

Primljen / Received: 4.4.2014.

Ispravljen / Corrected: 27.5.2014.

Prihvaćen / Accepted: 10.7.2014.

Dostupno online / Available online: 1.8.2014.

Konstruktivska oštećenja armiranobetonskih građevina uslijed gradnje tunela

Autori:



¹ Doc.dr.sc. **Baris Yildizlar**, dipl.ing.građ.
peace@istanbul.edu.tr



² Dr.sc. **Baris Sayin**, dipl.ing.građ.
barsayin@istanbul.edu.tr
(corresponding author)



² Mr.sc. **Ahmet Sertac Karakas**, dipl.ing.građ.
skarakas@istanbul.edu.tr



² Dr.sc. **Cemil Akcay**, dipl.ing.građ.
cakcay@istanbul.edu.tr

¹ Sveučilište u Istanbulu
Odjel za građevinarstvo

² Sveučilište u Istanbulu
Odjel za konstrukcije i tehničke poslove

Stručni rad

Baris Yildizlar, Baris Sayin, Ahmet Sertac Karakas, Cemil Akcay

Konstruktivska oštećenja armiranobetonskih građevina uslijed gradnje tunela

Nagli pomaci u tlu mogu dovesti do oštećenja armiranobetonskih građevina. Takvi pomaci mogu između ostalog biti uzrokovani gradnjom tunela, pa se utjecaj takve gradnje treba uzeti u obzir u postupku projektiranja građevina. U ovom se radu na primjeru postojeće bolničke zgrade analiziraju konstruktivska oštećenja armiranobetonske građevine uslijed naglih pomaka tla. Kako bi se dobili što točniji podaci za potrebe analiza, primijenjen je multidisciplinarni pristup radi povezivanja raznih inženjerskih disciplina koje su sudjelovale u ovom istraživanju.

Ključne riječi:

oštećenje konstrukcije, pomak tla, iskop tunela, pojačanje tla, georadar

Professional paper

Baris Yildizlar, Baris Sayin, Ahmet Sertac Karakas, Cemil Akcay

Structural damage caused to RC buildings by tunnelling work

Structural damages to RC (Reinforced concrete) buildings occasionally occur as a consequence of sudden ground movements. One of these is effect of tunnel excavation on the structures and the design process should be carried out by taking the effect into account. In this study, the structural damages caused by the impact of sudden movement emanating at the ground were investigated for a selected hospital building. Within the scope of this study, it was aimed to obtain the most accurate data by combining different engineering disciplines through a comprehensive approach.

Key words:

structural damage, ground movement, tunnel excavation, ground strengthening, georadar

Fachbericht

Baris Yildizlar, Baris Sayin, Ahmet Sertac Karakas, Cemil Akcay

Durch Tunnelbohrung verursachte Beschädigung von Stahlbetonkonstruktionen

Beschädigungen von Stahlbetonkonstruktionen werden gelegentlich durch plötzliche Bodenbewegungen verursacht, die zum Beispiel bei Tunnelbohrungen auftreten können. Daher muss dieser Effekt bei der Planung in Betracht gezogen werden. In dieser Arbeit werden durch den Einfluss plötzlicher Bodenbewegungen verursachte Konstruktionsschäden eines ausgewählten Krankenhausgebäudes untersucht. Die vorliegenden Erforschungen sind insbesondere darauf ausgesetzt, zuverlässige Resultate durch die Anwendung verschiedener Ingenieursdisziplinen und eines anschaulichen Verfahrens zu erhalten.

Schlüsselwörter:

Konstruktionsschäden, Bodenbewegung, Tunnelbohrung, Bodenverstärkung, Georadar

1. Uvod

U mnogim velikim gradovima diljem svijeta bilježi se u protekla tri desetljeća sve veći porast primjene strojeva u tunelogradnji i to u svrhu izvođenja tunela za metroe, željeznice, ceste, kanalizaciju i ostalu komunalnu infrastrukturu. Takav trend je nastao iz potrebe da se udovolji zahtjevima sve većeg broja stanovnika te da se u što većoj mjeri poboljša urbani i prirodni okoliš. Usporedo s napretkom razvoja strojeva za bušenje tunela, sve se više gradskih tunela u mekom tlu izvodi pomoću tunelskih bušaćih strojeva. Kako se gradski tuneli obično izvode u teško pristupačnim i skućenim gradskim prostorima, jedan od osnovnih izazova u postupku projektiranja i građenja leži u osiguranju uvjeta za što manje izazvanih pomaka tla, jer takvi pomaci mogu ugroziti okolne građevine te komunalnu infrastrukturu koja se nalazi duž trase tunela [1].

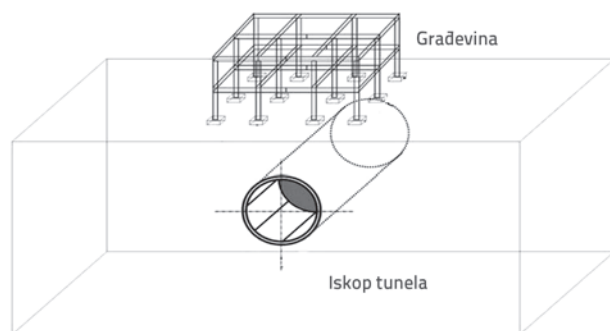
U novije doba neke su podzemne građevine pretrpjele značajna oštećenja u velikim potresima kao što su potres koji je 1995. godine zadesio Kobe u Japanu, potres iz 1999. godine u mjestu Chi-Chi na Tajvanu i potres koji je 1999. godine pogodio mjesto Kocaeli u Turskoj [2]. Zbog brzog razvoja urbanih sredina, sve se veći broj javnih građevina izvodi ispod površine tla. Međutim, složene podzemne gradnje mogu uzrokovati znatna oštećenja na postojećim zgradama, građevinama i komunalnoj infrastrukturi [3, 4].

Odziv građevine na pomake tla uzrokovane gradnjom tunela zapravo se smatra problemom međusobnog djelovanja tj. interakcije između tla i građevine, pa se za rješavanje tog pitanja traži poznavanje kako pomaka u tlu tako i odziva konstrukcija. Nedovoljno poznavanje takve interakcije može dovesti do poduzimanja suvišnih zaštitnih mjera, nepotrebnih troškova te, u konačnici, do postizanja nezadovoljavajućih rezultata [5]. Utjecaj na susjedne građevine od bitnog je značenja za gradnju tunela u urbanim sredinama, i to prije svega zbog izražene interakcije između gradnje tunela i ponašanja postojećih građevina [6, 7].

Općenito uzevši, gradnja tunela u mekom tlu dovodi do pomaka tla, a to može znatno utjecati na stabilnost i cjelovitost postojećih nadzemnih građevina. Da bi se takvi pomaci sveli na najmanju moguću mjeru, naročito u urbanim područjima, izvođači sve češće u tunelogradnji koriste strojeve za bušenje tunela (eng. *tunnel boring machines* - TBM), takozvane krtice. Takvi strojevi smanjuju poremećaje tla tijekom gradnje tunela zbog frontalnog potiska stroja i korištenja privremene podgrade, te se tako bitno smanjuje opasnost od narušavanja sigurnosti postojećih građevina [8-10].

Građeci tunele s namjerom da se planiraju riješiti prometni i infrastrukturni problemi u velikim gradovima, uvijek je prisutna opasnost od oštećenja i rušenja nadzemnih građevina unutar zone slijeganja, tj. zone na koju utječe gradnja tunela (slika 1). Zbog toga se odgovarajuće provjere trebaju provesti prije i tijekom građenja tunela, a samo izvođenje može početi tek nakon poduzimanja odgovarajućih mjera opreza [7, 11-14].

To je naročito značajno kada se podzemni radovi izvode ispod građevina javne namjene, npr. bolnica, škola i sl.



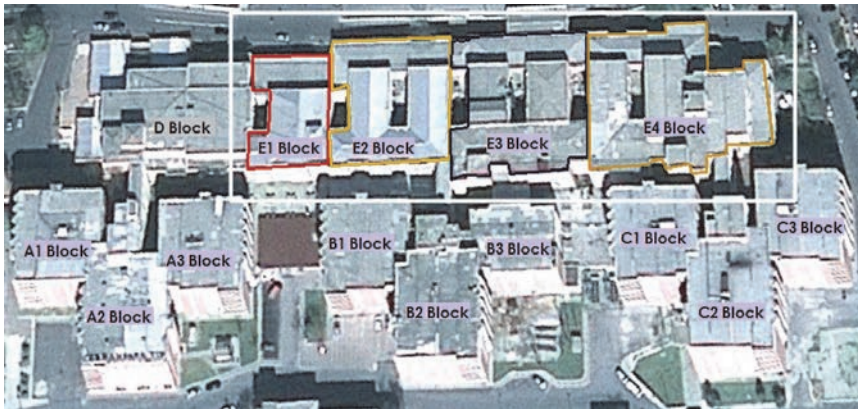
Slika 1. Interakcija između tunela i nadzemne građevine, analizirani problem [15]

Kompleks Cerrahpaşa je dio istambulskog sveučilišta koji se nalazi na gornjem dijelu obalnog pojasa Yenikapi na Mramornom moru u području Samatya (slika 2.). U tom su kompleksu smješteni medicinski fakultet, stomatološki fakultet, instituti, strukovne škole i dva studentska doma. Tlocrtna površina zgrada smještenih u ovom kompleksu iznosi 220.000 m², a tlocrtna površina koji zauzima medicinski fakultet iznosi 170.000 m². Navedene građevine su izgrađene prije 35 godina i služe za potrebe raznih odjela, prostori uprave te dvorane za operacije. Neke od tih građevina su samostojeći objekti, a neke su od drugih odvojene vertikalnim dilatacijama, ali su funkcionalno povezane horizontalnim prolazima. Na slici 3. prikazane su pozicije operacijskih blokova E1, E2, E3 i E4, te ostali blokovi koji su s njima arhitektonski povezani.

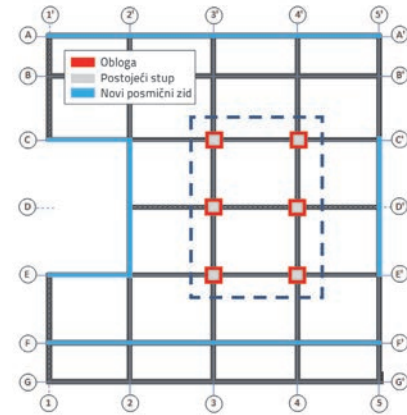


Slika 2. Satelitska slika sveučilišnog kompleksa Cerrahpasa [16]

Operacijski blokovi E1, E2, E3 i E4 ključni su za normalno funkcioniranje Medicinskog fakulteta Cerrahpasa koji djeluje u sklopu Sveučilišta u Istanbulu. U tim građevinama je smješten centralni laboratorij, sale za operacije, odjel za sterilizaciju, oftalmološki odjel, kardiološki odjel, uredi za nastavno osoblje, poliklinički odjeli i ostali prostori slične namjene. Blok E1, koji je glavni predmet ovog istraživanja,



Slika 3. Satelitska slika operacijskih i ostalih povezanih blokova unutar sveučilišnog kompleksa Cerrahpasa [17]



Slika 4. Tlocrt podruma bloka E1, ojačani stupovi i novi posmični zidovi

treba funkcionirati besprijekorno i bez zastoja jer se u njemu nalazi sterilizacijska jedinica. U ovoj bolnici, koja je jedna od najcjenjenijih medicinskih ustanova u Turskoj s velikim brojem domaćih i stranih pacijenata, materijali za higijenu dopremaju se u operacijske sale isključivo iz sterilizacijske jedinice smještene u bloku E1.

2. Opći podaci o građevini i način ojačanja

Za potrebe cjelovitog ispitivanja konstrukcije svih građevina u sastavu bolnice korištena je razna mjerna oprema. Ispitivanjem građevina ustanovljeno je da su problemi koji negativno utječu na sigurnost građevine prije svega beton kojem tlačna čvrstoća iznosi oko 10 MPa, te armatura koja je u velikoj mjeri zahvaćena korozijom. Glavni predmet ovog istraživanja je bolnički blok E1 ukupne korisne površine od 2563 m² koji je smješten na prostoru od 696 m². Najveći rasponi unutar ove građevine su 6 m. Dimenzije postojećih stupova konstantne su na prizemlju i prvom katu, nakon čega se na gornjim katovima postupno smanjuju. Međutim, poprečni presjeci greda konstantni su po čitavoj visini konstrukcije. Unatoč konstantnim dimenzijama greda, u nosivom se sustavu zbog smanjenja poprečnog presjeka

stupova javlja problem veze jake grede i slabog stupa. Prije ojačanja konstrukcije, armiranobetonski posmični zid nalazio se samo u uzdužnom smjeru i to na četiri mjesta. Stoga je nakon ispitivanja poprečnih presjeka i položaja postojećih konstrukcijskih elemenata zaključeno da su težišta i središta krutosti previše udaljeni jedni od drugih. Tijekom prijašnjih radova na ojačanju bloka E1, armiranobetonski posmični zid je izveden na pet mjesta u uzdužnom smjeru (u smjeru osi x) i na četiri mjesta duž osi y. Ti armiranobetonski zidovi su integrirani u postojeću konstrukciju pomoću odgovarajućih obloga stupova minimalne debljine 0,2 m. Tlocrt podruma bloka E1, tj. prostor na kojem je obavljeno spomenuto ojačanje, prikazan je na slici 4.

Na tlocrtu podruma bloka E1 elementi u obliku slova U koji su prikazani na lijevoj strani, elementi prikazani na osi y na desnoj strani, te konstrukcijski elementi prikazani na tri mjesta na osi x (F-F') predstavljaju posmične zidove koji su dodani tijekom sanacijskih radova. Armiranobetonski posmični zidovi koji se vide na četiri mjesta duž osi x (A-A') predstavljaju prvobitno izgrađene posmične zidove [18].

Analizirani blokovi E1 i E2 su dilatacijama odvojeni od ostalih operacijskih blokova (E3 i E4), a gledano u cjelini, blokovi su izvedeni jedan za drugim. Blokovi E1 i E2 sastoje se od



Slika 5. Tlocrt operacijskih blokova E1-E4 unutar sveučilišnog kompleksa Cerrahpasa

četiri kata, tj. od jednog podrumskog kata, prizemlja i dva nadzemna kata, dok se blokovi E3 i E4 sastoje od podrumskog kata, prizemlja i tri nadzemna kata. Ti se blokovi odlikuju okvirnim nosivim sustavom od armiranobetonskih posmičnih zidova. Temelji ovih građevina su kontinuirani, a korišteni su podni sustavi s grednim pločama. U navedenim je blokovima ojačanje obavljeno u vremenu između 2005. i 2008. godine. U razdoblju nakon tih radova izvršene su razne arhitektonske i kozmetičke promjene ovisno o trenutačnim potrebama. Tlocrt prizemlja konstrukcije prikazan je na slici 5.

3. Važnost predmetnog istraživanja

Usporedo s povećanjem broja stanovnika u urbanim područjima rastu i potrebe za razvojem komunalne i ostale infrastrukture, pa se u tom smislu sve više grade novi tuneli, što može dovesti do oštećenja građevina koje se nalaze na površini iznad njih. Važno je da se takvi rizici svedu na minimum prije početka tunelskih radova, tj. već tijekom projektiranja kada se trebaju izraditi odgovarajuće studije izvodljivosti da bi se izbjegli mogući problemi. U ovom se radu prikazuju potencijalni rizici u vremenu prije iskopa tunela, mjere opreza koje se trebaju poduzeti tijekom gradnje tunela, te se daju prijedlozi za sprečavanje mogućih šteta prije iskopa i gradnje tunela. U ovom se kontekstu analiziraju operacijski blokovi Medicinskog fakulteta Cerrahpasa koji se nalazi u sastavu istambulskog sveučilišta. Istražuju se uzroci konstrukcijskih oštećenja, prikazuju se georadarska ispitivanja te ojačanja konstrukcije, istražuju se promjene veličina pukotina u elementima konstrukcije te se daju prijedlozi za analizu takvih konstrukcija. U tom se smislu parametri, koji se trebaju uzeti u obzir prije i tijekom gradnje tunela, koriste kao osnova za davanje preporuka o mjerama za uštedu vremena, povećanje stupnja sigurnosti i rast financijske učinkovitosti.

4. Ocjena oštećenja i mjere za sanaciju šteta

Prema navodima osoblja zaposlenog u blokovima E1 i E2, u ponoć se u zgradi čula neobična buka [19]. Pretpostavlja se da su se pukotine na pregradnim zidovima pojavile nakon te buke. Ustanovljeno je da se radi o dijagonalno položenim pukotinama. S obzirom na geometriju pukotina, pojavila se sumnja da su uzrokovane neobičajenim kretanjem tla u podzemlju ispod građevine. Također je pretpostavljeno

da su pukotine u zidu možda nastale zbog ranijih radova na ojačanju konstrukcije, tj. zbog primjene neodgovarajuće metode ojačanja. Zbog toga su analizirani razlozi zašto je došlo do tako neobičajenih pomaka tla. U međuvremenu, analizom dijagonalnih pukotina na pregradnim zidovima i njihovog pružanja u odnosu na položaj zidova ustanovljeno je da je došlo do slijeganja građevine po vertikalnoj osi. Uočeno je da su pukotine na zidovima, naročito one na prizemlju i na prvom katu, dosegle alarmantnu veličinu. Građevina je zatvorena zbog sigurnosnih razloga, tj. zbog pojave pukotina nepoznatog porijekla te zbog brige za pacijente i osoblje. Dijagonalne 5-milimetarske pukotine, pukotine na nosačima greda uzrokovane vlačnim i savojnim naprezanjima, te posmične pukotine, uočene su na zidovima sterilizacijske jedinice koja se nalazi u podrumu, a izuzetno je značajna za funkcioniranje bolnice. Vlačne pukotine koje su se pojavile uslijed opterećenja na savijanje uočene su ispod poda podrumskog kata (slika 6.) prema [18].

Uočeno je da relativni pomak greda iznosi više od 1/250, a slijeganje stupova više od 1/250. Zbog tako velike vrijednosti slijeganja, u gornjem je dijelu došlo do loma uslijed savijanja te do pucanja pločica na podu gornjeg kata. Svi ti nalazi upućuju na činjenicu da se slijeganje tla stvarno dogodilo ispod analiziranih građevina. Na tlocrtu prikazanom na slici 4., prostor omeđen crtkanim linijama predstavlja zonu



Slika 6. Pukotine na nosivim i nenosivim elementima

koncentriranog slijeganja u promatranoj građevini. Pukotine su nađene na pregradnim zidovima od opeke, plinobetona i gipsanih ploča.

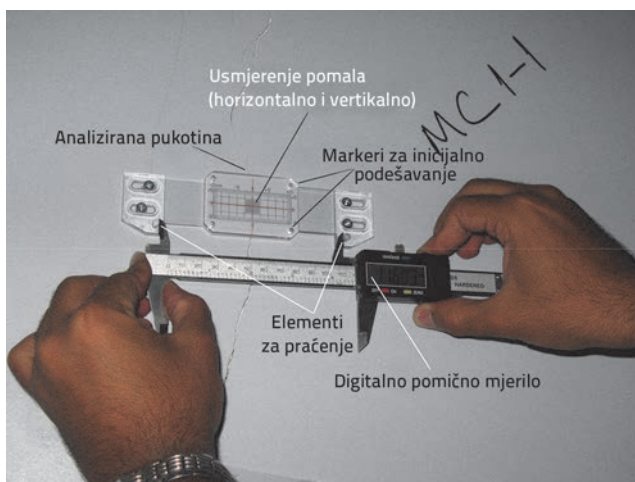
Nakon što je ustanovljeno da su postojeća oštećenja nastupila zbog pomaka u tlu, analizirani su mogući razlozi za tako nagli pomak tla. U normalnim se okolnostima tlo ispod starijih građevina pomiče zbog sljedećih razloga:

- nagle pojava vode u temeljnom tlu te pomicanja temeljnog tla uslijed djelovanja vode, tj. nastupanja pojave koja uzrokuje eroziju tla ispod temelja
- izvođenja tunela ili nekog drugog iskopa bilo ispod ili pored građevine
- potresa ili sličnog opterećenja.

Analizirajući navedena tri slučaja, ustanovljeno je kako nema pravih dokaza da je nastupila pojava erozije tla. Također nije se mogao uzeti u obzir ni utjecaj potresa jer u to vrijeme nije bilo potresa na navedenom području. Stoga je analizirana mogućnost da je do utjecaja došlo uslijed gradnje tunela.

4.1. Istraživanje uzroka oštećenja

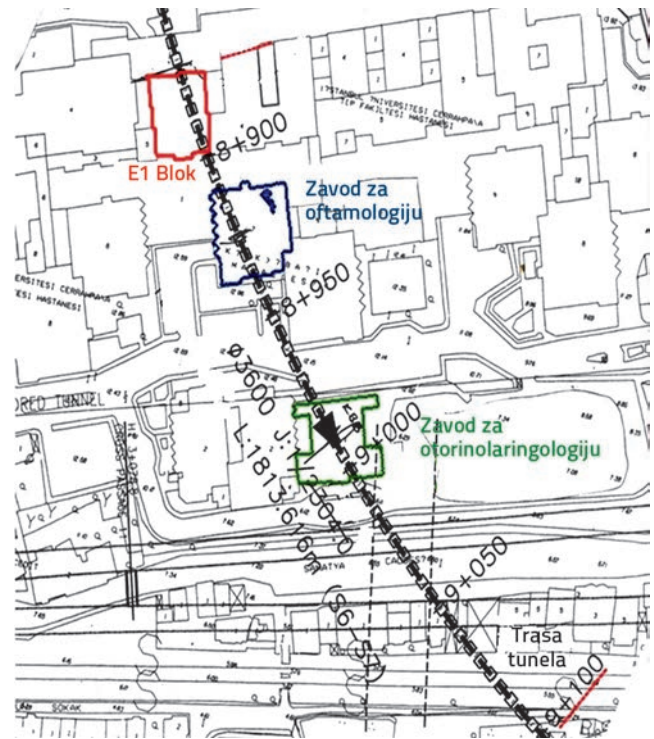
Da bi se odredili mogući uzroci pojave pukotina na određenim elementima građevine, te radi analize pomaka konstrukcije, na zidove, grede i stupove postavljeno je ukupno trideset mehaničkih uređaja za mjerenje pukotina (sedam mjeraca MC-2-1-7 za sterilizacijsku jedinicu u bloku E1, te 23 mjeraca MC-1.1-23 za operacijske sale u bloku E2). Variranje veličine pukotina registrirano je u razdoblju od trideset dana, a podaci su bilježeni svakog dana (slika 7.), prema [18].



Slika 7. Mehanički uređaj za mjerenje pukotina

Istraživani su i vanjski događaji koji bi mogli utjecati na abnormalna i nagla kretanja tla. U tom su smislu analizirani iskopi tla u blizini bolnice, isto kao i nedavni iskopi vezano za projekt Marmaray (Bosporski tunel; investitor: DLH - Generalna uprava za građenje željeznica, luka i zračnih luka)

i projekt ISKI (Upravljanje vodom i odvodnjom u Istanbulu – europska strana, drugi dio, odvodni tunel). Vezano za projekt Marmaray, tijekom iskopa tunela radovi su obavljani na obje trase tunela. Na jednoj trasi već dvije godine nije bilo radova. Aktivnosti na projektu Marmaray bile su samo na drugoj trasi koja je udaljena gotovo kilometar i pol od analizirane građevine. Prilikom analize iskopa za gradnju projekta ISKI (europska strana, drugi dio, odvodni tunel), ustanovljeno je da se iskop odvija ispod građevine na kojoj su registrirane pukotine, pa je daljnja analiza usredotočena na taj projekt. Trasa projekta ISKI prikazana je na slici 8.



Slika 8. Trasa projekta ISKI (odvodni tunel) i blokovi Medicinskog fakulteta Cerrahpasa koji se nalaze na toj trasi [20]

Nakon što su obavljene razne analize javnih građevina i blokova u blizini fakulteta, utvrđeno je da je do pojave pukotina i slijeganja došlo kod nekih građevina skoro petnaest dana prije nego što je zabilježeno oštećenje na građevini E1. Osim toga, pukotine su uočene na odjelu za oftalmologiju, u drugom bolničkom krilu, četiri ili pet dana prije događaja. Prema anketama (intervjuima) koje su provele osobe koje žive u javnim zgradama, povremeno su se iz podzemlja čuli neobični zvukovi. Prikupljeni podaci upućuju na neprekidno odvijanje podzemnih radova. Službene osobe su izjavile da iskop na projektu ISKI (odvodni tunel) napreduje 15 m dnevno te da su se nedavno tunelski radovi odvijali na dubini od 22 m. Kao što se može vidjeti na slici 8., položaj bloka E1 odgovara stacionaži 8+873 trase tunela koji prolazi upravo ispod većeg broja građevina. Važno je napomenuti da su se radovi ispod privatnih građevina odvijali petnaest dana ranije. Međutim,

javne građevine smještene su na stacionaži 9 + 100 trase tunela. S obzirom na ove podatke te imajući u vidu relevantne parametre (udaljenost tunela i dnevno napredovanje radova), može se zaključiti da se vrijednost od (9100 m – 8873 m) / 15 m/dan = 15 dana, dobro podudara s prikupljenim informacijama. Odjeli za oftalmologiju i otolaringologiju smješteni su duž trase tunela, na stacionažama 8+930 i 9+000. Prikupljene informacije potvrđene su na osnovi mjerenja koja su naknadno obavljena na tim građevinama, pri čemu su korišteni isti parametri.

4.2. Georadarska ispitivanja

Georadarska ispitivanja obavljena su na podrumskoj etaži bloka E1 da bi se istražile eventualne deformacije tla u zoni u kojoj je došlo od slijeganja građevine. Varijacije na razini temelja ispitane su odgovarajućim georadarskim mjerenjima koja su obavljena na mjestima veće koncentracije oštećenja, na zidovima i podu sterilizacijske jedinice koja se nalazi na etaži operacijske sale duž paralelnih profila koji se protežu u duljini od 9 m (slika 9.). Za ispitivanje je korištena antena od 300 MHz da bi se dobio odziv za dubine od otprilike 15 m. Promjene u tlu prikazane su na dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim radargramskim prikazima.



Slika 9. Georadarski profili, radargramski prikaz anomalija i uočenih pukotina (deformacija), s prikazom trase tunela

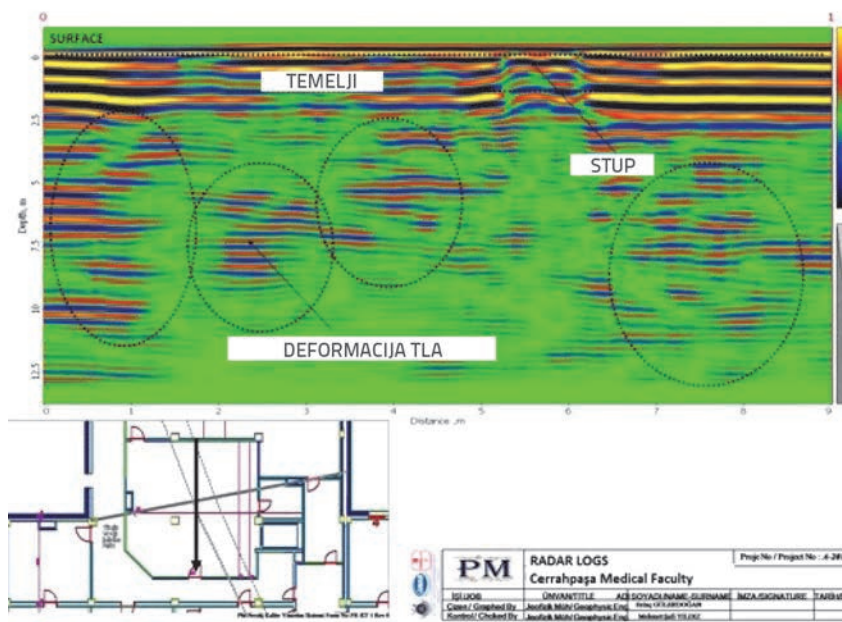
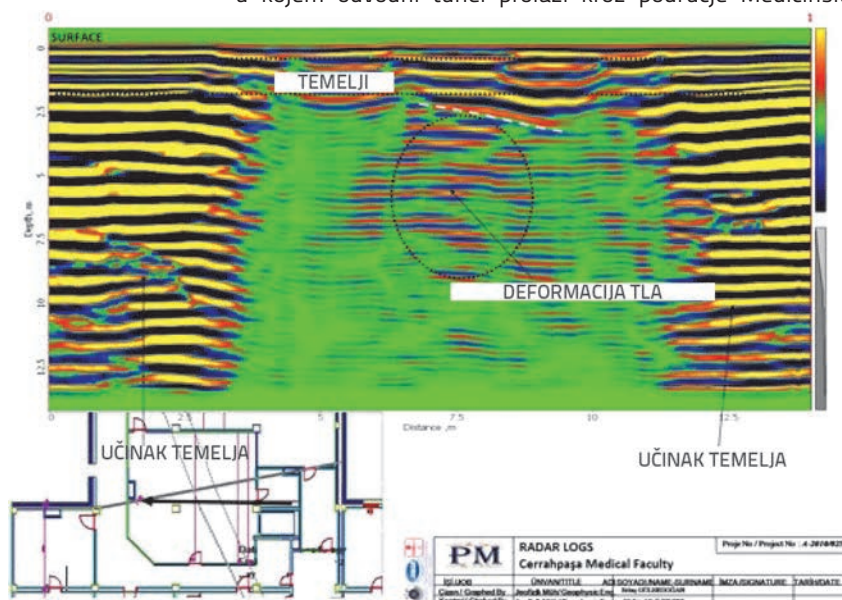
Kao što se vidi na slici 9., georadarskim su mjerenjima uočene anomalije i u području gdje su pomaci tla već bili registrirani opažanjem. Georadarski se

rezultati točno podudaraju s rezultatima opažanja. Zanimljivo je da početna točka anomalije u potpunosti odgovara položaju stroja za iskop tunela.

Dva dvodimenzionalna radargramska presjeka, dobivena iz smjera paralelnog s osima x i y u zoni koncentriranih slijeganja i deformacija tla u operacijskoj sali analizirane građevine, prikazana su na slici 10.

4.3. Ojačanje tla ispod građevine

Analize trase tunela pokazuju da se dva rasjeda nalaze u dijelu u kojem odvodni tunel prolazi kroz područje Medicinskog



Slika 10. Dvodimenzionalni radargramski presjek i deformacije tla [21]

fakulteta Cerrahpasa. Jedan od tih rasjeda presijeca trasu tunela (slika 9.), a nalazi se ispod najoštećenijeg dijela analizirane građevine. Razlomljena rasjedna zona širine otprilike 7-8 m sadrži vodu, a odlikuje se poremećenom poroznom teksturom. Drugi rasjed širine 8-10 m stožasto se širi, u blizini analizirane građevine, od razine tunela prema gore i to pod kutom od gotovo 45°, ovisno o debljini nadsloja tunela.

Tlo u zoni analiziranih fakultetskih građevina sastoji se od nasipanog materijala i aluvijalnih slojeva. Poznato je da takva tla sadrže podzemne i oborinske vode, a jasno je da naglo uklanjanje podzemnih voda te brzo spuštanje razina tih voda dovodi do naglog rušenja i slijeganja tla koje nosi nadzemne građevine [18]. Slijeganje je počelo na donjem dijelu analiziranog bloka i uzrokovalo je dodatno oštećenje nosivih elemenata. To slijeganje je kasnije negativno utjecalo i na nosive dijelove susjednih građevina. Može se očekivati da će se proces slijeganja i oštećivanja dijelova konstrukcije nastaviti sve dok se ne postigne ravnoteža geoloških formacija.

Tijekom analiza tla ispod građevina oštećenih naglim pomacima tla, u tlo je injektirano otprilike 80 tona injekcijske smjese. Osim toga, gotovo 80 tona injekcijske smjese dodatno je injektirano na lokaciji građevine koja se nalazi iznad drugog rasjeda. Iako je injektiranje provedeno u svrhu "ojačanja tla" do sada nisu objavljeni nikakvi podaci o stvarnim rezultatima tog injektiranja. Postupak injektiranja tla cementnom smjesom prikazan je na slici 11.

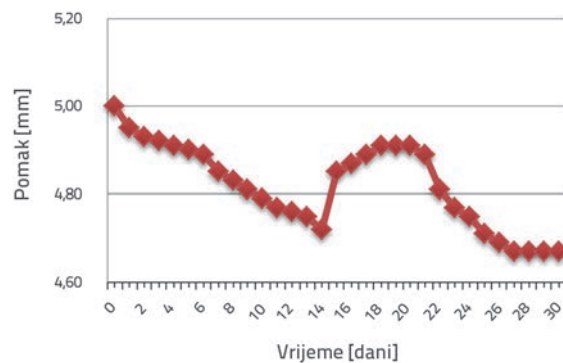


Slika 11. Injektiranje radi ojačanja tla

4.4. Analiza promjene veličine pukotina u oštećenim građevinama

Podaci o mjerenju veličine pukotina u razdoblju od trideset dana dobiveni su pomoću trideset mehaničkih mjernih uređaja postavljenih u sterilizacijskoj sali (blok E1) i u operacijskoj sali (blok E2). Regresija pukotina na milimetarskoj razini određena je pomoću uređaja za mjerenje pukotina u prva dva tjedna

ispitivanja. Nakon injektiranja cementne smjese, na kraju trećeg tjedna, pukotine su se povećale u odnosu na njihovu prvobitnu veličinu. U posljednjih sedam dana pukotine su dosegle svoje referentne dimenzije, a širina pukotina se ustalila (slika 12.). To pokazuje da je ojačanje tla djelotvorno sredstvo za sprečavanje pomaka građevina.



Slika 12. Uzorak MC-1:13: Promjena širine pukotine u razdoblju od 30 dana

4.5. Analiza oštećenja na građevinama E1 i E2

Oštećenja na analiziranoj građevini mogu se ukratko opisati kao dijagonalne pukotine na zidovima podzemne etaže, pukotine zbog savijanja na stropu podrumске etaže, pukotine na nosačima greda zbog vlaka i savijanja, te posmične i tlačne pukotine na nekim stupovima [18]. Takva oštećenja nisu uzeta u obzir prilikom projektiranja građevine, tj. tada su bila predviđena oštećenja uslijed potresa, vjetrova, stalnog opterećenja, pokretnog opterećenja i svih mogućih kombinacija tih opterećenja. Do oštećenja je došlo zbog preraspodjele poprečnih opterećenja zadanih u analizi i projektu građevine, tj. zbog variranja reakcijskih sila u temeljima građevina uslijed naglog slijeganja. Građevina se nije srušila zahvaljujući ranije izvedenim ojačanjima. Iako su pomaci tla usporeni injektiranjem cementne smjese, radovi injektiranja nisu popravili neuravnoteženo stanje u elementima konstrukcije. Relativno velike deformacije na gredama pokazuju da je konstrukcija pretrpjela deformacije koje su veće od granice elastičnosti. Svi ti utjecaji nisu bili zadani u prvobitnoj analizi i projektu građevine. Zbog toga se treba obaviti analiza sadašnjeg stanja promatranih građevina te se trebaju odrediti razlike u naprezanjima konstrukcijskih elemenata. Navedena analiza se treba obaviti u dvije faze.

Prva faza: Određivanjem diferencijalnih slijeganja u temeljima konstrukcije trebaju se izračunati poprečni odzivi, pomaci i deformacije i to samo za ta slijeganja (bez bilo kakvih drugih utjecaja). U taj se proračun treba uključiti i raspodjela naprezanja u ravnini poda te osne sile na gredama. Tom analizom će se odrediti veličina poprečnih odziva i to isključivo uslijed diferencijalnih slijeganja.

Druga faza: Za elemente konstrukcije se trebaju definirati uvjeti preopterećenja opisani u prvoj etapi (osno naprezanje,

posmično naprezanje, torzijsko naprezanje, ravninsko naprezanje itd.). Na temelju tako definiranih uvjeta treba se obaviti seizmička analiza u skladu s odgovarajućim propisima. Poprečni odzivi, reakcijske sile, pomaci i deformacije izračunani u prvoj etapi trebaju se superponirati (kao apsolutne vrijednosti i u rastućem smjeru) primjenom rezultata iz ove analize.

5. Rezultati istraživanja i prijedlozi

Ustanovljeno je da su konstrukcijski elementi građevina E1 i E2 Medicinskog fakulteta Cerrahpasa, smještenog u kompleksu Cerrahpasa istambulskog sveučilišta, oštećeni zbog izvođenja tunela promjera 4,6 m koji prolazi ispod tih blokova. Međutim, u ovom konkretnom slučaju poremećaji i oštećenja mogu se djelomično pripisati i dosta lošem stanju ove građevine stare 35 godina. Taj zaključak potvrđuju i izvješća koja su pripremili različiti instituti i eksperti. Rezultati ovog istraživanja mogu se sažeti kako slijedi:

- Uslijed pomaka temelja pojavile su se pukotine u nosivom sustavu građevine, nakon čega su uslijedila razna slijeganja, te je u potpunosti promijenjena raspodjela opterećenja u nosivom sustavu građevine.
- Mogla bi biti ugrožena i sigurnost drugih građevina koje se nalaze u blizini promatrane građevine, a to se odnosi i na građevine smještene na drugim mjestima duž trase tunela. Stanje tih građevina razmatrat će se u nekom drugom istraživanju. Za te se građevine treba napraviti odgovarajuća ocjena i to na temelju dodatnih mjerenja i analiza. Može se dogoditi da se na građevini E1, koja je sada relativno uravnotežena, jave i dodatni problemi. Slične poteškoće su moguće i kod susjednih građevina.
- Problemi uočeni tijekom istraživanja na potezu između stacionaže 9+100 km i građevine E1, a oni su se javljali usporedo s iskopavanjem tunela, pokazuju da proces iskopavanja tunela uzrokuje poteškoće na građevinama koje se nalaze iznad trase tunela.

Istraživanje oštećenja konstrukcija ilustrirano je primjerom šteta na bolničkoj zgradi. U nastavku se daju prijedlozi za praktičnu primjenu i daljnja istraživanja:

- Određena su opterećenja koja su pretrpjele građevine E1 i E2 što omogućuje postizanje rezultata koji upućuju na statičko ponašanje tih građevina. Metoda ojačanja s detaljnom analizom može se odrediti pomoću dobivenih vrijednosti, a na temelju odgovarajućih propisa.

Nepoštivanje spomenutih zahtjeva ne bi dovelo do poboljšanja statičke pouzdanosti građevine koja prolazi kroz postupak ojačanja konstrukcije. Baš naprotiv, lako je moguće da bi na toj građevini došlo do pojave oštećenja.

- Kako se smatra da je analizirana građevina nepogodna za korištenje, ona se sada ne koristi i zatvorena je za javnost. Za vrijeme radova na sanaciji ne smiju se koristiti ni pojedini odjeli unutar građevine. Eventualno obavljanje aktivnosti bez mjera opreza moglo bi dovesti do zatvaranja ove izuzetno značajne građevine.
- Pomoću podataka dobivenih tijekom istraživanja može se zaključiti da se slični pomaci mogu očekivati i na drugim mjestima duž trase tunela.
- Nalazi dobiveni ovim istraživanjem omogućuju određivanje utjecaja iskopa tunela na građevine koje se nalaze iznad trase tunela. Trebaju se utvrditi odgovarajući parametri, a to su položaj trase, promjer iskopa i dubina iskopa. Moraju se provesti i potrebne preliminarne studije, uz odgovarajuće mjere opreza.
- Radovi na iskopu tunela doveli su do popuštanja i slijeganja tla, te do pomaka po širini. Da bi se takvi događaji spriječili, treba se uzeti u obzir interakcija između građevine i tla, isto kao i utjecaj iskopavanja tunela na građevine smještene iznad trase tunela. U tom se smislu treba obaviti numerička analiza interakcije između tla i konstrukcije, isto kao i analiza vlačnih deformacija.
- U kontekstu iskopavanja tunela, naročito u područjima novih naselja, izuzetna se pažnja treba posvetiti, nakon dovršetka radova, izvođenju građevina na površini terena, isto kao i svim aspektima koji su bitni za to izvođenje, da bi se izbjegli mogući gubici ljudskih života i nepotrebni financijski troškovi.

U skladu s gornjim zaključcima treba se obaviti sveobuhvatna analiza konstrukcije građevine, isto kao i ocjena utjecaja gradnje tunela na građevine smještene duž trase tunela. Trebaju se pripremiti i odgovarajuće zakonske odredbe za takve slučajeve. Sve je to prijeko potrebno poduzeti kako bi se izbjeglo rušenje građevina koje nisu projektirane za takve poremećaje tla.

Zahvale

Autori ovim putem izražavaju svoju zahvalnost prof. dr. sc. Namiku Kemal Oztorunu iz Odjela za građevinarstvo Sveučilišta u Istanbulu na izuzetno korisnim raspravama o ovoj tematici.

REFERENCES

- [1] Sirivachiraporn, A., Phienwej, N.: Ground movements in EPB shield tunneling of Bangkok subway Project and impacts on adjacent buildings, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30 (2012), pp. 10–24, 2012.
- [2] Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J.I.C.: Seismic design and analysis of underground structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(4), pp. 247–293, 2001.
- [3] Park, K-H., Soe, M.M., Kim, Y-J.: A tool for tunneling-induced building damage risk assessment, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 463, 2006.
- [4] Akhaveissy, A.H.: Analysis of tunnel and super structures for excavation, *Scientia Iranica*, 18(1), pp. 1–8, 2010.
- [5] Son, M., Cording, E.J.: Tunneling, building response, and damage estimation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 326, 2006.
- [6] Pikhavar, J.A., Burd, H.J., Housby, G.T.: An equivalent beam method to model masonry building in 3D finite element analysis, *Computers & Structures*, 88 (19–20), pp. 1049–1063, 2010.
- [7] Dimnock, P.S., Mair, R.J.: Effect of Building Stiffness on Tunneling-Induced Ground Movement, *Tunneling and Underground Space Technology*, 23(4), pp. 438–450, 2008.
- [8] Herrenknecht, M.: New developments in large-diameter tunnel design manufacture and utilisation for world-wide projects, *World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metropolises*, Balkema, Sao Paulo, pp. 869–875, 1998.
- [9] Kurihara, K.: Current mechanized shield tunnelling methods in Japan, *World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metropolises*, Balkema, Sao Paulo, pp. 615–622, 1998.
- [10] Kuwahara, S.: Mechanized and automated tunnelling in Japan, *Proceedings of the International Symposium on Ground Challenges and Expectations in Tunnelling Projects*, Cairo, Egypt, pp. 81–91., 1999.
- [11] Selby, A.R.: Tunneling in Soils-Ground Movements, and Damage to Building in Workington, UK, *Geotechnical and Geological Engineering*, 17(3-4), pp. 351–371, 1999.
- [12] Berilgen, M., Doran, B., Yıldırım, S., Bulut, A.: Soil Structure Analysis of a Structure Over Twin Metro Tunnels, *Special Issue on the First National Symposium: Soil-Structure Interaction in Theory and Application*, (eds: Çinicioğlu S.F., Bozbey I. and Keleşoğlu M.K.), Istanbul, pp. 119–122, 2007, (in Turkish).
- [13] Aye, Z.Z., Karki, D., Schulz, C.: Ground Movement Prediction and Building Damage Risk-Assessment for the Deep Excavations and Tunneling Works in Bangkok Subsoil, *International Symposium on Underground Excavation and Tunneling*, Thailand, 2006.
- [14] Laefer D.F., Ceribasi S., Long J.H., Cording E.J.: Predicting RC Frame Response to Excavation-Induced Settlement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), pp. 1605–1619, 2009.
- [15] Mroueh, H., Shahrour, I.: A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction, *Computers and Geotechnics*, 30(3), pp. 245–253, 2003.
- [16] Satellite image of I.U Cerrahpaşa Campus. www.googlemaps.com, (accessed November 2011).
- [17] Satellite image. <http://earth.google.com>, (accessed August 2010).
- [18] I.U. Cerrahpaşa Faculty of Medicine Reports: Analysis and Technical Reports, no. 1–5, Istanbul University Rectorate, <http://yapi.istanbul.edu.tr/?p=7304>, 2010.
- [19] Personal Communication, I.U. Cerrahpaşa, Faculty of Medicine E1 and E2 Blocks Staff, 2010.
- [20] ISKI (Istanbul Water and Sewerage Management): The head of Sewerage Office, Project Details of European Side 2nd part Sewerage Tunnel Route, 2010.
- [21] PM Engineering Consultation Underground Research Registers Company, Georadar Records on Ground of Cerrahpaşa Faculty of Medicine, E1 Block, 2010.