

Primljen / Received: 24.2.2023.
Ispravljen / Corrected: 31.1.2024.
Prihvaćen / Accepted: 3.2.2024.
Dostupno online / Available online: 10.3.2024.

Razvoj računalnog programa za proračun pojačanja stupova pomoću FRP-a: studija slučaja

Autori:



Mr.sc. **Onder Peker**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Aydin u Istanbulu, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
opeker@stu.aydin.edu.tr
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Mehmet Fatih Altan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Arel u Istanbulu, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
mehmetfatihaltan@arel.edu.tr

Stručni rad

Onder Peker, Mehmet Fatih Altan

Razvoj računalnog programa za proračun pojačanja stupova pomoću FRP-a: studija slučaja

Ovaj rad predstavlja opsežno istraživanje građevine u Ankari (Turska) posebno se fokusirajući na njezino postojeće stanje, inicijativu za naknadno pojačanje i posljedični razvoj računalnog programa za proračun. Procjena trenutnog stanja zgrade, potresnih opterećenja i očekivanih naprezanja u konstrukciji provedena je prema Turskim potresnim normama iz 2018. Analiziran je konstrukcijski model, uključujući podatke dobivene izravnim proučavanjem, pregledima i uzorcima betonskih jezgri iz zgrade te armaturnih elemenata, primjenom nelinearnih metoda proračuna. Sanacijske mjere poduzete su nakon prepoznavanja nedostataka u ponašanju konstrukcije, uključujući pojačanje stupova i odabir ploča primjenom vlaknima armiranih polimernih (FRP) kompozita. Zatim su autori izradili računalni program za proračun pojačanja stupova vlaknima armiranih polimernih kompozita (eng. FRP Composite Column Strengthening software). Navedeni računalni program olakšava proračun aksijalne tlačne čvrstoće, posmične čvrstoće i povećanja duktilnosti za stupove nakon pojačanja.

Ključne riječi:

pojačanje stupova, tlačna čvrstoća, posmična čvrstoća, duktilnost, vlaknima armirani polimeri (FRP), računalni program

Professional paper

Onder Peker, Mehmet Fatih Altan

Software development for retrofitting columns with FRP composites: A case study

This manuscript delineates an extensive inquiry into a structure in Ankara, Turkey, specifically focusing on its existing state, retrofitting initiative, and concomitant software development. The evaluation of the building's current state, earthquake loads, and anticipated structural stresses was conducted per the Turkish Seismic Code of 2018. The structural model was analysed, incorporating data derived from on-site inspections, surveys, and samples from the building's concrete core and reinforcement elements by employing non-linear calculation methods. Remedial measures were undertaken after recognising deficiencies in the structure's performance, including strengthening columns and selecting slabs by applying Fibre-Reinforced Polymer (FRP) composites. Subsequently, the authors engineered the FRP Composite Column Strengthening software. This software facilitates the computation of axial compression strength, shear strength, and ductility enhancements for columns after the retrofitting process.

Key words:

retrofitting columns, compression strength, shear strength, ductility, FRP, software

1. Uvod

Dobro je poznato da građevine smještene u regijama koje su podložne potresima, posebice u zemljama u razvoju, često pokazuju neprikladno ponašanje pri izloženosti seizmičkim silama. Glavni čimbenik koji pridonosi ovom nedostatku jest nepoštivanje utvrđenih propisa i normi koji reguliraju konstrukcijsku cjelovitost. U kontekstu Turske, vidljiva su dva istaknuta nedostatka u projektiranju zgrada: relativno niska tlačna čvrstoća betona i neadekvatna iskorištenost spona. Kao posljedica toga, primarni konstrukcijski elementi, posebice stupovi, oblikovani ili izgrađeni na ovaj način, podložni su krtnim oštećenjima izazvanim potresom ili, u ekstremnim slučajevima, potpunom rušenju.

Upućujući na nepraktičnost identificiranja i rušenja svih građevina koje sadrže elemente sklone krtnom oštećenju, ekonomičniji i pragmatičniji pristup uključuje pojačanje tih elemenata. Od konvencionalnih metoda, primjenjuju se različite tehnike koje obuhvaćaju armiranobetonske obloge i proširenja posmičnih zidova, dok se suvremene metode i materijali primjenjuju u konstrukcijskom pojačanju. Među navedenim strategijama, implementacija polimera armiranih vlaknima (engl. Fibre-Reinforced Polymer - FRP) s ciljem pojačavanja građevine vrijedna je pozornosti. Poznato po svojoj jednostavnosti primjene i brzini provedbi, pojačanje pomoću FRP-a poželjno je zbog svojih prednosti koje uključuju povećanu čvrstoću i trajnost, malu specifičnu težinu, minimalan utjecaj na arhitektonske konfiguracije i ograničena razmatranja za raspodjelu opterećenja u pojačanim konstrukcijskim elementima.

U projektiranju zgrada otpornih na potres, pristup projektiranju temeljen na ponašanju primjenjuje se diljem svijeta. Slijedeći taj pristup, konstrukcijski elementi neće se oštetiti ako ostanu unutar granica elastičnosti pri potresima niskog intenziteta, djelujući izvan granice elastičnosti pri potresima umjerenog intenziteta, ali s oštećenjima koja se mogu lako popraviti te s relativno velikim oštećenjima pri jakim potresima, ali bez potpunog urušavanja i gubitka života. U skladu s tim, građevinski elementi i cijela konstrukcija moraju pokazivati duktilno ponašanje i apsorbirati energiju u potresnim uvjetima kako bi ostali netaknuti i kako ne bi došlo od potpunog urušavanja. Jedan od najvažnijih razloga zašto se kod postojećih građevinskih elemenata ne može postići traženo duktilno ponašanje jest nedovoljna količina spona. Osim toga, niska tlačna čvrstoća betona povećava omjer uzdužnog opterećenja i nosivosti stupova na tlačnu silu, što rezultira krtošću konstrukcijskih elemenata. Zbog svega navedenog, građevine se moraju projektirati i graditi prema važećim propisima. Postojeće građevine s nedovoljnom protupotresnom sigurnošću potrebno je pojačati odgovarajućim tehnikama. Pojačanje je potrebno izvesti pomoću najprikladnije tehnike uzimajući u obzir željene karakteristike.

Pojačavanje elemenata pomoću FRP materijala jedna je od takvih metoda. Ta vlakna, proizvedena primjenom materijala kao što su ugljik, staklo, bazalt i aramid (Kevlar®), imaju visok modul elastičnosti i trajnost, malu specifičnu težinu, jednostavnu i

brzu primjenu i otpornost na utjecaje okoliša, a posebice na koroziju. Istraživanja o pojačanjima pomoću FRP-a obično se fokusiraju na betonske elemente. Nedavno su provedena istraživanja na armiranobetonskim elementima s odličnim rezultatima. Ponašanje konstrukcijskih elemenata pojačanih FRP kompozitima ispitivano je kao funkcija mnogih parametara. Kaya i sur. istraživali su učinak FRP-a na tlačnu i savojnu čvrstoću betona. Proizvedeni uzorci kocaka podvrgnuti su jednoosnom tlačnom ispitivanju, a uzorci prizmi podvrgnuti su ispitivanju savijanjem u četiri točke. Dobiveni rezultati su uspoređeni [1]. Aykac i sur. ispitivali su pojačanje armiranobetonskih greda kompozitnim materijalom koji se sastoji od ugljičnog materijala i čeličnih ploča lijepljenih izvana. Parametri koji su uzeti u obzir uključuju ugljičnu tkaninu, broj slojeva čelične ploče, redoslijed lijepljenja i debljinu čelične ploče. Pokazalo se da istodobna uporaba dvaju materijala značajno pridonosi boljem ponašanju i nosivosti greda, a redoslijed vezivanja je najvažnija varijabla koja određuje ponašanje grede [2]. Cetinkaya i sur. radili su na popravku i pojačanju armiranobetonskih greda upotrebom FRP materijala. Kao rezultat istraživanja, naveli su da je popravak/pojačanje pomoću FRP-a uvelike povećalo nosivost armiranobetonskih greda [3]. Degertekin i sur. predstavili su različite prijedloge pojačanja primjenom Sta4CAD softvera za armiranobetonsku zgradu s nedovoljnom protupotresnom sigurnošću. Analiza troškova za svaki prijedlog izvedena je pomoću OSKA softvera za proračun približnog iznosa troškova. Rezultati ovih preporuka uspoređeni su međusobno te s rezultatima postojeće zgrade [4]. Ilki i sur. istraživali su ponašanje armiranobetonskih elemenata normalne i niske čvrstoće kružnog, kvadratnog i pravokutnog presjeka, pojačanih FRP materijalima, pod uzdužnim tlačnim opterećenjem. Njihovi pokusi pokazali su da je namotavanje polimernih materijala armiranih vlaknima i okomitih komponenti u poprečnom smjeru značajno povećalo tlačnu čvrstoću i sposobnost deformacije, a izvijanje uzdužnih pojačanja odgođeno je do vrlo velikih deformacija [5]. Koksal i sur. proveli su numeričku analizu savijanja nepojačanih i vlaknastim polimerom namotanih armiranobetonskih greda pomoću konačnih elemenata. Autori su metodom konačnih elemenata modelirali nearmirane i armiranobetonske grede koje su prethodno ispitivali u svojim eksperimentalnim istraživanjima na temelju postojeće literature. Rezultati dobiveni pokusima su uspoređeni. U istraživanju je uspješno modelirano ponašanje dviju savijenih nepojačanih i triju greda omotanih FRP-om pomoću softvera konačnih elemenata LUSAS [6]. Saribiyik je istraživao učinak uporabe FRP kompozita kao hibrida na pojačavanje betona. Pregledom rezultata ispitivanja utvrđeno je da se tlačna čvrstoća i sposobnost deformacije betona povećavaju s povećanjem broja namotanih slojeva. Osim toga, pokazalo se da je hibridno pojačanje učinkovitije od pojedinačnog pojačanja [7]. Altan je istraživao izvijanje pravokutnih laminiranih ortotropnih ploča koje imaju pravokutni otvor pomoću pristupa umjetne neuronske mreže. Autor je izradio računalni program PASCAL koji se primjenjuje za usavršavanje i testiranje neuronskih

mreža [8]. Castillo i sur. proučavali su seizmičko ponašanje armiranobetonskih stupova pojačanih na savijanje pomoću FRP ploča i FRP sidra. U ispitivanju je projektirano, izvedeno i ispitano šest armiranobetonskih stupova s ciljem određivanja seizmičkog ponašanja armiranih stupova. Pet stupova pojačano je polimernim pločama i sidrima armiranih vlaknima. Otkrili su da uobičajeno primjenjivano idealizirano bilinearno elastično-idealno plastično ponašanje ne odgovara ponašanju betonskih stupova pojačanih FRP-om jer su stupovi sadržavali dva kritična momenta umjesto jednog, odnosno moment savijanja pri kojem dolazi do otvaranja vlakana i moment pri kojem dolazi do sloma. Opsežno se raspravljalo o ponašanju stupa te je predložena trilinearna krivulja na temelju dvaju spomenutih momenata i ponašanja zabilježenog tijekom ispitivanja [9]. Gao je proučavao praćenje akustičnih emisija i procjenu oštećenja betonskih stupova pojačanih FRP-om pod cikličnim opterećenjem. Autori su ispitivali pukotine stupova pojačanih FRP-om pod bočnim cikličnim opterećenjem na temelju tehnika akustične emisije (AE), s ciljem rješavanja ovog problema. Otkrili su da tehnike akustične emisije učinkovito otkrivaju proces pucanja armiranobetonskih stupova pojačanih FRP-om i stupova nepojačanih FRP-om [10]. Ana i sur. istraživali su krajnje naprezanje FRP omotača na pojačanje betonskih stupova kvadratnog presjeka kompozitnim materijalima. Navedeno istraživanje predstavlja eksperimentalni program izveden na 38 betonskih uzoraka kvadratnog presjeka omotanih FRP-om. Rezultati su pokazali da radijus zaobljenja uglova uvelike utječe na ponašanje stupova kvadratnog presjeka omotanih FRP-om [11]. Nanni i Bradford [12], Karbhari i Gao [13], Samaan i sur. [14], Toutanji [15], Saafi i sur. [16], Fam i Rizkalla [17], Becque i sur. [18] te Au i Buyukozturk [19] razvili su opsežne eksperimentalne podatke za uzorke cilindra za različite vrste vlakana, orijentacije i debljine omotača, bilo za betonske cijevi omotane FRP-om ili FRP cijevi ispunjene betonom. Demers i Neale [20], Lin i Liao [21] i Ilki i sur. [22] ispitali su armiranobetonske stupove kružnog presjeka s FRP omotačem. Rochette i Labossiere [23], Wang i Restrepo [24], Shehata i sur. [25], Ilki i sur. [26], Rocca i sur. [27] i Campione [28] ispitali su kvadratne i pravokutne betonske stupove omotane FRP kompozitima. Neka od postojećih istraživanja usredotočila su se na učinak omjera uzdužnog opterećenja (uzdužno opterećenje/uzdužna nosivost) na seizmičko ponašanje konvencionalnih AB stupova proizvedenih s betonom normalne čvrstoće (25 do 35 MPa) nakon omatanja FRP-om (Matamaros i sur. [29], Wang i sur. [30]). Utjecaj primjene betona visoke čvrstoće (do približno 170 MPa) na seizmičko ponašanje AB stupova omotanih FRP-om je također ispitan (Cui i Sheikh [31], Ozbakkaloglu i sur. [32], i Demir i sur. [33]). Međutim, broj istraživanja o seizmičkom ponašanju AB stupova omotanih FRP-om proizvedenih od betona niske kvalitete je ograničen (Ilki i sur. [34], Ozcan i sur. [35] i Ghatte i sur. [36]), iako takvi tipovi stupova čine veliki dio postojećeg fonda zgrada u mnogim zemljama u razvoju. Kar i Biswal istražili su rezultate više od 250 ispitivanja izvedenih na AB T-gredama pojačanim FRP-om s nedovoljnom nosivosti na posmik i na ključnim karakteristikama materijala.

Također su usporedili točnost sedam široko primjenjivanih smjernica za projektiranje s predviđanjem doprinosa FRP-a posmičnoj nosivosti na temelju eksperimentalnog doprinosa FRP-a na posmik [37]. Demir i sur. proučavali su dostupne eksperimentalne podatke o cikličnom ponašanju naprezanja i deformacija betonskih/armiranobetonskih elemenata omotanih FRP-om te su ih ocijenili pomoću usporedbe. Raspravlja se o točnosti nekoliko modela naprezanja i deformacija predloženih za beton omotan FRP-om za predviđanje krivulja histereznih anvelopa i grana rasterećenja i ponovnog opterećenja cikličnih odnosa naprezanja i deformacije ispitanih uzoraka. Autori su također predložili predviđanje grana za rasterećenje i ponovno opterećenje na temelju cikličnih ispitivanja provedenih samo u ovu svrhu [38].

Uvođenje naprednih polimernih kompozita u građevinske objekte bio je vrlo brz proces, a izvanredna svojstva ovih materijala omogućila su projektantima veće povjerenje u potencijal materijala i posljedično njihovu primjenu u raznim građevinskim projektima, uključujući pojačanje zgrada [39]. Stoga su provedena brojna istraživanja o pojačavanju postojećih konstrukcijskih elemenata pomoću navedenih materijala. Štoviše, polimeri armirani vlaknima kao konstrukcijski materijal postali su popularni u programima stručnog usavršavanja u građevinarstvu [40]. Nechevska-Cvetanovska i sur. istražili su prednosti i izvedivost primjene CFRP-a za pojačanje AB stupova zgrada. Provedena su kvazistatička ispitivanja kako bi se procijenila učinkovitost materijala. Nakon analize rezultata dobivenih nelinearnom statičkom i nelinearnom analizom vremenskog zapisa, može se zaključiti da model pojačan CFRP-om ima 60 % veći kapacitet duktilnosti izražen preko pomaka i 7,7 % veću nosivost od modela bez CFRP-a [41]. Cilj istraživanja Demira i sur. bio je povećati posmičnu nosivost armiranobetonskih (AB) greda primjenom elemenata od polimera armiranih ugljičnim vlaknima (CFRP) i inovativnih sidrišta [42]. Autori navode da nalazi istraživanja pokazuju poboljšanu učinkovitost greda s CFRP elementima. Za određivanje teorijske nosivosti greda primjenjuje se nelinearna metoda konačnih elemenata u kombinaciji s američkim i talijanskim smjernicama. Uspoređeni su teorijski rezultati i rezultati ispitivanja, iz čega je zaključeno da se predložene metode mogu pouzdano primjenjivati i da projektanti mogu pojačati AB grede pomoću ovih metoda putem jednostavnih proračuna. Istraživanje Nechevske-Cvetanovske i sur. u ovom istraživanju usredotočeno je na primjenu novih materijala za popravak i pojačanje armiranobetonskih stupova u zgradama smještenima u područjima sklonim seizmičkoj aktivnosti [43]. Autori iznose odabrane rezultate laboratorijskih ispitivanja integriranih materijala i neke analitičke nalaze iz planiranih AB stupova ovijenih CFRP-om za kvazistatička ispitivanja. Konstrukcijska procjena građevine koja se ispituje uključivala je detaljnu analizu korištenjem uzoraka betonskih jezgri i uzoraka armature te primjenom sofisticiranih nelinearnih metodologija proračuna. Prepoznajući uočene nedostatke u pogledu usklađenosti s propisanim zahtjevima učinkovitosti

potrebnih za sigurnost života, izrađen je sveobuhvatan projekt za pojačanje strukturnog okvira. Računalni program primijenjen u tu svrhu strogo se pridržavao smjernica navedenih u Turskim seizmičkim normama 2018. (TSC-2018) [45]. Taj je računalni program, uz strogo pridržavanje regulatornih normi, olakšao implementaciju vlaknima armiranih polimera (FRP) na stupove i selektivno odabrane podne ploče, čime se povećala seizmička otpornost građevine.

2. Materijali i metode

2.1. Sta4-CAD (v14.1)

STA4CAD [42] je programski paket za simultanu analizu višekatnih armiranobetonskih konstrukcija izloženih statičkim i seizmičkim opterećenjima te vjetru.

Kao statički pristup analizi primijenjena je metoda krutosti. U verziji 14.0, koja omogućuje 3D analizu, jednadžbe ravnoteže primjenjuju se za proračun dx , dy i dz pomaka ploče etaže. Pretpostavlja se da ploče u horizontalnom smjeru imaju krutu vezu. Računalni program automatski izvodi modeliranje konstrukcije definiranjem konstrukcijskih podataka kao ulaznih podataka u plan primjene. Računalni program istovremeno formulira i rješava jednadžbe ravnoteže, uzimajući u obzir krutost elemenata. Statičke analize se provode trodimenzionalno, pri čemu se mreža ili nepravilne grede u planu tretiraju kao konačni elementi, a njihovi rezultati se vrednuju kao jedna greda.

2.2. Informacije o građevini

Budući da je zgrada imala arhitektonske projekte ali ne i projekte mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcije, najprije je napravljen elaborat nosivog sustava. Različite etaže građene su u različito vrijeme, a neke su čak bile izvan upotrebe. U ovom slučaju, klasifikacija temeljena na etažama također je izgubila

svoju valjanost, a svaka ploča je modelirana tako da unutar sebe pokazuje ponašanje krute dijafragme. Za dimenzioniranje građevinskih elemenata primijenjena je turska norma 498 [46]. Nakon elaborata konstrukcijskog sustava, zgrada je modelirana u programu Sta4CAD v14.1 [45] prema rezultatima rendgenskih snimaka i uzorcima betona i armature uzetih iz zgrade čiji su broj i metode u skladu s relevantnim propisima i normama. Tablica 1. prikazuje tlačne čvrstoće jezgri betona zgrade na razini svake etaže. Slika 1. prikazuje proces vađenja betonskih jezgri. Slijedeći tursku normu EN 12504-2 [47], vrijednost odskakanja određena je u očvrslom betonu čeličnim čekićem s oprugom, a rezultati su uspoređeni s tlačnom čvrstoćom betona dobivenom iz uzoraka betonske jezgre. Uočeno je da je postignuta odgovarajuća korelacija.



Slika 1. Uzimanje uzoraka betonske jezgre iz konstrukcije bušenjem

Postojeća armatura određena skidanjem pokrova i rendgenskim snimkama primijenjena je u matematičkom

Tablica 1. Rezultati mjerenja

Etaža	Element	Opterećenje pri lomu [N]	Tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće [N/mm ²]
Druga podrumaska etaža	Stup	128100	18,66	20,68
Druga podrumaska etaža	Stup	154700	22,77	
Druga podrumaska etaža	Stup	138600	20,40	
Prva podrumaska etaža	Stup	183300	26,98	29,01
Prva podrumaska etaža	Stup	177500	26,13	
Prva podrumaska etaža	Stup	230300	33,90	
Prizemlje	Stup	158000	23,26	17,95
Prizemlje	Stup	112500	16,56	
Prizemlje	Stup	95300	14,03	
Prvi kat	Stup	103200	15,19	16,29
Prvi kat	Stup	108600	15,99	
Prvi kat	Stup	120100	17,68	

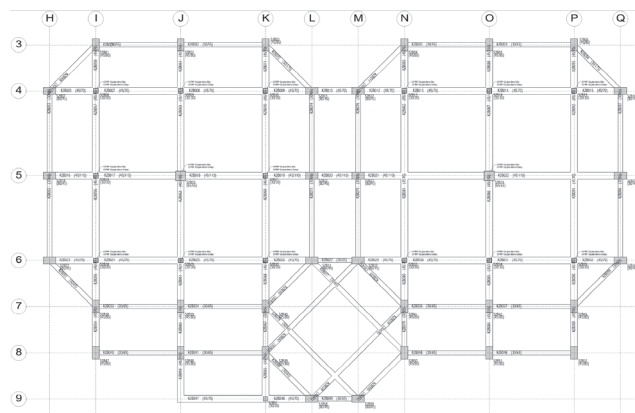
Tablica 2. Sta4CAD izlaz utvrđene armature nekih od stupova u prizemlju

Stup	Dimenzije [mm]	Armatura	A_s smanjenje	N_d [N]	M_{vx} [Nm]	M_{vy} [Nm]
SZ01	450 x 800	2x5Φ18 + 2x3Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	41,38	21,78	40,14
SZ02	450 x 800	2x7Φ18 + 2x5Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	71,44	31,18	58,00
SZ03	450 x 800	2x5Φ18 + 2x3Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	41,86	21,83	40,24
SZ04	450 x 800	2x5Φ18 + 2x3Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	42,29	21,89	40,34
SZ05	450 x 800	2x5Φ18 + 2x3v18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	71,31	25,24	46,50
SZ06	450 x 800	2x5Φ18 + 2x3Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	41,87	21,84	40,25
SZ07	800 x 450	2x5Φ18 + 2x3Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	41,55	40,17	21,80
SZ11	800 x 450	2x5Φ18 + 2x3Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	41,23	40,10	21,76
SZ12	800 x 450	2x4Φ18 + 2x3Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	42,05	36,78	20,50
SZ16	800 x 450	2x5Φ18 + 2x3Φ18 + Φ8/10/10	$A_{sF} = 0,80A_s$	41,68	40,20	21,81



Slika 2. Vanjski izgled zgrade

modelu zgrade (tablica 2.). Pri definiranju površine armature primijenjen je koeficijent iskorištenosti armature od 0,80 zbog korozije armature uočene pri skidanju pokrova. Tlačne čvrstoće betona dobivene iz uzoraka jezgri za stupove, grede i ploče definirane su uzimanjem prosjeka dobivenog na bazi etaža.

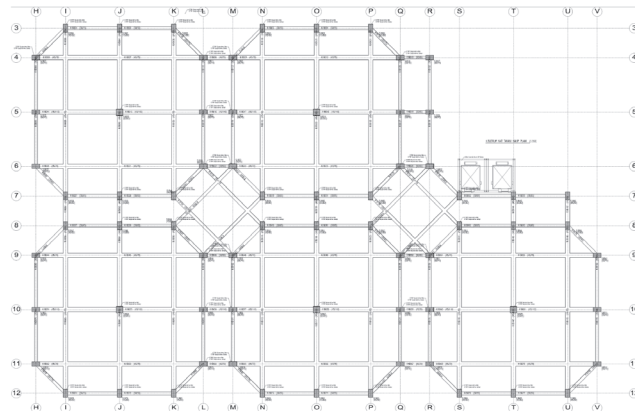


Slika 3. Plan oplate stropa druge podrumске etaže

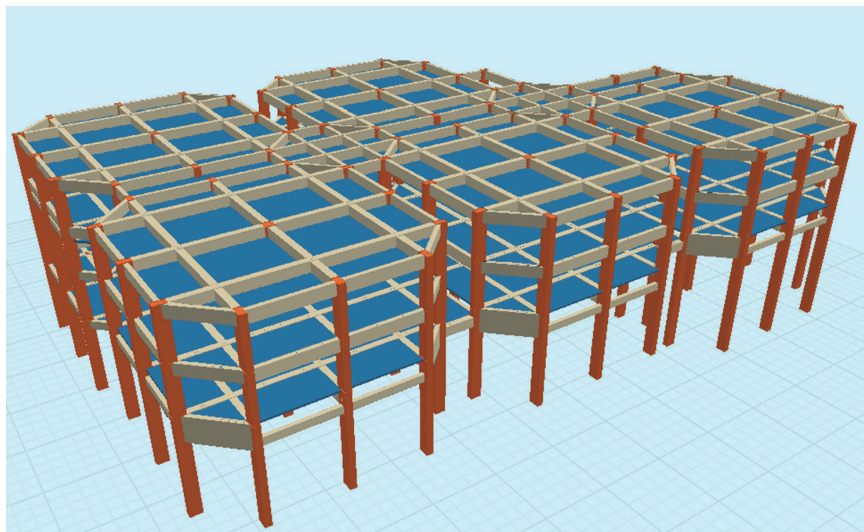
Zgrada se sastoji od dva podruma, prizemlja i jednog kata. Slika 2. prikazuje fotografiju zgrade. Građevina je izgrađena na različitim visinama, a primijenjeni su osmerokutni blokovi između kojih nema dilatacijskih spojeva.

Svi tlocrti zgrade, s različitim etažama građenima u različito vrijeme, izrađeni su provjerom postojećih arhitektonskih projekata. Prikaz nosivog sustava druge podrumске etaže je na slici 3., a isti prikazi prve podrumске etaže, prizemlja i prvog kata prikazani su na slici 4. Veličine stupova primijenjenih u cijeloj zgradi bile su 300 x 300 mm, 650 x 650 mm i 800 x 450 mm. Iako su postojale različite veličine

greda, one su uglavnom odgovarale veličinama 300 x 650 mm, 450 x 700 mm i 450 x 1100 mm. Ploča prvog kata izgrađena je u obliku obrnutih greda. Izmjerene su visine etaža (od kata do kata) od 5,00 m u podrumskim etažama, 3,40 m u prizemlju i 3,45 m na prvom katu. Konstrukcija čiji je matematički model pripremljen na temelju ovih podataka prikazana je na slici 5.



Slika 4. Plan oplate stropa prve podrumске etaže, prizemlja i prvog kata



Slika 5. Prikaz matematičkog modela zgrade izrađenog pomoću programa Sta4CAD

opterećenje od približno 0,587 tona/m² izvedeno je na ovim elementima, točnije na krovnoj plohi.

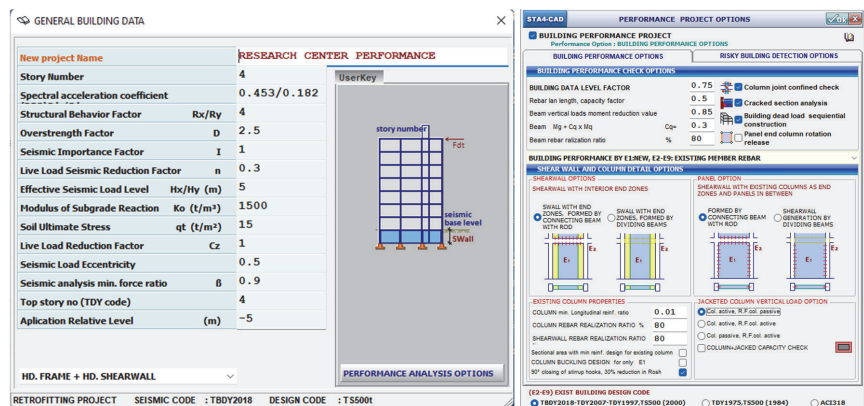
3. Analiza i odluke

Građevina koja je detaljno opisana u 2. poglavlju analizirana je u skladu s pravilima navedenima u relevantnim normama i propisima, a rezultati analize navedeni su u ovom poglavlju.

Sukladno s tim, 2,8 % stupova prve podrumске etaže, 1,4 % stupova prizemlja i 21,4 % stupova prvoga kata u smjeru X nisu zadovoljili granično stanje očuvanja života. Ta su prekoračenja bila 5,6 %, 5,7 % i 17,1 % za stupove prve podrumске etaže, prizemlja i prvoga kata, odnosno za Y smjer. Za sve kombinacije nisu otkriveni nikakvi elementi u zoni velikih oštećenja i urušavanja greda. Detaljan raspored oštećenih elemenata koji se odnose na stupove prikazan je u tablici 3.

Nakon utvrđivanja oštećenja elemenata, vlasnik zgrade je obaviješten o načinima njezinog pojačanja te je napravljena okvirna analiza troškova za nekoliko različitih načina pojačanja. U skladu s tim, uprava je odlučila pojačati konstrukciju FRP materijalima, uzimajući u obzir razloge za brzu i jednostavnu realizaciju i visok omjer relativne cijene i koristi. Proračuni su napravljeni za stupove koji zahtijevaju pojačanje na temelju pravila

navedenih u relevantnom odjeljku TSC-2018 [44]. Iz rezultata analize, iako nisu uočena oštećenja u zonama velikih oštećenja i urušavanja na stupovima druge podrumске etaže, odlučeno je primijeniti pojačanje zbog korozije vezane uz lokaciju koja je uočena u tim stupovima nakon uzimanja u obzir mišljenja vlasnika zgrade. Zbog arhitektonskih promjena koje će se kasnije u projektu realizirati na objektu, povećavaju se mase poda, a znatno će se povećati i ukupna masa objekta, posebno zbog



Slika 6. Informacije o konstrukciji i analizi opcija granica ponašanja

Informacije o zgradi i opcije granica ponašanja upotrijebljene u analizi preuzete su iz programa Sta4CAD [45] i prikazane na slici 6. Modelirana konstrukcija analizirana je nelinearnim proračunskim metodama.

Osim toga, jedinice za obradu zraka i spremnici vode bili su smješteni na stropnoj ploči prvog kata. Relevantna opterećenja djelovala su kao jednoliko raspoređeno opterećenje na ploču. Sukladno s tim, uz opterećenje uzrokovano snijegom, dodatno

Tablica 3. Detaljna raspodjela oštećenja stupova

Etaža	Smjer	(-X)				(+X)				(-Y)				(+Y)			
		MD	PD	HD	CZ	MD	PD	HD	CZ	MD	PD	HD	CZ	MD	PD	HD	CZ
Prvi kat		97,8	0,7	0,2	1,3	97,2	0,6	0,0	2,2	96,4	1,2	0,7	1,7	98,2	0,9	0,0	1,0
Prizemlje		97,6	2,0	0,4	0,0	95,8	4,2	0,0	0,0	95,5	4,5	0,0	0,0	93,1	5,3	1,6	0,0
Prva podrumška etaža		63,1	33,2	1,7	1,9	67,0	30,0	2,9	0,0	70,4	29,6	0,0	0,0	79,6	15,4	3,9	1,2
Druga podrumška etaža		82,9	17,1	0,0	0,0	75,2	24,8	0,0	0,0	92,1	7,9	0,0	0,0	95,1	4,9	0,0	0,0

MD: minimalno oštećenje (eng. *minimum damage*), PD: izraženo oštećenje (eng. *prominent damage*), HD: veliko oštećenje (eng. *high damage*), CZ: zona urušavanja (eng. *collapse zone*)

dodatnih opterećenja od strojarske opreme u potkrovlju. Nakon toga, vlasnik zgrade želio je pojačati sve stupove. Napravljeni su izračuni za 204 stupa unutar građevine. Proračun pojačanja pomoću FRP-a materijala izveden je pomoću C++ računalne aplikacije zasnovane na jeziku koju su razvili autori primjenom računalnog programa Microsoft® Visual Studio [45] (slika 7.). Pomoću navedenog programa napravljeni su proračuni za stupove s nedovoljnom nosivošću poprečnog presjeka prema pravilima navedenima u TSC-2018 [41]. Izračunana je potrebna količina volumetrijskog omjera vlaknastih polimera, tlačna čvrstoća ovijenog betona (f_{cc}) te bočni tlak koji daje FRP (f_1). Jednosmjerna ugljična vlakna s težinom vlakana od 300 g/m² odabrana su za primjenu. Mehanička svojstva tog materijala preuzeta su s internetske stranice proizvođača (tablica 4.). Tlačna čvrstoća ovijenog betona izračunana je pomoću izraza (1).

$$f_{cc} = f_{cm} \left(1 + 2.4 \left(\frac{f_1}{f_{cm}} \right) \right) \geq 1.2 f_{cm} \quad (1)$$

f_{cm} je tlačna čvrstoća neovijenog betona, a f_1 je količina bočnog tlaka koju osigurava ovijanje od FRP-a. f_1 izračunava se pomoću izraza (2).

$$f_1 = \frac{1}{2} \kappa_a \rho_f \varepsilon_f E_f \quad (2)$$

U izrazu (2), κ_a je koeficijent učinkovitosti oblika presjeka, a ρ_f je volumetrijski omjer omotača od FRP-a. Efektivna vrijednost deformacije ε_f izračunana je izrazima (3.1) i (3.2). κ_a dan je u izrazu (4) za različite presjeke.

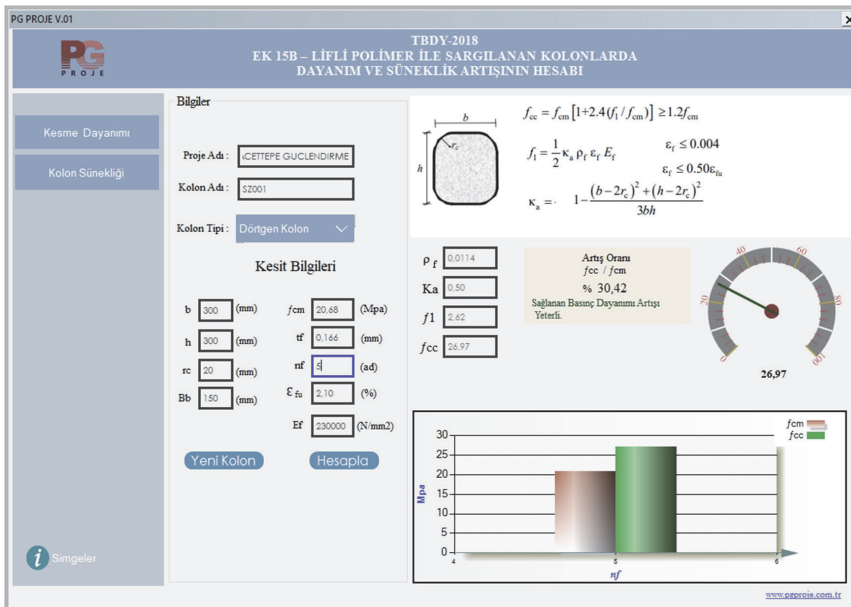
$$\varepsilon_f \leq 0,004 \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_f \leq 0,504 \varepsilon_{fu} \quad (3.2)$$

ε_{fu} je izduženje pri prekidu FRP-a.

$$\kappa_a = \begin{cases} 1 & \text{Kružni presjek} \\ \left(\frac{b}{h} \right) & \text{Eliptički presjek} \\ 1 - \frac{(b-2r_c)^2 + (h-2r_c)^2}{3bh} & \text{Pravokutni presjek} \end{cases} \quad (4)$$

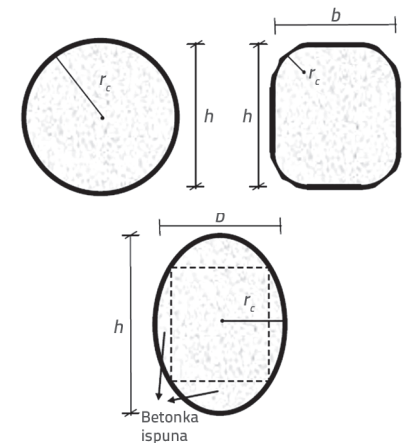
U izrazu (4), b i h su dimenzije kratke i duge stranice za pravokutne presjeke, odgovarajuće dimenzije elipse za kratke i duge dimenzije u eliptičnim presjecima, a r_c je polumjer zaobljenja na uglovima za pravokutne presjeke (slika 8.).



Slika 7. Tlačna čvrstoća ovijenog betona izračunana za stup 800 x 450 mm

Tablica 4. Mehanička svojstva FRP-a

Modul elastičnosti [N/mm ²]	230000
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	4900
Proračunska debljina presjeka [mm]	0,166
Ukupna masa vlakana [g/m ²]	300
Izduženje pri lomu [%]	2,10



Slika 8. Prikaz b , h i r_c parametara za različite presjeke

S obzirom na jednostavnost primjene, planirana metoda pojačanja za stupove bila je ograničena na tri različite vrste. U skladu s tim, odlučeno je da se za stupove presjeka 300 x 300 mm i 650 x 650 mm izrade tri sloja polimernog omotača od ugljičnih vlakana i pet slojeva za stupove poprečnog presjeka 800 x 450 mm. Tablica 5. uspoređuje postignute tlačne čvrstoće betona za pojačane stupove s postojećim čvrstoćama.

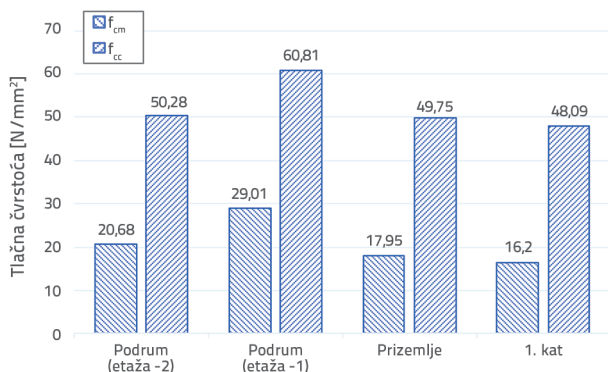
Tablica 5. Maksimalne čvrstoće postignute nakon pojačanja stupova

Presjek stupa [mm]	Druga podrumaska etaža		Prva podrumaska etaža		Prizemlje		Prvi kat	
	f_{cm}^1 [N/mm ²]	f_{cc}^2 [N/mm ²]	f_{cm}^1 [N/mm ²]	f_{cc}^2 [N/mm ²]	f_{cm}^1 [N/mm ²]	f_{cc}^2 [N/mm ²]	f_{cm}^1 [N/mm ²]	f_{cc}^2 [N/mm ²]
300 x 300	20,68	50,28	29,01	60,81	17,95	49,75	16,29	48,09
650 x 650	20,68	45,16	29,01	55,31	17,95	44,25	16,29	42,59
850 x 450	20,68	48,52	29,01	56,85	17,95	45,79	16,29	44,13

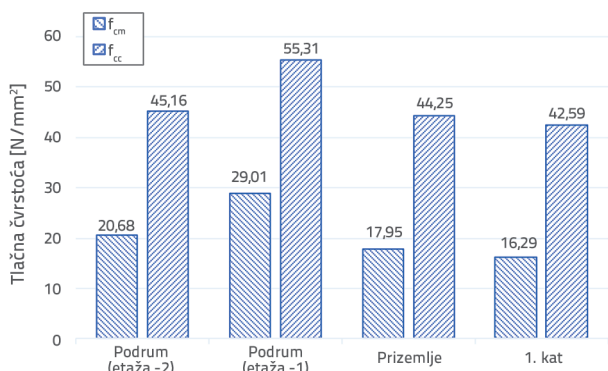
f_{cm}^1 - postojeća tlačna čvrstoća betona (prosječno za etažu), f_{cc}^2 - postignuta tlačna čvrstoća betona

Slike 9., 10. i 11. prikazuju postojeće i postignute tlačne čvrstoće betona za stupove presjeka 300 x 300 mm, 650 x 450 mm i 850 x 450 mm za drugu podrumsku etažu, prvu podrumsku etažu, prizemlje i prvi kat.

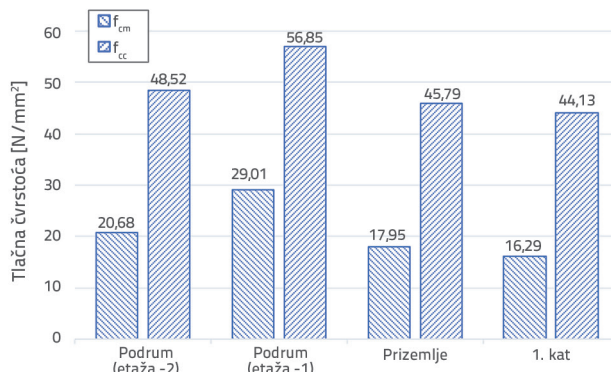
Slika 12. prikazuje omjer tlačne čvrstoće betona f_{cm} postignute do postojeće tlačne čvrstoće betona f_{cc} za svaki kat i svaki oblik presjeka.



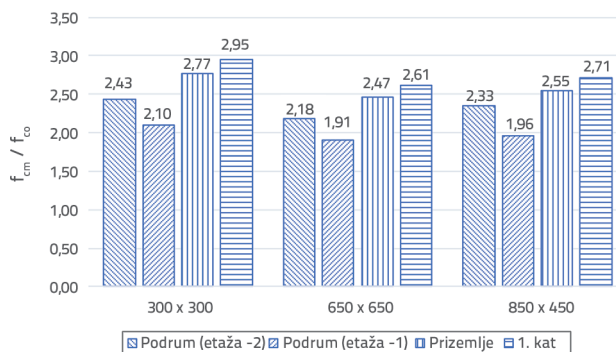
Slika 9. Postojeće i postignute tlačne čvrstoće betona za stupove presjeka 300 x 300 mm za drugu podrumsku etažu, prvu podrumsku etažu, prizemlje i prvi kat



Slika 10. Postojeće i postignute tlačne čvrstoće betona za stupove presjeka 650 x 450 mm za drugu podrumsku etažu, prvu podrumsku etažu, prizemlje i prvi kat



Slika 11. Postojeće i postignute tlačne čvrstoće betona za stupove presjeka 850 x 450 mm za drugu podrumsku etažu, prvu podrumsku etažu, prizemlje i prvi kat



Slika 12. Postojeća i postignuta povećanja tlačne čvrstoće betona za drugu podrumsku etažu, prvu podrumsku etažu, prizemlje i prvi kat za stupove presjeka 300 x 300, 650 x 450 i 850 x 450 mm

Slika 12. pokazuje da je do najmanjega povećanja došlo za stupove prve podrumске etaže. Slično tome, utvrđeno je da je najveći porast bio kod stupova prvog kata zgrade. Ilki i sur. [5] pokazali su da je konačni učinak ovijanja FRP-om ograničen na tlačnu čvrstoću ovijenog betona. U skladu s tim, tlačna čvrstoća raste u stupovima prve podrumске etaže s najvećom postojećom tlačnom čvrstoćom betona (29,01 N/mm²) na temelju uzoraka betonske jezgre, koja je u prosjeku za sve

tipove presjeka iznosila 1,99, dok su postojeće tlačne čvrstoće betona bile najmanje ($16,29 \text{ N/mm}^2$). Porast tlačne čvrstoće u stupovima prvoga kata iznosio je u prosjeku 2,76 za sve tipove presjeka.

4. Zaključak

Kao što je navedeno u poglavlju 3., građevina je sustavno modelirana u skladu s odredbama navedenima u propisima TSC-2018. Proces modeliranja uključivao je podatke prikupljene iz uzoraka betonske jezgre i armature, opažanja na terenu i postojećih projekata. Analitički okvir uključivao je nelinearne metodologije izračuna. Kao odgovor na utvrđene nedostatke u ispunjavanju propisanih normi potrebnih za sigurnost života, pažljivo je osmišljen sveobuhvatan projekt pojačanja primjenom FRP materijala, posebno ciljajući na stupove i odabrane ploče etaža.

Sukladno s time, 2,8 % stupova prve podrumске etaže, 1,4 % stupova prizemlja i 21,4 % stupova prvoga kata u smjeru X nisu zadovoljili granično stanje očuvanja života. Ta su prekorčenja bila 5,6 %, 5,7 % i 17,1 % za stupove prve podrumске etaže, prizemlja i prvoga kata, u smjeru Y. Za sve kombinacije nisu otkriveni nikakvi elementi u zoni velikih oštećenja i urušavanja greda.

Na temelju nekih od razloga objašnjenih u poglavlju 3., projektirano je pojačanje primjenom FRP kompozita s 3 i 5 slojeva, jednosmjerno tkanih i sa specifičnom težinom od 300 g/m^2 , slijedeći određeni sustav u svim stupovima te uzimajući u obzir jednostavnost primjene.

Paralelno s istraživanjima u literaturi, utvrđeno je da povećanja tlačne čvrstoće betona nisu sasvim povezana s postojećom tlačnom čvrstoćom betona, a postignuta čvrstoća varira ovisno o količini ovijanja vlaknima armiranim polimerima. U skladu s tim, tlačna čvrstoća raste u stupovima prve podrumске etaže

s najvećom postojećom tlačnom čvrstoćom betona ($29,01 \text{ N/mm}^2$) na temelju uzoraka betonskih jezgri, a porast tlačne čvrstoće je u prosjeku za sve tipove presjeka iznosio 1,99. Najmanja postojeća tlačna čvrstoća stupova prvoga kata iznosila je $16,29 \text{ N/mm}^2$ i kod ovih stupova je nakon ojačanja postignut najveći porast tlačne čvrstoće u prosječnom iznosu od 2,76 za sve presjeke stupova.

Za proračun pojačanja pomoću FRP materijala primijenjen je program koji su autori razvili u programskom jeziku C++ pomoću računalnog programa Microsoft® Visual Studio [45]. Budući da stupovi nisu zadovoljili granično stanje očuvanja života, stupovi su pojačani FRP materijalima. Uz navedeni program, izračunana je volumetrijska količina FRP-a koji se primjenjuje za pojačavanje i tlačna čvrstoća f_{cc} ovijenog betona. Razni proračuni pokazali su da je program dobro funkcionirao u svim situacijama. Također je prikladan za buduća ažuriranja vezana za druge proračune pojačanja s FRP-om drugih elemenata konstrukcije.

5. Simboli korišteni u članku

b - dimenzija kraće stranice pravokutnog presjeka; odgovarajuće dimenzije elipse za kratke dimenzije u eliptičnim presjecima

f_{cm} - tlačna čvrstoća ovijenog betona

f_{cc} - trenutna tlačna čvrstoća neovijenog betona

f_1 - količina bočnog tlaka koju osigurava ovijanje FRP-om

h - dimenzija dulje stranice pravokutnog presjeka; odgovarajuće dimenzije elipse za duge dimenzije u eliptičnim presjecima

r_c - radijus zaobljenja na uglovima pravokutnih presjeka

ε_f - efektivna vrijednost izduljenja

ε_{fu} - izduženje pri lomu

κ_a - koeficijent učinkovitosti oblika presjeka

ρ_f - volumetrijski omjer

LITERATURA

- [1] Kaya, T., Aras, M., Çalışkan, Ö.: Beton Basınç ve Eğilme Dayanımlarına CFRP'nin Etkisi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20 (2017), pp. 1-9.
- [2] Aykaç, B., Acar, D.: Betonarme Kirişlerin Diştan Yapıştırılmış Karbon Kumaş ve Çelik Levhalardan Oluşan Kompozit Malzemeye Güçlendirilmesi, Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University, 29 (2014) 1.
- [3] Çetinkaya, N., Kaplan, H., Şenel, Ş.M.: Betonarme Kirişlerin Lifli Polimer (Frp) Malzemeler Kullanılarak Onarım ve Güçlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (2011) 3, pp. 291-298.
- [4] Değertekin, S.Ö., Haluk, Ş.: Deprem güvenliği yetersiz betonarme bir bina için farklı güçlendirme önerilerinin karşılaştırılması, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 6 (2015) 2, pp. 121-129.
- [5] İlki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C., Kumbasar, N.: FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns, Journal of Materials in Civil Engineering, 20 (2008) 2, pp. 169-188.
- [6] Köksal, H.O., Aktan, S., Bozdoğan, K.B.: Yalin Ve Lifli Polimer Sargılı Betonarme Kirişlerde Eğilme Davranışının Sonlu Eleman Modellemesi, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 24 (2019) 3, pp. 255-272.
- [7] Sarıbiyık, A.: Betonların Güçlendirilmesinde FRP Kompozitlerin Hibrit Olarak Kullanımının etkisi, Sakarya University Journal of Science, 22 (2018) 2, pp. 383-391.
- [8] Altan, M.F.: Artificial neural network approach to buckling coefficients of laminated orthotropic rectangular plates with a centrally rectangular hole, Scientific Research and Essays, 6 (2011) 24, pp. 5265-5270.
- [9] del Rey Castillo, E., Griffith, M., Ingham, J.: Seismic behavior of RC columns flexurally strengthened with FRP sheets and FRP anchors, Composite Structures, 203 (2018), pp. 382-395.
- [10] Ma, G., Li, H.: Acoustic emission monitoring and damage assessment of FRP-strengthened reinforced concrete columns under cyclic loading, Construction and Building Materials, 144 (2017), pp. 86-98.

- [11] de Diego, A., Arteaga, Á., Fernández, J.: Strengthening of square concrete columns with composite materials, Investigation on the FRP jacket ultimate strain, *Composites Part B: Engineering*, 162 (2019), pp. 454-460.
- [12] Nanni, A., Bradford, N.M.: FRP jacketed concrete under uniaxial compression, *Construction and Building Materials*, 9 (1995) 2, pp. 115-124.
- [13] Karbhari, V.M., Gao, Y.: Composite jacketed concrete under uniaxial compression-Verification of simple design equations, *Journal of materials in civil engineering*, 9 (1997) 4, pp. 185-193.
- [14] Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M.: Model of concrete confined by fiber composites, *Journal of structural engineering*, 124 (1998) 9, pp. 1025-1031.
- [15] Toutanji, H.: Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets, *Materials Journal*, 96 (1999) 3, pp. 397-404.
- [16] Saafi, M., Toutanji, H., Li, Z.: Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes, *Materials Journal*, 96 (1999) 4, pp. 500-509.
- [17] Fam, A.Z., Rizkalla, S.H.: Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes, *Structural Journal*, 98 (2001) 4, pp. 451-461.
- [18] Becque, J., Patnaik, A.K., Rizkalla, S.H.: Analytical models for concrete confined with FRP tubes, *Journal of Composites for Construction*, 7 (2003) 1, pp. 31-38.
- [19] Au, C., Buyukozturk, O.: Effect of fiber orientation and ply mix on fiber reinforced polymer-confined concrete, *Journal of Composites for Construction*, 9 (2005) 5, pp. 397-407.
- [20] Demers, M., Neale, K.W.: Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets, *Developments in short and medium span bridge engineering*, (1994), pp. 895-905.
- [21] Lin, H.J., Liao, C.I.: Compressive strength of reinforced concrete column confined by composite material, *Composite Structures*, 65 (2004) 2, pp. 239-250.
- [22] Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Kumbasar, N.: External Confinement of Low-Strength Brittle Reinforced Concrete Short Columns, *Special Publication*, 238 (2006), pp. 363-80.
- [23] Rochette, P., Labossiere, P.: Axial testing of rectangular column models confined with composites, *Journal of composites for construction*, 4 (2000) 3, pp. 129-136.
- [24] Wang, Y.C., Restrepo, J.I.: Investigation of concentrically loaded reinforced concrete columns confined with glass fiber-reinforced polymer jackets, *Structural Journal*, 98 (2001) 3, pp. 377-385.
- [25] Shehata, I. A., Carneiro, L.A., Shehata, L.C.: Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets, *Materials and structures*, 35 (2002) 1, pp. 50-58.
- [26] Ilki, A., Koc, V., Peker, O., Karamuk, E., Kumbasar, N., editors. Strengthening of RC columns with inadequate transverse reinforcement, *Proc, Second Int Conf on FRP Composites in Civil Engineering*, Adelaide, Australia, 2004.
- [27] Rocca, S., Galati, N., Nanni, A., editors: Large-size reinforced concrete columns strengthened with carbon FRP: Experimental evaluation, *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006)*, 2006.
- [28] Campione, G.: Influence of FRP wrapping techniques on the compressive behavior of concrete prisms, *Cement and concrete composites*, 28 (2006) 5, pp. 497-505.
- [29] Matamoros, A., Matchulat, L., Woods, C., editors: Axial load failure of shear critical columns subjected to high levels of axial load, *Proc 14th World Conf Earthq Eng, Citeseer*, 2008, Citeseer.
- [30] Wang, D., Huang, L., Yu, T., Wang, Z.: Seismic performance of CFRP-retrofitted large-scale square RC columns with high axial compression ratios, *Journal of Composites for Construction*, 21 (2017) 5, pp. 04017031.
- [31] Cui, C., Sheikh, S.: Experimental study of normal-and high-strength concrete confined with fiber-reinforced polymers, *Journal of Composites for Construction*, 14 (2010) 5, pp. 553-561.
- [32] Ozbakkaloglu, T., Akin, E., editors: Behavior of FRP-confined normal-and high-strength concrete under cyclic axial compression 2012: American Society of Civil Engineers.
- [33] Demir, U., Ispir, M., Sahinkaya, Y., Arslan, G., Ilki, A.: Axial behavior of noncircular high-performance fiber-reinforced cementitious composite members externally jacketed by CFRP sheets, *Journal of Composites for Construction*, 23 (2019) 4, pp. 04019022.
- [34] Ilki, A., Demir, C., Bedirhanoglu, I., Kumbasar, N.: Seismic retrofit of brittle and low strength RC columns using fiber reinforced polymer and cementitious composites, *Advances in Structural Engineering*, 12 (2009) 3, pp. 325-347.
- [35] Ozcan, O., Binici, B., Ozcebe, G.: Seismic strengthening of rectangular reinforced concrete columns using fiber reinforced polymers, *Engineering Structures*, 32 (2010) 4, pp. 964-973.
- [36] Farrokh Ghatte, H., Comert, M., Demir, C., Akbaba, M., Ilki, A.: Seismic retrofit of full-scale substandard extended rectangular RC columns through CFRP jacketing: test results and design recommendations, *Journal of Composites for Construction*, 23 (2019) 1, pp. 04018071.
- [37] Kar, S., Biswal, K.: Shear strengthening of reinforced concrete T-beams by using fiber-reinforced polymer composites: a data analysis, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45 (2020) 5, pp. 4203-4234.
- [38] Demir, C., Darilmaz, K., Ilki, A.: Cyclic stress-strain relationships of FRP confined concrete members, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40 (2015) 2, pp. 363-379.
- [39] Hollaway, L.: The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure, *Construction and Building Materials*, 17 (2003) 6-7, pp. 365-378.
- [40] Mirmiran, A., Bank, L.C., Neale, K.W., Mottram, J.T., Ueda, T., Davalos, J.F.: World survey of civil engineering programs on fiber reinforced polymer composites for construction, *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 129 (2003) 3, pp. 155-160.
- [41] Nechevska-Cvetanovska, G., Roshi, A., Bojadjiev, J., Bojadjiev, J., Trajcevski, Z.: Quasi-static tests on RC building columns strengthened with CFRP, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 8, pp. 805-818, <https://doi.org/10.14256/JCE.3087.2020>
- [42] Demir, A., Ince, Y., Altioek, T.Y.: Experimental and numerical investigation of RC beams strengthened with CFRP composites, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 6, pp. 605-616, <https://doi.org/10.14256/JCE.3051.2020>
- [43] Nechevska-Cvetanovska, G., Roshi, A., Bojadjiev, J., Bojadjiev, J., Trajcevski, Z.: Performance of CFRP-confined concrete cylinder specimens - laboratory study, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 2, pp. 95-104, <https://doi.org/10.14256/JCE.3020.2020>
- [44] Turkish Seismic Code 2018, Republic of Turkey Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, 2018
- [45] Sta4CAD (14.1), STA Computer Engineering Consultancy Co. Ltd.
- [46] TS-498 Turkish Standard, Calculation values of the loads to be taken in the dimensioning of the building elements, Ankara 2021
- [47] TS-EN 12504-2 Turkish Standard, Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number, Ankara 2021
- [48] Microsoft® Visual Studio v2019, <https://visualstudio.microsoft.com/>