.00	90.00	157.00	0.20	393.81	390.81	408.13	42.96	0.06	0.94	1600	324.42
	9	200.00	400.00	8.00	12.00	60.00	60.00	157.00	0.20	394.81	415.50	408.13	42.96	0.06	0.94	1600	307.52
	10	200.00	500.00	8.00	12.00	75.00	75.00	157.00	0.16	395.81	415.50	408.13	42.96	0.05	0.95	1600	398.98
	11	200.00	400.00	6.00	12.00	60.00	60.00	157.00	0.20	396.81	408.13	408.13	42.96	0.05	0.95	1600	266.56
	12	200.00	400.00	8.00	12.00	90.00	90.00	157.00	0.20	397.81	415.50	408.13	42.96	0.07	0.93	1600	303.74
	13	200.00	400.00	10.00	6.00	60.00	60.00	157.00	0.20	390.81	390.81	408.13	42.96	0.06	0.94	1600	374.16
	14	200.00	400.00	10.00	6.00	45.00	45.00	157.00	0.20	390.81	390.81	408.13	42.96	0.06	0.94	1600	388.56
	15	200.00	400.00	10.00	6.00	45.00	45.00	157.00	0.20	390.81	390.81	408.13	42.96	0.06	0.94	1600	394.16
	16	200.00	400.00	10.00	6.00	60.00	60.00	157.00	0.20	390.81	390.81	408.13	30.00	0.06	0.94	1600	380.18
	17	200.00	400.00	10.00	6.00	60.00	60.00	157.00	0.20	390.81	390.81	408.13	50.00	0.06	0.94	1600	386.82
	18	200.00	400.00	10.00	6.00	60.00	60.00	157.00	0.20	390.81	260.54	272.09	42.96	0.06	0.94	1600	222.75
	19	200.00	400.00	10.00	6.00	60.00	60.00	157.00	0.20	390.81	586.22	612.20	42.96	0.06	0.94	1600	313.06
[39]	20	200.00	400.00	10.00	8.00	60.00	60.00	157.00	0.20	390.81	390.81	408.13	42.96	0.06	0.94	1600	403.18
	21	175.00	200.00	6.00	5.00	44.00	44.00	157.00	0.45	481.50	361.50	376.20	45.61	0.07	0.93	900	107.40
	22	175.00	300.00	6.00	5.00	44.00	44.00	157.00	0.30	482.50	361.50	376.20	45.61	0.05	0.95	900	193.70
	23	175.00	300.00	6.00	5.00	44.00	44.00	157.00	0.30	483.50	361.50	376.20	45.61	0.05	0.95	900	165.00
[40]	24	175.00	350.00	6.00	5.00	44.00	44.00	157.00	0.26	484.50	361.50	376.20	45.61	0.04	0.96	900	187.10
	25	175.00	300.00	6.00	5.00	44.00	44.00	157.00	0.30	485.50	361.50	376.20	46.61	0.05	0.95	900	193.70
	26	175.00	300.00	6.00	5.00	144.00	144.00	157.00	0.30	486.50	361.50	376.20	47.61	0.07	0.93	900	165.00
	27	150.00	300.00	4.50	3.20	45.50	45.50	226.08	0.50	464.70	296.00	318.00	19.30	0.04	0.96	850	109.80
[41]	28	150.00	300.00	4.50	3.20	45.50	45.50	307.72	0.68	422.20	296.00	318.00	19.30	0.04	0.96	850	120.90
	29	150.00	300.00	4.50	3.20	45.50	45.50	226.08	0.50	464.70	296.00	318.00	19.30	0.04	0.96	850	111.40
	30	150.00	300.00	4.50	3.20	45.50	45.50	226.08	0.50	464.70	296.00	318.00	19.30	0.04	0.96	850	110.90
	31	175.00	300.00	6.00	5.00	44.00	44.00	157.00	0.30	481.50	361.50	376.20	43.30	0.05	0.95	900	165.00
[25]	32	175.00	350.00	6.00	5.00	19.00	19.00	157.00	0.26	481.50	361.50	376.20	43.30	0.04	0.96	900	187.10
	33	175.00	300.00	6.00	5.00	25.00	44.00	157.00	0.30	481.50	361.50	376.20	43.30	0.05	0.95	900	132.30
	34	150.00	194.00	9.00	6.00	38.00	38.00	0.00	0.00	0.00	312.00	320.00	32.90	0.11	0.89	400	89.19
	35	150.00	194.00	9.00	6.00	38.00	38.00	0.00	0.00	0.00	312.00	320.00	46.90	0.11	0.89	400	99.74
[42]	36	150.00	194.00	9.00	6.00	38.00	38.00	0.00	0.00	0.00	312.00	320.00	32.90	0.11	0.89	400	80.13
	37	150.00	194.00	9.00	6.00	38.00	38.00	0.00	0.00	0.00	312.00	320.00	32.90	0.11	0.89	400	85.02
	38	150.00	194.00	9.00	6.00	38.00	38.00	0.00	0.00	0.00	312.00	320.00	32.90	0.11	0.89	400	78.35
	39	150.00	191.00	9.00	6.00	38.00	38.00	0.00	0.00	0.00	312.00	320.00	32.90	0.09	0.91	400	73.53
	40	150.00	189.00	9.00	6.00	38.00	38.00	0.00	0.00	0.00	312.00	320.00	32.90	0.08	0.92	400	64.87
	41	150.00	194.00	9.00	6.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	312.00	320.00	32.90	0.13	0.87	400	98.22

Dodatak A - nastavak

Literatura	Broj	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	y
[43]	42	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	390.00	400.00	420.00	61.90	0.08	0.38	1250	576.88
	43	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	390.00	400.00	420.00	82.30	0.08	0.47	1250	553.75
	44	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	390.00	400.00	420.00	61.90	0.08	0.38	1250	560.63
	45	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	200.96	0.20	390.00	400.00	420.00	61.90	0.08	0.92	1250	612.50
	46	160.00	300.00	8.00	4.00	142.00	142.00	157.00	0.33	454.62	356.80	464.24	33.10	0.08	0.92	900	305.00
[44]	47	160.00	300.00	8.00	4.00	142.00	142.00	157.00	0.33	454.62	356.80	464.24	33.10	0.08	0.92	900	283.10
	48	200.00	300.00	6.00	4.00	144.00	144.00	157.00	0.26	454.62	325.75	464.24	33.10	0.06	0.94	900	226.30
	49	200.00	300.00	6.00	4.00	144.00	144.00	157.00	0.26	454.62	325.75	464.24	33.10	0.06	0.94	900	215.60
	50	250.00	400.00	6.00	4.00	194.00	194.00	157.00	0.16	454.62	325.75	464.24	33.10	0.05	0.95	900	432.80
	51	250.00	400.00	6.00	4.00	194.00	194.00	157.00	0.16	454.62	325.75	464.24	33.10	0.05	0.95	900	405.60
[45]	52	200.00	300.00	6.00	4.00	144.00	144.00	157.00	0.26	454.62	317.17	424.57	33.10	0.06	0.94	900	226.29
	53	200.00	300.00	6.00	4.00	144.00	144.00	157.00	0.26	454.62	317.17	424.57	33.10	0.06	0.94	900	215.64
	54	200.00	300.00	6.00	4.00	144.00	144.00	157.00	0.26	454.62	317.17	424.57	33.10	0.06	0.94	900	224.58
	55	200.00	300.00	6.00	4.00	144.00	144.00	157.00	0.26	454.62	317.17	424.57	41.45	0.06	0.94	900	255.14
	56	160.00	300.00	6.00	4.00	144.00	144.00	157.00	0.33	454.62	317.17	424.57	33.10	0.06	0.94	900	203.96
[46]	57	150.00	194.00	9.00	6.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	305.00	305.00	31.45	0.13	0.87	950	88.30
	58	150.00	194.00	9.00	6.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	305.00	305.00	31.45	0.13	0.87	950	113.57
	59	150.00	194.00	9.00	6.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	305.00	305.00	31.45	0.13	0.87	950	111.91
	60	150.00	194.00	9.00	6.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	305.00	305.00	31.45	0.13	0.87	950	107.46
	61	200.00	200.00	12.00	8.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	305.00	305.00	31.45	0.16	0.84	950	160.17
[47]	62	200.00	200.00	12.00	8.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	305.00	305.00	31.45	0.16	0.84	950	177.97
	63	200.00	200.00	12.00	8.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	305.00	305.00	31.45	0.16	0.84	950	186.27
	64	200.00	200.00	12.00	8.00	88.00	88.00	0.00	0.00	0.00	305.00	305.00	31.45	0.16	0.84	950	184.41
	65	250.00	640.00	12.00	2.50	308.00	308.00	157.00	0.10	476.42	438.36	275.76	35.10	0.05	0.95	2400	899.16
	66	250.00	640.00	12.00	2.50	308.00	308.00	157.00	0.10	477.42	438.36	275.76	35.10	0.05	0.95	2400	911.04
[12]	67	250.00	640.00	12.00	2.50	308.00	308.00	157.00	0.10	478.42	438.36	275.76	35.10	0.05	0.95	2400	887.64
	68	250.00	640.00	12.00	2.50	308.00	308.00	157.00	0.10	479.42	438.36	275.76	35.10	0.05	0.95	2400	886.08
	69	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.38	1200	553.80
	70	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	479.42	400.00	420.00	82.30	0.08	0.38	1200	531.60
	71	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.47	1200	538.20
[12]	72	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	200.96	0.20	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.92	1200	588.00
	73	120.00	400.00	6.00	6.00	194.00	194.00	401.92	0.84	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.42	1200	424.05
	74	150.00	500.00	6.00	8.00	244.00	244.00	401.92	0.54	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.37	1200	775.73
	75	180.00	600.00	6.00	10.00	294.00	294.00	401.92	0.37	479.42	400.00	420.00	61.90	0.07	0.33	1200	742.84
	76	210.00	700.00	6.00	12.00	344.00	344.00	401.92	0.27	479.42	400.00	420.00	61.90	0.07	0.30	1200	1680.69
	77	240.00	800.00	6.00	14.00	394.00	394.00	401.92	0.21	479.42	400.00	420.00	61.90	0.07	0.28	1200	2406.90
	78	120.00	600.00	8.00	6.00	292.00	292.00	401.92	0.56	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.34	1200	998.97
	79	150.00	700.00	8.00	8.00	342.00	342.00	401.92	0.38	479.42	400.00	420.00	61.90	0.07	0.30	1200	1515.84
	80	180.00	800.00	8.00	10.00	392.00	392.00	401.92	0.28	479.42	400.00	420.00	61.90	0.07	0.28	1200	1121.87
	81	210.00	400.00	8.00	12.00	192.00	192.00	401.92	0.48	479.42	400.00	420.00	61.90	0.09	0.47	1200	934.39

Dodatak A - nastavak

Literatura	Broj	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	Y
[12]	82	240.00	500.00	8.00	14.00	242.00	242.00	401.92	0.33	479.42	400.00	420.00	61.90	0.09	0.41	1200	1028.57
	83	120.00	700.00	10.00	6.00	340.00	340.00	401.92	0.48	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.32	1200	1456.93
	84	150.00	800.00	10.00	8.00	390.00	390.00	401.92	0.33	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.28	1200	1824.80
	85	180.00	400.00	10.00	10.00	190.00	190.00	401.92	0.56	479.42	400.00	420.00	61.90	0.10	0.44	1200	903.16
	86	210.00	500.00	10.00	12.00	240.00	240.00	401.92	0.38	479.42	400.00	420.00	61.90	0.09	0.39	1200	1127.33
	87	240.00	600.00	10.00	14.00	290.00	290.00	401.92	0.28	479.42	400.00	420.00	61.90	0.09	0.36	1200	1539.81
	88	120.00	800.00	12.00	6.00	388.00	388.00	401.92	0.42	479.42	400.00	420.00	61.90	0.08	0.31	1200	1963.41
	89	150.00	400.00	12.00	8.00	188.00	188.00	401.92	0.67	479.42	400.00	420.00	61.90	0.11	0.42	1200	915.76
	90	180.00	500.00	12.00	10.00	238.00	238.00	401.92	0.45	479.42	400.00	420.00	61.90	0.10	0.37	1200	1020.71
	91	210.00	600.00	12.00	12.00	288.00	288.00	401.92	0.32	479.42	400.00	420.00	61.90	0.09	0.34	1200	1540.81
	92	240.00	700.00	12.00	14.00	338.00	338.00	401.92	0.24	479.42	400.00	420.00	61.90	0.09	0.31	1200	1938.34
[48]	93	120.00	500.00	14.00	6.00	236.00	236.00	401.92	0.67	479.42	400.00	420.00	61.90	0.10	0.37	1200	1176.83
	94	150.00	600.00	14.00	8.00	286.00	286.00	401.92	0.45	479.42	400.00	420.00	61.90	0.10	0.33	1200	1226.84
	95	180.00	700.00	14.00	10.00	336.00	336.00	401.92	0.32	479.42	400.00	420.00	61.90	0.09	0.30	1200	1720.04
	96	210.00	800.00	14.00	12.00	386.00	386.00	401.92	0.24	479.42	400.00	420.00	61.90	0.09	0.28	1200	2115.44
	97	240.00	400.00	14.00	14.00	186.00	186.00	401.92	0.42	479.42	400.00	420.00	61.90	0.12	0.50	1200	1338.63
	98	640.00	250.00	14.00	2.50	306.00	306.00	307.72	0.19	437.72	640.13	372.45	32.39	0.12	0.88	1263	568.02
	99	640.00	250.00	12.00	2.50	308.00	308.00	307.72	0.19	437.72	640.13	372.45	56.54	0.11	0.89	1245	602.88
	100	640.00	250.00	12.00	2.50	308.00	308.00	904.32	0.57	459.54	640.13	372.45	32.39	0.11	0.89	1279	621.31
	101	640.00	200.00	12.00	2.50	308.00	308.00	307.72	0.24	437.72	640.13	372.45	32.39	0.13	0.87	1238	427.78
	102	640.00	250.00	12.00	2.50	308.00	308.00	307.72	0.19	437.72	640.13	372.45	32.39	0.11	0.89	1246	516.48
	103	400.00	250.00	8.00	10.00	192.00	192.00	200.96	0.20	390.00	400.00	420.00	61.90	0.10	0.90	1250	581.25
[49]	104	400.00	250.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	390.00	400.00	420.00	61.90	0.10	0.36	1250	553.75
	105	400.00	250.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	390.00	400.00	420.00	82.30	0.10	0.36	1250	560.63
	106	400.00	250.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	390.00	400.00	420.00	61.90	0.10	0.45	1250	587.50
	107	400.00	250.00	8.00	10.00	192.00	192.00	401.92	0.40	390.00	400.00	420.00	61.90	0.10	0.36	1250	609.38
[50]	108	200.00	150.00	4.00	4.00	96.00	96.00	0.00	0.00	0.00	295.00	295.00	54.40	0.10	0.90	640	80.40
	109	250.00	150.00	4.00	4.00	121.00	121.00	0.00	0.00	0.00	295.00	295.00	54.40	0.10	0.90	640	118.50
	110	300.00	150.00	4.00	4.00	146.00	146.00	0.00	0.00	0.00	295.00	295.00	54.40	0.10	0.90	640	173.50
	111	300.00	150.00	4.00	4.00	146.00	146.00	0.00	0.00	0.00	295.00	295.00	42.40	0.10	0.90	640	168.50
	112	300.00	150.00	4.00	4.00	146.00	146.00	0.00	0.00	0.00	295.00	295.00	61.30	0.10	0.90	640	176.50
	113	300.00	150.00	4.00	4.00	146.00	146.00	157.00	0.35	400.00	295.00	295.00	54.40	0.10	0.90	640	187.50
	114	300.00	150.00	4.00	4.00	146.00	146.00	157.00	0.35	400.00	295.00	295.00	54.40	0.10	0.90	640	182.50
	115	300.00	150.00	4.00	4.00	146.00	146.00	307.72	0.68	415.00	295.00	295.00	54.40	0.10	0.90	640	204.00
	116	300.00	150.00	4.00	4.00	146.00	146.00	508.68	1.13	418.00	295.00	295.00	54.40	0.10	0.90	640	216.50
	117	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.41	1250	576.00
	118	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	80.00	0.08	0.41	1250	553.80
	119	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.49	1250	560.60
[51]	120	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.41	1250	587.50
	121	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.41	1250	612.50
	122	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.33	1250	564.71

Dodatak A - nastavak

Literatura	Broj	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	Y
[51]	123	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.58	1250	571.81
	124	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.66	1250	583.25
	125	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	40.00	0.08	0.41	1250	512.78
	126	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	50.00	0.08	0.41	1250	548.57
	127	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	70.00	0.08	0.41	1250	559.22
	128	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	270.00	282.00	80.00	0.08	0.41	1250	443.08
	129	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	448.00	468.00	80.00	0.08	0.41	1250	642.82
	130	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	483.00	504.00	80.00	0.08	0.41	1250	702.72
	131	250.00	400.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	529.00	552.00	80.00	0.08	0.41	1250	836.93
	132	250.00	400.00	8.00	6.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.06	0.42	1250	543.40
	133	250.00	400.00	8.00	8.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.07	0.42	1250	512.64
	134	250.00	400.00	8.00	12.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.09	0.40	1250	610.56
	135	250.00	400.00	8.00	14.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.09	0.39	1250	647.19
	136	250.00	400.00	6.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.07	0.42	1250	528.44
[52]	137	250.00	400.00	7.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.07	0.41	1250	484.81
	138	250.00	400.00	9.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.40	1250	627.84
	139	250.00	400.00	10.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.80	390.00	400.00	420.00	60.00	0.09	0.40	1250	684.35
	140	250.00	360.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.89	390.00	400.00	420.00	60.00	0.09	0.34	1250	523.64
	141	250.00	380.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.85	390.00	400.00	420.00	60.00	0.08	0.38	1250	476.03
	142	250.00	420.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.77	390.00	400.00	420.00	60.00	0.07	0.44	1250	633.60
	143	250.00	440.00	8.00	10.00	192.00	192.00	803.84	0.73	390.00	400.00	420.00	60.00	0.07	0.46	1250	696.96
	144	150.00	194.00	9.00	6.00	42.00	42.00	0.00	0.00	0.00	320.00	322.00	32.00	0.11	0.89	500	211.23
	145	150.00	194.00	9.00	6.00	42.00	42.00	0.00	0.00	0.00	320.00	322.00	46.90	0.11	0.89	500	220.88
	146	150.00	194.00	9.00	6.00	42.00	42.00	0.00	0.00	0.00	320.00	322.00	32.00	0.09	0.91	500	187.43
[53]	147	150.00	194.00	9.00	6.00	42.00	42.00	0.00	0.00	0.00	320.00	322.00	32.00	0.08	0.92	500	192.12
	148	150.00	194.00	9.00	6.00	42.00	42.00	0.00	0.00	0.00	320.00	322.00	32.00	0.11	0.89	500	193.21
	149	150.00	194.00	9.00	6.00	37.00	37.00	0.00	0.00	0.00	320.00	322.00	32.00	0.11	0.89	500	160.36
	150	150.00	194.00	9.00	6.00	48.50	48.50	0.00	0.00	0.00	320.00	322.00	32.00	0.11	0.89	500	124.34
	151	250.00	640.00	12.00	2.50	308.00	308.00	157.00	0.10	478.42	438.36	275.76	57.73	0.05	0.95	2400	1175.68
	152	200.00	640.00	12.00	2.50	308.00	308.00	157.00	0.12	478.42	438.36	275.76	35.10	0.05	0.95	2400	884.61

Dodatak B

Number	All				Treniranje (80 %)				Testiranje (20 %)			
	min	max	mean	std	min	max	mean	std	min	max	mean	std
x_1	120.00	640.00	225.36	95.62	120.00	640.00	226.40	104.61	120.00	300.00	221.29	47.22
x_2	150.00	800.00	370.51	158.37	150.00	800.00	370.63	160.94	150.00	700.00	370.06	150.42
x_3	4.00	14.00	8.35	2.47	4.00	14.00	8.34	2.44	4.00	14.00	8.37	2.60
x_4	2.50	14.00	7.21	3.17	2.50	14.00	7.08	3.09	2.50	14.00	7.68	3.48
x_5	19.00	394.00	161.99	97.22	25.00	394.00	165.16	99.18	19.00	340.00	149.63	89.63
x_6	19.00	394.00	162.12	97.06	37.00	394.00	165.31	98.97	19.00	340.00	149.63	89.63
x_7	0.00	904.32	317.14	270.69	0.00	904.32	314.93	270.22	0.00	803.84	325.75	276.84
x_8	0.00	1.13	0.36	0.28	0.00	0.85	0.35	0.27	0.00	1.13	0.38	0.31
x_9	0.00	486.50	354.72	173.08	0.00	486.50	353.30	175.55	0.00	481.50	360.26	165.33
x_{10}	260.54	640.13	377.96	70.95	260.54	640.13	377.77	73.24	295.00	586.22	378.71	62.30
x_{11}	272.09	612.20	383.47	60.13	272.09	552.00	384.14	56.93	275.76	612.20	380.86	72.28
x_{12}	19.30	82.30	48.93	15.04	19.30	82.30	48.35	14.74	19.30	82.30	51.21	16.23
x_{13}	0.04	0.16	0.08	0.03	0.04	0.16	0.08	0.03	0.04	0.16	0.08	0.03
x_{14}	0.28	0.96	0.70	0.27	0.28	0.96	0.71	0.27	0.32	0.96	0.70	0.27
x_{15}	400.00	2,400.00	1,124.55	407.65	400.00	2,400.00	1,108.85	392.04	400.00	2,400.00	1,185.81	465.59
γ	64.87	2,406.90	529.36	461.70	64.87	2,406.90	532.36	476.71	85.02	1,539.81	517.67	404.66