

Primljen / Received: 28.7.2024.

Ispravljen / Corrected: 15.5.2025.

Prihvaćen / Accepted: 20.5.2025.

Dostupno online / Available online: 10.10.2025.

Detaljna analiza šteta nastalih u pokrajini Hatay uslijed potresa u Pazarcıku i Elbistanu u veljači 2023.

Autori:

**Orhan Kahraman**, dipl.ing.građ.Tehničko sveučilište İskenderun, Turska
Fakultet inženjerstva i prirodnih znanosti
Odjel za građevinarstvo
kahramanorhan@gmail.com

Autor za korespondenciju

Doc.dr.sc. **Selçuk Kaçın**, dipl.ing.građ.Tehničko sveučilište İskenderun, Turska
Fakultet inženjerstva i prirodnih znanosti
Odjel za građevinarstvo
selcuk.kacin@iste.edu.tr

Stručni rad

Orhan Kahraman, Selçuk Kaçın

Detaljna analiza šteta nastalih u pokrajini Hatay uslijed potresa u Pazarcıku i Elbistanu u veljači 2023.

Dana 6. veljače 2023. dva snažna potresa magnitude 7,7 i 7,6 Mw pogodila su Pazarcık i Elbistan u pokrajini Kahramanmaraşu u Turskoj. Ti su potresi pogodili 11 pokrajina, a osjetili su se u susjednim zemljama Siriji, Iraku, Egiptu i Iranu. Iako su epicentri potresa bili otprilike 200 km odnosno 300 km udaljeni od pokrajine Hataya, upravo je ona bila među najviše pogođenima, s velikim brojem teško oštećenih ili potpuno srušenih građevina. U ovome istraživanju prikazana su terenska opažanja o štetama uzrokovanim potresom u Hatayu te analize ponašanja armiranobetonskih zgrada uslijed potresa, uključujući uzroke i posljedice. Rezultati pokazuju da su glavni uzroci oštećenja bile velike brzine i ubrzanja tijekom potresa, koja su premašila projektirane vrijednosti definirane Turskim pravilnikom o potresima za zgrade iz 2018., te problemi povezani s pojačanim gibanjem tla, likvefakcijom i projektiranjem zgrada. Dodatni čimbenici koji su pridonijeli štetama odnose se na urbanističke planove, nelegalnu gradnju, lošu izgradnju i uporabu neadekvatnih materijala. Na temelju tih spoznaja u istraživanju predložen je niz preporuka za projektiranje i izgradnju zgrada otpornih na potrese.

Ključne riječi:

potresna sekvenca, terenska opažanja, ponašanje armiranobetonskih zgrada, likvefakcija, konstrukcijske nepravilnosti

Professional paper

Orhan Kahraman, Selçuk Kaçın

Comprehensive analysis of the damages in Hatay due to the February 2023 Pazarcık and Elbistan earthquakes

On 6 February 2023, two major earthquakes with magnitudes of 7.7 and 7.6 Mw struck the Pazarcık and Elbistan districts of Kahramanmaraş in Turkey. These earthquakes affected 11 provinces and were felt in neighbouring countries including Syria, Iraq, Egypt, and Iran. Although the epicentres were approximately 200 km and 300 km away from Hatay, respectively, Hatay province was among the most affected provinces, where many buildings were severely damaged or collapsed. In this study, we present field observations of earthquake-induced damage in Hatay by investigating the behaviour of reinforced concrete buildings under earthquake conditions, including the causes and consequences. The results indicate that the main causes of damage were the high velocity and acceleration of earthquakes, which exceeded design expectations of the Turkish Building Earthquake Code-2018 as well as issues associated with ground amplification, liquefaction, and building design. Additional contributing factors included zoning plans, illegal construction, poor workmanship, and the use of inadequate materials. Based on these insights, the study proposes several recommendations for earthquake-resistant building designs and construction practices.

Key words:

earthquake sequence, field observations, the behaviour of reinforced concrete buildings, liquefaction, structural irregularities

1. Uvod

Dana 6. veljače 2023. Tursku su pogodila dva razorna potresa: prvi u 4.17 sati, magnitude 7,7 Mw, s epicentrom u okrugu Pazarcıku, u pokrajini Kahramanmaraşu, te drugi u 13.24 sati, magnitude 7,6 Mw, s epicentrom u okrugu Elbistanu iste pokrajine [1]. Ti razorni potresi prouzrokovali su teška oštećenja građevina u gradovima Kahramanmaraşu, Hatay, Malatya, Gaziantepu, Diyarbakiru, Şanlıurfi, Adıyamanu, Osmaniyeu, Kilisu, Adani, Elazığu, Bingölu, Kayseriu, Mardinu, Tunceliu, Niğdeu i Batmanu. Procjenjuje se da je smrtno stradalo oko 52.000 ljudi, dok je više od 115.000 osoba ozlijeđeno. Tisuće naknadnih potresa dodatno su pogoršale oštećenja na armiranobetonskim konstrukcijama. U ovom je istraživanju detaljno analizirana šteta u pokrajini Hatay, jednoj od najteže pogođenih pokrajina, uz potporu opsežnih terenskih opažanja.

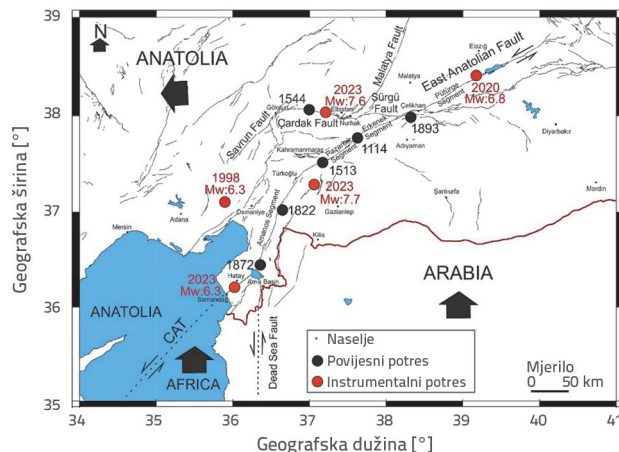
2. Seizmička aktivnost regije

U zoni istočnoanadolskog rasjeda (engl. *Eastern Anatolian Fault Zone – EAFZ*), koja se proteže od Karlova u Bingölu na sjeveru do Sredozemnog mora na jugu, tijekom povijesti zabilježeni su brojni razorni potresi. Najveći potresi duž rasjeda EAFZ bili su Hatay – Antakya (7,5 Mw) 1822., Karlova (7,2 Mw) 1866., Hatay – Antakya (7,2 Mw) 1872. [2], Sivrice (6,7 Mw) 1875., Çelikhan (7,1 Mw) 1893., Malatya (6,8 Mw) 1905. [2, 3], Erzincan (7,8 Mw) 1939. [4, 5], Adana (6,0 Mw) 1945., Malatya (6,0 Mw) 1964., Bingöl (6,7 Mw) 1971., Bingöl (6,1 Mw) 2003., Elazığ (6,1 Mw), Elazığ (6,8 i 7,1 Mw) 2010. [2, 3], Van (7,1 Mw) 2011. [6, 7] te Sivrice (6,8 Mw) 2020. [8]. Segmenti rasjeda EAFZ koji su se aktivirali tijekom potresa 6. veljače 2023. označeni su pravokutnicima na slici 1. Pravokutnici na slici 1. označavaju segmente rasjeda (1. segment Pazarcık – Erkenek; 2. segment Amanos; 3. segment Cardak; 4. transformni rasjed Cipar – Antakya (CAT) i trostruko sjecište Antakya (ATJ)) na kojima su se u veljači 2023. dogodili potresi [2].



Slika 1. Karta koja prikazuje istočnoanadolski sustav rasjeda (EAFZ) u odnosu na euroazijsku, anatolijsku, afričku i arapsku tektonsku ploču

Na slici 2. prikazani su primjeri razarajućih posljedica potresa. Pokrajina Hatay smještena je između lijevog rasjeda Mrtvog mora, planine Amanos (južni dio EAFZ-a) i transformnog rasjeda Cipar – Antakya [2], a na slici 1. označena je pravokutnicima 2. i 4.



Slika 2. Kartografski prikaz razarajućih potresa koji su se dogodili u analiziranome području, a obuhvaća potrese tijekom povijesti i potrese evidentirane instrumentalnim seizmološkim mjerenjima [2]

3. Potres koji se dogodio 6. veljače: karakterizacija, površinske pukotine i analiza potresnih zapisa

Analiza fokalnih mehanizama pokazala je da su se potresi dogodili na rasjedima s lijevolateralnim horizontalnim pomakom u skladu s karakteristikama istočnoanadolskoga rasjednog pojasa (EAFZ). Neki su se fokalni mehanizmi manifestirali i kao normalni rasjedi i kao reverzni rasjedi, što je rezultat promjena geometrije lokalnih rasjeda duž linije loma [1, 4]. Površinske pukotine zabilježene su na područjima Pazarcıka, Amanosa, Erkeneka, Türkoğlusa i Narlıa unutar EAFZ-a tijekom potresa magnitude 7,7 Mw koji je 6. veljače 2023. pogodio Pazarcık. Rasjed Amanos (slika 1., pravokutnik 2.) proteže se prema pokrajini Hatay, a zasebne pukotine na rasjedu uočene su kroz Türkoğlu u smjeru Hasse i Kırkhana [2]. Prema izvještajima, taj rasjed, koji se pruža od juga Türkoğlusa do Antakye, naglo se pomaknuo uslijed prvog potresa u Pazarcıku. Duž površinske pukotine rasjeda Narlı, koji prolazi dijelovima pokrajine Hatay, zabilježena su lijevolateralna pomicanja u rasponu od 10 do 700 cm. Lijevolateralni lomovi na površini dogodili su se 19 km od segmenta Serinyol te duž 122,5 km dugačkog segmenta Amanos. Rasjed Çardak, koji se proteže od Nurhaka na istok prema Göksunu, te rasjed Doğanşehir u okrugu Doğanşehiru (Malatya), imali su pukotine u području između okruga Göksuna u Kahramanmaraşu i okruga Doğanşehiru u Malatyi (označeno pravokutnikom 1. na slici 1.) tijekom drugog potresa magnitude 7,6 Mw [2]. Lijevolateralna pomicanja u tom su području iznosila od 25 do 880 cm [9].

Površinski rasjedi i tragovi translacijskih pomaka zabilježeni su u pokrajini Hatay nakon potresa u veljači 2023. Ti su rasjedi

uzrokovali visinske razlike u rasponu od jednog do tri metra. Na slici 3. prikazane su površinske pukotine i deformacija terena [10].



Slika 3. Površinski rasjedi na poljoprivrednim i šumskim površinama nakon potresa u pokrajini Hatay [10]

Velike pukotine pojavile su se na poljoprivrednim površinama u selu Tepehanu, u okrugu Altınözü (pokrajina Hatay), kao posljedica seizmičke aktivnosti (slika 4.). Rasjedi s lijevolateralnim pomakom rascijepili su tlo, a zabilježeni pomaci iznose do 300 cm. Osim toga u masliniku površine 35 dekara (3,5 hektara) u Altınözüu formirale su se urušne vrtače približno 30 metara dubine i 200 metara širine, a koje su prikazane na slici 5. [11,12].

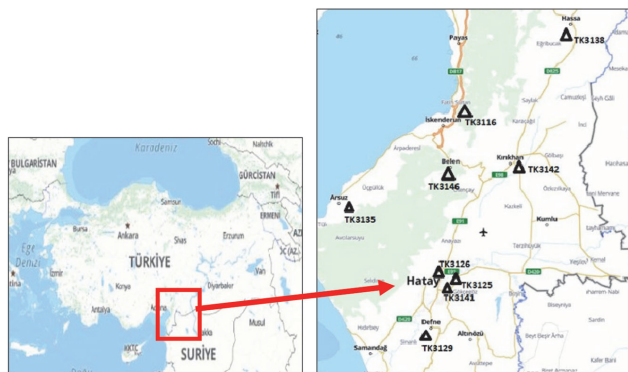


Slika 4. Veliki površinski rasjedi na poljoprivrednome zemljištu nakon potresa u Altınözüu [11,12]



Slika 5. Urušne vrtače u maslinicima nakon potresa u pokrajini Hatay – Altınözü [7]

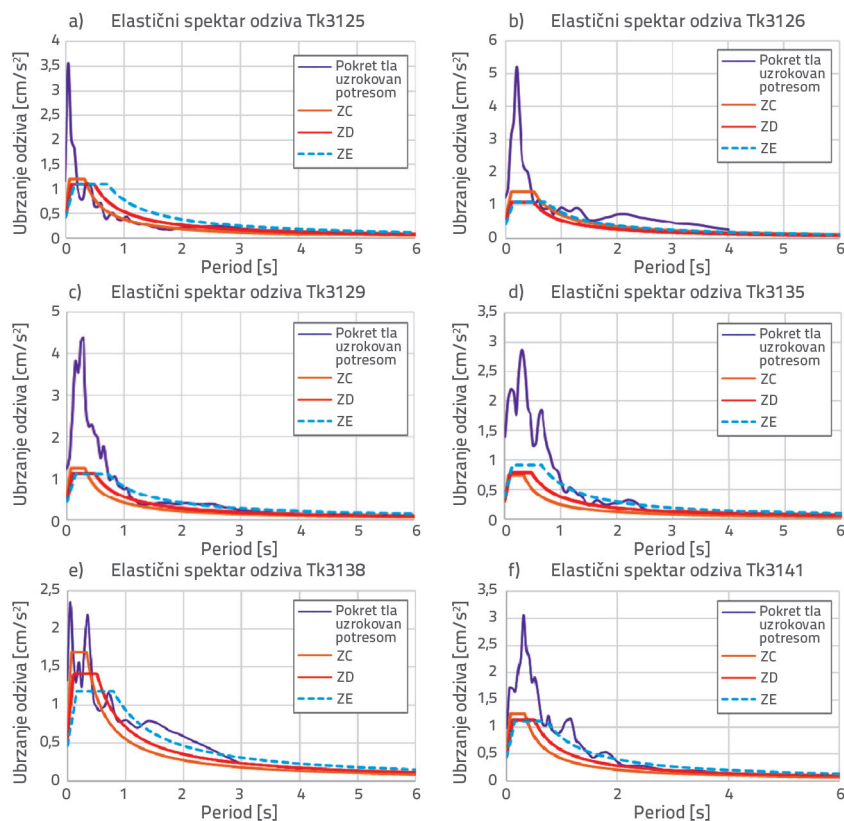
Iako se Pazarcık i Elbistan nalaze približno 200 km odnosno 300 km od pokrajine Hatay, najveće gibanje tla zabilježeno je upravo u pokrajini Hatay. U tablici 1. prikazane su udaljenosti epicentara potresa do seizmoloških postaja u Hatay (slika 6.), maksimalne vrijednosti ubrzanja tla zabilježene u svakome smjeru na tim postajama te brzine širenja posmičnih valova (engl. *shear wave velocity*) [13–16]. Spektralne krivulje 5 % prigušenih elastičnih spektara odziva na odabranim postajama uspoređene su s projektnim spektrima, koji su definirani u Turskome pravilniku o seizmičkom projektiranju zgrada iz 2018. [17,18].



Slika 6. Neke akcelerografske postaje u pokrajini Hatay tijekom potresa u Kahramanmarašu 6. veljače

Prema Turskome pravilniku o seizmičkom projektiranju zgrada iz 2018. (TBEC-2018), lokalne klasifikacije tla koje se primjenjuju za definiranje projektnih spektara potresa određuju se na temelju svojstava tla i razvrstavaju u šest kategorija: ZA označava kompaktna, tvrda stijenska tla, ZB umjereno čvrste, slabo trošene stijene, ZC vrlo zbijene slojeve pijeska, šljunka i krute gline ili vrlo ispucale slabe stijene, ZD umjereno zbijene slojeve pijeska, šljunka ili vrlo krute gline, ZE rahle slojeve pijeska, šljunka ili meke do krute glinovite slojeve, a ZF tla s rizikom urušavanja i potencijalnog slijeganja uslijed potresa, gline ukupne debljine veće od 3 m, visokoplastične gline debljine veće od 8 m te vrlo debele (>35 m), meke ili srednje krute glinovite naslage [17]. U ovome su istraživanju za reprezentativne tipove tla analiziranog područja odabrane lokalne vrste tla koje se klasificiraju kao ZC, ZD i ZE (slika 7.). TBEC-2018 definira seizmičku razinu gibanja tla 2 (DD-2) kao gibanje tla s vjerojatnošću prekoračenja od 10 % u 50 godina, što odgovara povratnome periodu od 475 godina. Ta se razina primjenjuje u projektiranju građevina koje nisu od posebnog značaja. Na temelju podataka prikazanih na slici 7. provedene su ocjene u skladu s razinom DD-2.

Prema podacima prikupljenima na seizmološkim postajama broj 3125, 3126, 3129, 3135, 3138 i 3141 na području Hataya, koje su uspostavljene u sklopu Turskog sustava za analizu akcelerometrijske baze podataka (TADAS) [19] i Uprave za katastrofe i izvanredne situacije Republike Turske (AFAD) radi bilježenja potresa, tijekom potresa u Pazarcıku (magnituda 7,7 Mw) zabilježene su horizontalne i vertikalne vrijednosti spektralnog ubrzanja veće od projektiranih vrijednosti propisanih pravilnikom TBEC-2018, i to u



Slika 7. Usporedba elastičnih spektara ubrzanja za postaje Tk3125, Tk3126, Tk3129, Tk3135, Tk3138 i Tk3141 u pokrajini Hatay s projektiranim spektrima ubrzanja prema TBEC-2018

vremenskome intervalu od 0 do 1 sekunde. Sve tri komponente gibanja tla (istok-zapad, sjever-jug i vertikalno gibanje) pokazale su visoke vrijednosti spektralnog ubrzanja, što je znatno pridonijelo visokome stupnju oštećenja u tome području. Spektar razine DD-2

upućuju na srednje do visoke potresne opasnosti koje znatno povećavaju intenzitet razaranja tijekom potresa [25]. Uzastopna pojava dvaju razarajućih potresa vrlo je rijetka u stručnoj literaturi i dodatno povećava razinu oštećenja građevina.

Tablica 1. Udaljenost epicentra potresa u Pazarcıku (Mw 7,7) od postaja u pokrajini Hatay, izmjerene vrijednosti ubrzanja te brzine širenja posmičnih valova [19]

Oznaka	Zemljopisna dužina	Zemljopisna širina	Pokrajina	Okrug	Maksimalno ubrzanje tla u smjeru sjever-jug PGA_NS [cm/s ²]	Maksimalno ubrzanje tla u smjeru istok-zapad PGA_EW [cm/s ²]	Maksimalno ubrzanje tla u vertikalnom smjeru PGA_UD [cm/s ²]	Vs ₍₃₀₎ [m/s]	Udaljenost od epicentra potresa [km]
3138	36,511	36,803	Hatay	Hassa	888,73	746,66	1296,27	618,0	71,70
3116	36,207	36,616	Hatay	İskenderun	164,28	168,86	165,84	870,0	105,38
3142	36,366	36,498	Hatay	Kırıkhan	651,69	739,29	456,90	539,0	106,49
3146	36,227	36,491	Hatay	Belen	483,85	346,93	341,39	430,0	114,57
3141	36,220	36,373	Hatay	Antakya	961,12	868,82	722,66	338,0	125,42
3135	35,883	36,409	Hatay	Arsuz	740,97	1372,07	588,97	460,0	142,15
3126	36,138	36,222	Hatay	Antakya	1178,12	999,38	921,57	350,0	143,54
3129	36,134	36,191	Hatay	Defne	1351,50	1198,74	716,94	447,0	146,39
3125	36,133	36,238	Hatay	Antakya	822,62	1121,95	1151,56	448,0	142,15



Slika 8. Uslijed potresa u İskenderunu (pokrajina Hatay) uočeni su likvefakcija i izbijanje pijeska



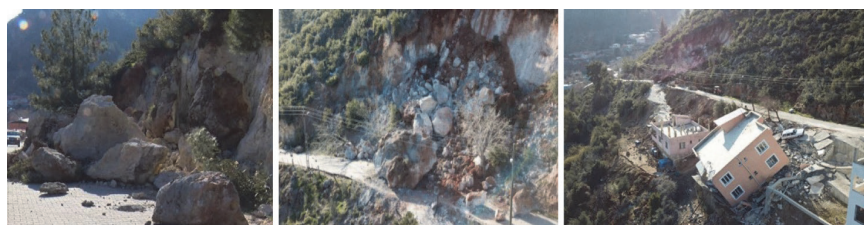
Slika 9. Pukotine na autocesti u pokrajini Hatay



Slika 10. Oštećenja uslijed slijeganja tla zabilježena u priobalnome pojasu pokrajine Hatay



Slika 11. U İskenderunu su nakon potresa zabilježeni slijeganje tla od približno 60 cm te lokalizirana slijeganja



Slika 12. U Kırıkhanu potresi su aktivirali klizišta i uzrokovali odrone stijena [34]

4. Istraživanje oštećenja uslijed potresa iz perspektive geotehničkog inženjerstva

Snažni potresi rezultirali su nizom izazova u području geotehničkog inženjerstva u pokrajini Hatay kao što su likvefakcije, lateralno pomicanje tla, izbijanje pijeska (tzv. *sand boils*), slijeganja, urušavanja i podizanja tla te diferencijalna slijeganja [26–30]. U potresom pogođenome području primijećene su pukotine i šupljine u kojima se pojavilo izbijanje pijeska. Dokazi o likvefakciji i izbijanju pijeska dokumentirani su u blizini džamije Atakaş nakon potresa u veljači 2023., osobito u obalnome području İskenderuna (slika 8.). Na slici 9. prikazane su pukotine i široki rasjedi na prometnicama.

U građevinama koje su izgrađene u priobalnome pojasu uslijed likvefakcije smanjuje se nosivost tla, što rezultira slijeganjem objekata (slika 10.).

Iako su nakon potresa u priobalnim dijelovima İskenderuna, u dužini od približno 6 kilometara zabilježena slijeganja konstrukcija i do 80 cm, nije došlo do potpunog urušavanja građevina [31, 32]. Slučajevi u kojima likvefakcija tla ne prenosi visoke vrijednosti ubrzanja (1,2 do 1,3 g) na konstrukcije rijetki su i zahtijevaju dodatna istraživanja. Mnoge građevine u tome priobalnom pojasu stare su, izgrađene na vrlo mekome ili nepovoljnome tlu i nemaju duboke temelje poput temelja na pilotima s pločom. Iako se to u početku može činiti kontrainuitivnim, visoka prosječna brzina širenja posmičnih valova ($V_s(30)$) smanjila se u rastresitome pijesku uslijed potresa i time doprinijela očuvanju stabilnosti građevina. Temelji zgrada u priobalnome području, izgrađeni na tlu na kojemu se pojavila likvefakcija uslijed seizmičkog djelovanja, oštećeni su zbog slijeganja koje je iznosilo od 50 do 60 centimetara (slika 11.).

Dinamička gibanja izazvana potresima mogu pokrenuti slabije slojeve tla i velike mase uz djelovanje gravitacije [33]. Potres iz veljače 2023. potaknuo

Tablica 2. Konstrukcijska oštećenja po pokrajinama nastala uslijed potresa 6. veljače 2023. u Pazarcıku i Elbistanu [35]

Pokrajina	Ukupan broj stambenih građevina koje su predviđene za hitno rušenje ili su teško oštećene	Broj građevina s umjerenim oštećenjima	Broj građevina s manjim oštećenjima
Adana	2952	11768	71072
Adıyaman	56256	18715	72729
Diyarbakır	8602	11209	113223
Elazığ	10156	1522	31151
Gaziantep	291555	20251	236497
Kahramanmaraş	99326	17887	161137
Malatya	71519	12801	107765
Hatay	215255	25957	189317
Kilis	2514	1303	27969
Osmaniye	16111	4122	69466
Şanlıurfa	6163	6041	199401
Ukupno u pokrajini	518009	131577	1279727

je klizišta i odrone tla koji su doveli do urušavanja litica. Stijene koje su se odlomile s planinskog područja pale su na kuće, pri čemu je u selu Bektaşlıju, u okrugu Kırıkhanu, u pokrajini Hatay smrtno stradalo 49 osoba (slika 12.).

5. Istraživanja konstrukcijskih oštećenja

Prema podacima koje je objavila Uprava za strategiju i proračun Republike Turske [35], potresi su oštetili ukupno 5.649.317 kuća u 11 pokrajina. Od tog broja 518.009 građevina klasificirano je kao "teško oštećene, srušene ili predviđene za hitno rušenje". U pokrajini Hatay, jednoj od najjače pogođenih pokrajina, 215.255 kuća označeno je kao "teško oštećene, srušene ili za hitno rušenje". Od svih potresom oštećenih zgrada njih približno 24 posto nalazi se u pokrajini Hatay (tablica 2.). Oštećenja i uništenja građevina ne mogu se pripisati isključivo jednome čimbeniku. Postoji niz čimbenika koji doprinose oštećivanju armiranobetonskih konstrukcija [36, 37], na primjer, više od 50 posto građevinskog fonda čine armiranobetonske konstrukcije koje su dosegle kraj svojega projektiranog uporabnog vijeka, upotreba krupnog šljunka bez odgovarajuće gradacije, korištenje glatkih armatura, niska kvaliteta betona, meki katovi, učinci kratkih stupova, slabi stupovi u odnosu na jake grede, udarni utjecaji između susjednih zgrada, neispravne ili nepotpune izvedbe u spoju stup – greda, kratke grede, segregacija i korozija [38-40].

5.1. Urušavanje konstrukcija uzrokovano efektom udaranja susjednih objekata (engl. *hammering*)

Zbog nedostatka odgovarajućih dilatacijskih spojeva ili međuprostora između susjednih građevina konstrukcije s



Slika 13. Građevine čiji su nosivi elementi oštećeni uslijed utjecaja susjednih građevina

različitim dinamičkim ponašanjem tijekom potresa mogu doći u međusobni kontakt i uzrokovati oštećenja. Taj fenomen poznat je kao efekt udaranja (engl. *hammering*). S obzirom na prostorno planiranje u pokrajini Hatay, raširena je praksa neprekinute gradnje, što je rezultiralo velikim brojem oštećenja i urušavanja konstrukcija uslijed udaranja (slika 13.). Razlike u visinskim razinama građevina i raznolike konstrukcijske karakteristike (godina izgradnje, vrsta materijala i kvaliteta) znatno doprinose opsegu nastalih oštećenja.

5.2. Konstrukcijska oštećenja uzrokovana nepravilnostima kratkih stupova

Nepravilnost kratkih stupova odnosi se na situaciju u armiranobetonskim konstrukcijama pri kojoj su slobodni stupovi kraći od proračunske duljine iz različitih razloga, a kao što je to slučaj kada se posmični zid u podrumu ne proteže do visine kata ili kada su trakasti prozori (obično prozori za ventilaciju i osvjetljenje u podrumima) ili galerije postavljeni uz same stupove, što rezultira povećanim posmičnim silama. Horizontalne sile koje djeluju na stupove uzrokuju to da kratki stupovi budu izloženi posmičnim naprezanjima koja prelaze njihovu nosivost,



Slika 14. Oštećenja uzrokovana konstrukcijskim nepravilnostima kratkih stupova u Antakiji, u pokrajini Hatay

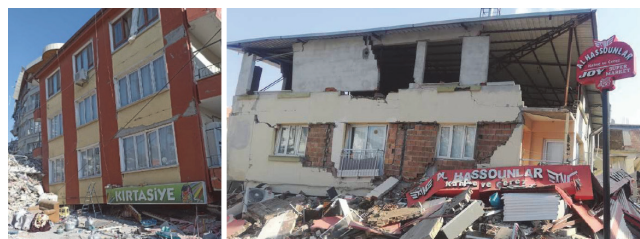
što uslijed potresa dovodi do pucanja i oštećenja. Oštećenja uzrokovana nepravilnostima kratkih stupova zabilježena su na brojnim građevinama u Hatay (slika 14.).

5.3. Urušavanje konstrukcija zbog mekih prizemlja

Nepravilnosti mekih katova odnose se na razlike u krutosti između katova u zgradi. Prema odredbama TBEC-2018, tip B2 klasificira se kao vertikalna nepravilnost. Regulativa navodi to da se za dva međusobno okomita smjera seizmičkog djelovanja, ako je omjer relativnog pomaka (engl. *drift*) na bilo kojemu katu, osim na prizemlju, u odnosu na relativni pomak na katu iznad ili ispod veći od 2, može očekivati pojava mekog kata. Tijekom potresa stupovi u međukatnome prostoru iznad prizemlja bili su izloženi prekomjernim naprezanjima te doživjeli slom, što je rezultiralo velikim oštećenjima na jednoj konstrukciji u İskenderunu (slika 15.).



Slika 15. Konstrukcijska oštećenja prije potresa u İskenderunu, u pokrajini Hatay, i nakon njega



Slika 16. Zgrade s mekim katovima u Antakiji, u pokrajini Hatay, koje su se srušile tijekom potresa

5.4. Konstrukcijski problemi uzrokovani lošom kvalitetom materijala

U brojnim građevinama u Hatay uočeni su nedostaci u kvaliteti građevnog materijala. Među njima su korozija konstrukcijskih elemenata, nepravilna gradacija agregata, upotreba riječnog šljunka kao agregata, nedostaci u procesu proizvodnje i ugradnji betona, nedostatna količina cementa, izostanak održavanja, ručno izlijevanje betona, izostanak ispitivanja svježeg betona, nedostatak vilica i kuka za vilice, upotreba ravne armature, segregacija, loša adhezija, pukotine u armaturi, nedovoljni zaštitni sloj betona te korištenje materijala loše ili niske kvalitete [41].

Istraživanje oštećenja dvokatne zgrade u općini Belenu, u Hatay, pokazalo je da su presjeci stupova bili neadekvatni (20 cm × 20 cm), zaštitni sloj betona nedovoljan, armature korodirane i smanjena promjera, vilice na armaturi izrađene pod kutom od 90°, a razmak između vilica iznosio je 30 cm. Uz to korištene su različite debljine i količine ravne armature bez rebara, a u sastavu betona bili su krupni agregati, što je rezultiralo njegovom slabijom kvalitetom (slika 17.).

Konstrukcijska oštećenja uzrokovana korozijom bila su izražena zbog prisutnosti morske vode u blizini Hataya, osobito u priobalnim područjima (slika 18.).



Slika 17. Konstrukcijska oštećenja u višekatnoj zgradi u pokrajini Hatay nakon potresa



Slika 18. Gubitak prionjivosti armature u betonu i smanjenje promjera armature (smanjenje poprečnog presjeka)

5.5. Oštećenja posmičnih zidova uslijed posmika, dijagonalnih pukotina i savijanja izvan ravnine

Nakon potresa u pokrajini Hatay 6. veljače 2023. detaljno su analizirana oštećenja posmičnih zidova uslijed posmičnog naprezanja i savijanja. U visokoj zgradi u okrugu Iskenderunu posmični su zidovi oštećeni zbog znatnih pomaka i naprezanja poprečnih presjeka uzrokovanih jakim podrhtavanjem tla (slika 19.). Zaštitni sloj betona napuknuo je, a na nekim mjestima u cijelosti je zdrobljen zbog prekoračenja tlačne nosivosti. Vilice su se otvorile, uzdužna armatura pomaknuta je za oko 10 centimetara, a zabilježeni su i lomovi dijela uzdužne i poprečne armature.



Slika 19. Plastična deformacija i oštećenja uslijed savijanja izvan ravnine u posmičnome zidu u Iskenderunu (Hatay)



Slika 20. Dijagonalne pukotine i gubitak presjeka u nosivim zidovima

Dijagonalne pukotine pojavile su se u nosivim elementima uslijed prevelikih naprezanja u presjeku ili nedovoljnih dimenzija presjeka (slika 20.).

5.6. Konstrukcijska oštećenja uzrokovana oblikovanjem sustava "jaka greda – slabi stup"

Prema TBEC-2007 [42], stupovi moraju biti čvršći od greda, a zbroj nosivih momenata stupova koji se spajaju na svakome spoju stup – greda mora biti najmanje 20 % veći od zbroja nosivih momenata greda koje se spajaju na toj istoj površini stupova u konstrukcijskim sustavima sastavljenima od okvira ili kombinacije posmičnih zidova i okvira. U suprotnome, radi se o nepravilnosti poznatoj kao "slabi stup – jaka greda" (slika 21.). Krajevi stupova bili su izloženi opterećenjima koja su premašila njihovu maksimalnu nosivost, što je dovelo do pukotina, pojave mekih katova te, u nekim slučajevima, do potpunog sloma konstrukcije.



Slika 21. Posljedice sustava "slabi stup – jaka greda" uslijed potresa u Antakiji i Iskenderunu

5.7. Konstrukcijska oštećenja uzrokovana nedostacima u gradnji

Loša kvaliteta izvedbe doprinosi oštećenjima prouzročenima potresima. U nekim nosivim elementima srušenih ili teško oštećenih konstrukcija vilice nisu bile pravilno povezane s uzdužnom armaturom. Zbog toga vilice ne mogu osigurati odgovarajuću prijanjajuću vezu s betonom te se zbog dinamičkog pomaka odmah otvaraju (slika 22.).



Slika 22. Loše izvedena poprečna armatura

5.8. Oštećenja armiranobetonskih greda uzrokovana potresom

Oštećenja greda bila su česta tijekom spomenutih potresa i uočena su na kratkim gredama povezanim s posmičnim zidovima ili stupovima.

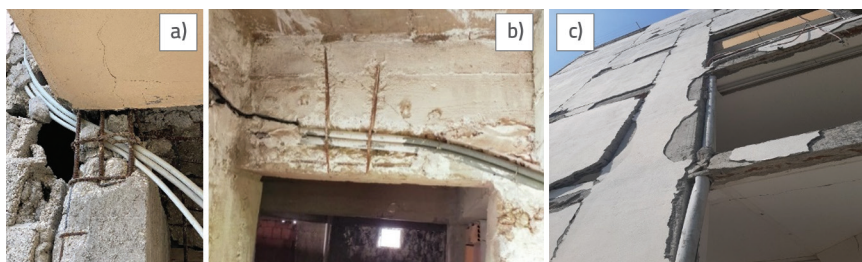
Također je zabilježeno znatno oštećenje kratkih greda povezanih s betonskim zidom dizala te kratkih greda izvedenih na zahtjev arhitekata (slika 23.).



Slika 23. Primjeri pukotina na kratkim gredama spojenih s posmičnim zidovima dizala

5.9. Oštećenja uzrokovana neprikladnim materijalima u betonu

Tijekom pregleda zgrada oštećenih u potresu pronađeni su neprikladni materijali u betonu. Mnogi sustavi poput vodovodnih cijevi i električnih kabela prolaze kroz nosive elemente, smanjujući njihove presjeke, a time i nosivost, što dovodi do većih oštećenja konstrukcije. Kao što je to prikazano na slikama 24.a i b, električni kabeli koji prolaze kroz nosivi element smanjili su čvrstoću tog dijela elementa, a na slici 24.c prikazane su vodovodne cijevi koje prolaze kroz nosivi element koje su smanjile presjek u tome dijelu elementa i uzrokovale pojavu pukotina uslijed potresa.



Slika 24. Materijali koji uzrokuju oštećenja u konstrukcijskim elementima

6. Zaključak

Ova detaljna analiza obuhvatila je potrese i oštećenja koja su nastala u pokrajini Hatay, jedne od najteže pogođenih pokrajina u Turskoj, uslijed prvog potresa magnitude Mw 7,7 s epicentrom u Pazarciku (Kahramanmaraş) u veljači 2023. te drugog potresa magnitude Mw 7,6 s epicentrom u Elbistanu (Kahramanmaraş), koji je uslijedio približno devet sati poslije.

Republika Turska smještena je na tri glavna aktivna rasjedna sustava, istočnoanadolskome (EAFZ), sjevernoanadolskome i zapadnoanadolskome, te na nizu drugih velikih rasjeda, uključujući Karliova, Yumurtalik, ciparski i Ölüdeniz. Istočnoanadolski rasjed tektonski je vrlo aktivna zona u kojoj se očekuje pojava potresa od srednjeg do visokog intenziteta. Prema rezultatima geoloških i tektonskih istraživanja provedenih nakon potresa, aktiviran je segment Amanos, koji je dio DAFZ-a (rasjed s lijevostranolateralnim pomakom), pri čemu su površinske rasjedne pukotine zabilježene sve do okruga Kirikhana i Altınözü. U pokrajini Hatay, koja se geomorfološki

nalazi unutar udoline (bazena), seizmička oštećenja bila su najizraženija u okruzima Antakya (središnji okrug), İskenderunu i Kirikhana.

Iako je epicentar jednog od potresa koji su se dogodili 6. veljače 2023. bio u Kahramanmaraşu, razaranje u pokrajini Hatay, koja se nalazi približno 180 km od epicentra, bilo je posebno izraženo. Budući da je brzina širenja posmičnih valova ($V_s(30)$) bila niska u rastresitome tlu, seizmička energija je u takvim tlima dodatno pojačana, što je rezultiralo intenzivnijim djelovanjem na konstrukcije. Nadalje, uslijed potresnog djelovanja došlo je do likvefakcije tla, pri čemu tlo više nije moglo nositi građevine. Najveća oštećenja zabilježena su na konstrukcijama izgrađenima na ravničarskim područjima, mekim tlima i poljoprivrednim zemljištima u okruzima Antakya i Kirikhana. Geotehnička istraživanja upozorila su na to da su klizišta i izbijanje pijeska (tzv. *sand boils*) posljedica likvefakcije tla izazvane potresom, pri čemu dolazi do pojave pukotina, izdizanja tla i bočnih pomaka na površini. Osim toga na građevinama se pojavljuju slijeganja i problemi povezani s diferencijalnim slijeganjima kao rezultat gubitka nosivosti tla uslijed likvefakcije.

Kao što navode brojni istraživači, oštećenja građevina nakon potresa od 6. veljače bila su uzrokovana konstrukcijskim nepravilnostima, niskom kvalitetom građevnih materijala, lošom gradnjom, postupanjima suprotnima važećim seizmičkim

propisima te nedostatkom odgovarajuće zakonske regulative [33, 35, 36]. Nakon potresa u regiji Marmari 1999. u Turskoj su u seizmičke propise uvedena brojna ograničenja i nove odredbe.

Većina građevina u pokrajini Hatay izgrađena je u skladu s Pravilnikom o građenju u područjima ugroženim od elementarnih nepogoda iz 1975. (TEC 1975) [43]. Za razliku od Pravilnika o projektiranju zgrada na potresnim

područjima iz 1998. (TBEC 1998) [44], primjena kuka za vilice za armaturu pod kutom od 90° umjesto 135° imala je glavnu ulogu u urušavanju ili oštećivanju konstrukcija tijekom potresa u veljači 2023. [45].

Tijekom terenskih istraživanja utvrđeno je da su na zgradama u pokrajini Hatay izvedeni kratki stupovi [46], a izgradnja mekih katova u prizemlju u komercijalne svrhe (trgovine) ili primjena naglih ili promjenjivih visinskih razlika između katova za različite namjene poput pomoćnih katova, bazena i teretana uzrokovali su nagle promjene krutosti, pomake i dinamički odgovor konstrukcija. Prema TBEC-2007, ključno načelo u projektiranju potresno otpornih zgrada jest osigurati da stupovi budu jači od greda (TBEC 2007) [42]. Sustav "slabi stup – jaka greda", kao vertikalna nepravilnost, dovodi do pojave pukotina, urušavanja višekatnih konstrukcija i potpunog sloma konstrukcije.

Posmične sile koje prelaze granice nosivosti, nedovoljan zaštitni sloj betona te neadekvatna primjena razmaka armature i vilica u spojevima stup – greda, posmična greda ili stup – temelj bili su među uzrocima oštećenja na presjecima stupova ili greda koji

nisu izvedeni u skladu s projektom ili propisima. Nosivi elementi nisu mogli izdržati snažno potresno djelovanje. Stupovi su bili izloženi vlačnim naprezanjima, armatura je popucala, a strukturna cjelovitost betona narušena je uslijed obrnute akceleracije tijekom potresa.

Nadalje, u zgradama koje nemaju posmične zidove [47] ili ih nema dovoljno i izgrađeni su u samo jednome smjeru oštećenja su nastala uslijed posmičnih naprezanja i savijanja. Posmični zidovi imaju ključnu ulogu u sprječavanju potpunog sloma konstrukcije jer preuzimaju znatan dio osnovnih posmičnih sila.

Velika oštećenja nastala su na gredama, osobito na kratkim gredama povezanim s posmičnim zidom dizala te onima izvedenima na zahtjev arhitekta. Uslijed potresa konstrukcijski elementi s malim slobodnim dužinama izloženi su posmičnim silama koje prelaze njihove kapacitete. To je prouzročilo velika naprezanja u presjecima i oštećenja, osobito kratkih greda, uslijed statičkih i dinamičkih utjecaja. Istraživanja su također pokazala da tijekom gradnje električni kabeli i vodovodne cijevi prolaze kroz konstrukcijske elemente [48]. Takve nepravilne izvedbe smanjuju razinu nosivosti konstrukcijskih elemenata i doprinose većim oštećenja uslijed potresa.

LITERATURA

- [1] AFAD: 06 February 2023 - Kahramanmaraş Pazarcık (Mw=7.7) and Kahramanmaraş Elbistan (Mw=7.6), Report on the investigation of earthquakes, Hacettepe University, 2023., p.140
- [2] Over, S., Demirci, A., Ozden, S.: Tectonic implications of the February 2023 earthquakes (Mw 7.7, 7.6 and 6.3) in south-eastern Türkiye, *Tectonophysics*, 866 (2023), p. 230058, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230058>.
- [3] Demirtas, R.: Earthquake activity of the Eastern Anatolian fault system-future earthquake potential, 2019., doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24235.49449>.
- [4] Haçin, I.: 1939 Erzincan Great Earthquake, *Journal of Atatürk Research Center*, 30 (2014) 88, pp. 37-70
- [5] Başgöze, A., Güncü, A.: Determining the regional disaster risk analysis of buildings in Erzincan, *GRADEVINAR*, 75 (2023) 3, pp. 257-272, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3436.2021>
- [6] Dindar, A.A., Seçkin, E., Önen, Y.H., Cosgun, C.: Analysis of building damage caused by earthquakes in Eastern Turkey, 2013.
- [7] Seçkin, E.D.İ.P.: Analysis of building damage caused by earthquakes in Eastern Turkey, *GRADEVINAR*, 65 (2013) 8.
- [8] Mertol, H.C., Tunc, G., Akis, T.: Evaluation of masonry buildings and mosques after Sivrice earthquake, *Građevinar*, 73 (2021) 9, pp. 881-892
- [9] Kürçer, A., Elmacı, H., Ozdemir, E., Guven, C., Guler, T., Avcu, I., Ozalp, S.: 6 February 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Earthquake (Mw 7, 7), *Field Observation Reports Series 1-Amanos Segment*, (2023), doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26150.40008>.
- [10] Yenısafak, I.: Hatay Hassa'daki yüzey kırıkları depremlerin etkisini gözler önüne seriyor | Hatay Haberleri: <https://www.yenisafak.com/foto-galeri/gundem/hatay-hassadaki-yuzey-kiriklari-depremlerin-etkisini-gozler-onune-seriyor-4518648/2>, [17.2.2024.]
- [11] Dolek, I., Uzelli, T., Ege, I., Celik, O.: An example of mass movements caused by the Kahramanmaraş earthquakes of february 6: Tepehan landslide, *Turkish Geographical Review*, 83 (2023), pp. 73-86, doi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tcd/issue/77267/1307166> (accessed 6.9.24).
- [12] TRTNews: TRT News Photo Gallery: <https://www.trthaber.com/foto-galeri/hatayda-depremde-olusan-yarik-havadan-goruntulendi/53929/sayfa-3.html>, [22.5.2024.]
- [13] Papazafeiropoulos, G., Plevris, V.: Kahramanmaraş—Gaziantep, Türkiye Mw 7.8 earthquake on 6 February 2023: Strong ground motion and building response estimations, *Buildings*, 13 (2023), p.1194, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13051194>.
- [14] Avsar, O., Bozer, A., Tunaboyu, O., Sulev, E., Demirtas, Y.: Mw 7.7-7.6 February 2023 Seismic performance of post-2000 reinforced concrete buildings and highway bridges in the region during the Kahramanmaraş Earthquakes, *Hatay Field Observations Technical Report*, Eskisehir Technical University, Eskisehir, 2023.
- [15] Vapur, I., Kara, I.F., Akin, E.: Structural effects of 2023 Kahramanmaraş and Hatay earthquakes in Antakya and Samandağ districts and solution suggestions, *Journal of Engineering Sciences*, 12 (2023) 4, pp. 1260-1270, doi: <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1293147>.
- [16] Ozkula, G., Dowell, R.K., Baser, T., Lin, J.L., Numanoglu, O.A., Ilhan, O., Guney, O.C., Huang, C.W., Uludag, T.D.: Field reconnaissance and observations from the February 6, 2023, Turkey earthquake sequence, *Natural Hazards*, 119 (2023) 1, pp. 663-700, doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06143-2>.
- [17] TBEC: Turkish Building Earthquake Code, T.C. Resmi Gazete, Ankara, Türkiye, 2018.
- [18] Hu, J., Liu, M., Taymaz, T., Ding, L., Irmak, T.S.: Characteristics of strong ground motion from the 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6 Kahramanmaraş earthquake sequence, *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2024), pp. 1-30, doi: <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01844-2>.
- [19] Tadas: Turkish Accelerometric Database and Analysis System: Disaster and Emergency Presidency of Türkiye (AFAD): www.tadas.afad.gov.tr, [1.12.2023.]
- [20] Aykac, Z., Akin, M., Çabalar, A.F.: VS (30) based local soil conditions and earthquake damage relationship Van-Abdurrahmangazi example, *Journal of Geological Engineering*, 45 (2021), pp. 181-198, doi: <https://doi.org/10.24232/jmd.1049536>.
- [21] Midorikawa, S.: Prediction of isoseismal map in the Kanto plain due to hypothetical earthquake, *Journal of Structural Engineering*, 33 (1987) 2, pp. 38-43
- [22] Borchardt, R.: Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco Bay region, CA, *Procs. Fourth Int. Conf. Seismic Zonation*, 3 (1991), pp. 545-552.

- [23] Joyner, W.B., Fumal, T.E.: Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion, *Proceedings of the 8th world conference on earthquake engineering*, 2 (1984), pp. 777-783
- [24] Gucek, S., Afacan, K.B., Zorluer, İ.: The facts of soil amplification and liquefaction after the earthquakes of February 6, 2023: Examples of Antakya, Gölbashi, Türkoğlu, *Journal of Science and Engineering*, 23 (2023) 3, pp. 740-752, doi: <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1298648>.
- [25] Guzel, M., Bozdog, S., Ozcep, F.: Soil amplification criterion in microzonation studies (Northern Adana Case), Çukurova University, *Journal Of Faculty Of Engineering and Architecture*, 24 (2009) 1-2, pp. 229-236
- [26] Marmara Research and Application Center for Disaster Resilient Structures: February 6, 2023 Maraş Earthquakes (Pazarcık Mw7.7 and Elbistan Mw7.6) Aftermath of Strong Ground Motion, Geotechnical Observations on Superstructures and Infrastructures Preliminary Investigation Report, Gebze Technical University, 2023.
- [27] Ustun, A.B., Altuntas, G., Demirsors, U., Karayazi, O.: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Ve 20 Şubat 2023 Defne (Hatay) Depremi Sonucu Gelişen Sivilaşma Yapıları Saha Gözlemleri Ve Değerlendirmeler Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/deprem/pdf/sivilasma-yapilari-sahagozlemleri.pdf>, [1.12.2023.]
- [28] Sassila, H.: Investigation of liquefaction effects under earthquake loads, Thesis, T.C. İstanbul Medeniyet Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 2023.
- [29] Caglar, N., et al.: February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes Investigation and Evaluation Report, Bursa Technical University, <https://deprem.btu.edu.tr/tr/sayfa/detay/5482/6-subat-2023-kahramanmaras-depremleri-i%CC%87nceleme-ve-degerlendirme-raporu>, [20.5.2024.]
- [30] Konya Technical University: Pazarcık Mw=7.7 & Elbistan Mw=7.6 Earthquakes Report (Hatay region), <https://www.ktun.edu.tr/Dosyalar/0/files/Rapor.pdf>, [22.5.2024.]
- [31] Taftoglou, M., Valkaniotis, S., Karantanelis, E., Goula, E., Papathanassiou, G.: Preliminary mapping of liquefaction phenomena triggered by the February 6 2023 m7. 7 earthquake, Türkiye/Syria, based on remote sensing data, Zenodo, (2023), doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7668401>
- [32] Karadeniz Technical University: 6 February 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık Mw=7.7 and Mw=7.6) Evaluation report including earthquakes and aftershocks, field observations, structural damages and future recommendations, <https://www.ktu.edu.tr/tr/haber/ktuden-deprem-raporu>, [22.5.2024.]
- [33] King, G.C., Stein, R.S., Lin, J.: Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (1994) 3, pp. 935-953, doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0840030935>
- [34] Demiroren News Agency: Hatay-Kirikhan'da deprem kayaları yuvarladı: Köydeki 49 kişi hayatını kaybetti, <http://www.dha.com.tr/foto-galeri/hatay-kirikhanda-deprem-kayalari-yuvarladi-koydeki-49-kisi-hayatini-kaybetti-2207533>, [6.9.2024.]
- [35] T.C.: Presidential Strategy and Budget Directorate, <https://www.sbb.gov.tr/2023-kahramanmaras-ve-hatay-earthquakes-report/>, [23.5.2024.]
- [36] Akbas, A., Caliskan, O.: Investigation of reinforced concrete structures damaged by earthquake in terms of types of irregularities, *Proceedings of the International Conference On Scientific And Academic Research*, 1 (2023), pp. 428-435
- [37] Coza, H.: The Earthquake Damages In Reinforced Concrete Structures, Doctoral dissertation, Institute of Science, <https://polen.itu.edu.tr:8443/server/api/core/bitstreams/537570d7-e8f1-4240-8bb8-706a55f1ffcb/content>, [6.9.2024.]
- [38] Demir, A., Erkan, C., Hakan, O., Zeki, O., Askin, O., Ertan, B., Sedat, S.: Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023, *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2024), pp. 1-27
- [39] Cetin, K.O., Ilgac, M., Can, G., Cakir, E.: Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcık Mw= 7.7 and Elbistan Mw= 7.6, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes, Middle East Technical University, Earthquake Engineering Research Center, Report No: METU/EERC, 1, 2023.
- [40] Avcil, F., Isik, E., Izol, R., Buyuksarac, A., Arkan, E., Arslan, M.H., Aksoylu, C., Eşisuren, O., Harirchian, E.: Effects of the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquake on structures in Kahramanmaraş city, *Natural Hazards*, 120 (2024), pp. 2953-2991, doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06314-1>
- [41] Isik, E., Avcil, F., Buyuksarac, A.: Structural damages in RC buildings in Antakya after the 06 February 2023 earthquakes. *Proceedings of The first International Trakya Scientific Research Congress*, Edirne, Turkey, 2023.
- [42] Ministry of Public Works and Settlement of Turkey: Turkish Building Earthquake Code (TBEC), Ankara, Turkey, 2007.
- [43] Ministry of Public Works and Settlement of Turkey: Turkish Building Earthquake Code (TEC), Ankara, Turkey, 1975.
- [44] Ministry of Public Works and Settlement of Turkey: Turkish Building Earthquake Code (TBEC), Ankara, Turkey, 1998.
- [45] Atar, M., İnce, O., Taş, Ö. F., Özmen, A., Sayın E.: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrasında Betonarme Kolonlarda Enine Donatı Kusurlarının İncelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36 (2024) 1, pp. 221-230, doi: <https://doi.org/10.35234/fumbd.1367593>.
- [46] Ekinci, E.: Investigation of Reinforced Concrete Structures After the Kahramanmaraş Earthquakes of February 6, 2023: Field Study in Malatya Province, *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7 (2024) 2), pp. 298-306, doi: <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1414243>.
- [47] Husain, M., Hassan, H., Mohamed, H.A., Elgharabawy, E. S.: Seismic response of post-tension shear walls – outrigger structure, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 6, pp. 491-502, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3418.2021>.
- [48] Mertol, H.C., Tunc, G., Akis, T.: A site survey of damaged RC buildings in İzmir after the Aegean sea earthquake on October 30, 2020, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 5, pp. 451-470, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3343.2021>