

Primljen / Received: 27.7.2021.

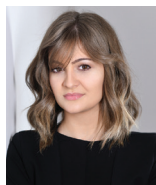
Ispravljen / Corrected: 26.11.2021.

Prihvaćen / Accepted: 29.11.2021.

Dostupno online / Available online: 10.12.2021.

Usporedba učinkovitosti tragača armature i georadara u ocjeni stanja konstrukcija: primjeri iz prakse

Autori:



Ksenija Tešić, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
ksenija.tesic@grad.unizg.hr



Doc.dr.sc. **Ana Baričević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
ana.baricevic@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Marijana Serdar**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
marijana.serdar@grad.unizg.hr

Stručni rad

Ksenija Tešić, Ana Baričević, Marijana Serdar

Usporedba učinkovitosti tragača armature i georadara u ocjeni stanja konstrukcija: primjeri iz prakse

Neizostavan korak u ocjenjivanju stanja armiranobetonskih građevina te procjeni preostale nosivosti jest utvrđivanje rasporeda i količine armature i geometrije konstrukcijskih elemenata. Cilj rada je prikazati osnovna načela u korištenju dviju nerazornih metoda, to jest pomoću tragača armature i georadara, tijekom određivanja navedenih karakteristika konstrukcije. Kroz devet primjera iz prakse prikazana je usporedba dviju metoda te su istaknute njihove mogućnosti, prednosti i nedostaci.

Ključne riječi:

armirani beton, armatura, zaštitni sloj betona, nerazorne metode, primjena u praksi

Professional paper

Ksenija Tešić, Ana Baričević, Marijana Serdar

Comparison of cover meter and ground penetrating radar performance in structural health assessment: case studies

An essential step in the condition assessment of reinforced concrete structures and evaluation of the residual capacity is the determination of the arrangement and quantity of reinforcement as well as the geometry of the structural elements. The objective of this paper is to present the fundamentals in the application of two non-destructive methods, cover meter and ground penetrating radar, in the determination of the above structural features. A comparison of the two methods is presented and their capabilities, advantages and disadvantages are shown through nine case studies.

Key words:

reinforced concrete, reinforcement, concrete cover, non-destructive methods, practical application

1. Uvod

Svaka građevina, ovisno o svojoj namjeni, mora biti projektirana i izgrađena na način da tijekom svog trajanja ispunjava temeljne zahtjeve za građevinu te druge zahtjeve, odnosno uvjete propisane Zakonom o gradnji i posebnim propisima koji utječu na ispunjavanje temeljnog zahtjeva za građevinu [1]. Iskustvo pokazuje da uslijed zajedničkog utjecaja mehaničkih i okolišnih djelovanja velik broj betonskih građevina pokazuje značajnu degradaciju već nakon 20 do 30 godina [2]. Prema Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije [3], vlasnik građevine odgovoran je za održavanje građevine. Održavanje uključuje provođenje osnovnih pregleda jednom godišnje, provedbu glavnih pregleda svakih deset godina za zgrade, a pet godina za mostove, tornjeve i druge inženjerske građevine, te provedbu dopunskih pregleda prema posebnim pravilima za pojedine vrste konstrukcija. Ako se pregledi, a s njima i održavanje građevina ne provodi sustavno i proaktivno, dolazi do njihove prerane i nekontrolirane degradacije, što negativno utječe na sigurnost i uporabivost, na što su zorno upozorili potresi koji su tijekom 2020. godine uznemirili Hrvatsku.

Ograničene spoznaje o ponašanju oštećenih betonskih građevina, nedostatak sustavnih i pouzdanih metodologija za njihovu ocjenu, održavanje i sanaciju doprinose povećanju cjeloživotnih troškova građevina, te rezultiraju smanjenom uporabivosti, funkcionalnosti i sigurnosti [4]. Utvrđivanje točnog uzroka degradacije zahtijeva opsežno poznavanje svojstava materijala i konstrukcije, mehanizama degradacije i metoda kojima se oni dokazuju [5] i presudan je korak prema uspješnoj sanaciji [6].

Radi pravilne ocjene stanja građevina ključan korak je odabir metoda ispitivanja. Danas su na tržištu dostupni brojni uređaji čija primjenjivost ovisi o brojnim čimbenicima uključujući vrstu konstrukcije, stupanj degradacije, razred izloženosti, ali i informacije potrebne za ocjenu mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcije. Za prikupljanje navedenih informacija uz vizualni pregled, ključna je provedba istražnih radova koji uključuju razorna i nerazorna ispitivanja. Primjena nerazornih ispitivanja (NDT) je i dalje u našoj praksi ograničena na specifične slučajeve, iako sama primjena omogućava brojne prednosti.

Tako je na primjer napredak u razvoju NDT metoda doveo do vizualizacije rezultata te primjene proširene stvarnosti [7], što inženjerima omogućava prikaz unutrašnjosti elemenata u realnom vremenu i prostoru. U području primjene NDT metoda svakako je i dalje potrebno razviti protokole i kriterije za ocjenu ponašanja materijala i konstrukcija na temelju dobivenih rezultata.

Pri ocjenjivanju stanja armiranobetonskih građevina osnovni korak u provedbi istražnih radova je lokalizacija armature i određivanje debljine zaštitnog sloja. Posebno je to bitno kod građevina za koje nije dostupna projektna dokumentacija te je rekonstrukcija nacрта prvi korak tijekom ocjenjivanja postojećeg stanja. Danas se za ovu namjenu uobičajeno rabe uređaji koji rade na principu vrtložnih struja, tzv. tragači armature. Cijena, brzina provedbe ispitivanja i jednostavnost analize rezultata čine ovu metodu vrlo popularnom među građevinskim inženjerima. Međutim, kao i svaka NDT metoda, i ova ima određena ograničenja koja utječu na pouzdanost ostvarenih rezultata. Posebno se to ističe kod konstrukcija sa značajnom debljinom završnog sloja, bilo u obliku završne obrade žbukom ili samo zaštitnog sloja betona. Cilj je ovog rada uputiti na mogućnosti primjene georadara za istu namjenu, a sve u svrhu preciznije rekonstrukcije projektne dokumentacije. Radom su stoga obrađeni osnovni principi rada oba uređaja, te su istaknuta područja primjene, prednosti i nedostaci kroz primjere iz prakse.

2. Metode ispitivanja i primjeri iz prakse

2.1. Metode ispitivanja

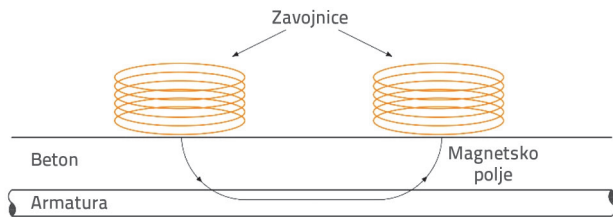
Određivanje količine i rasporeda armature, debljine zaštitnog sloja i rekonstrukcije geometrije konstrukcijskih elemenata prikazanih u radu provedeno je tragačem armature Profometer 650 AI proizvođača Proceq i georadarima StructureScan Mini XT ($f = 2,7$ GHz) proizvođača GSSI i Proceq GP 8000 ($f = 0,2 - 4$ GHz) (slika 1.). Mjerni raspon za zaštitni sloj tragačem armature je do 8 cm, a dubina je prodiranja signala georadara StructureScan Mini XT do 60 cm, te GP 8000 do 80 cm. Analiza rezultata prikupljenih georadarom provedena je uz pomoć programskog paketa GSSI Radan 7.



Slika 1. Uređaji za ispitivanje: a) profometer 650 AI, b) georadar StructureScan Mini XT, c) georadar GP 8000

2.1.1. Princip rada tragača armature

Tragač armature je uređaj namijenjen za lokalizaciju armature u betonu. Princip rada tragača armature prikazan je na slici 2. U zavojnici se inducira izmjenična struja koja generira izmjenično magnetsko polje. Prisutnost armaturnog čelika u izmjeničnom magnetskom polju rezultira pojavom vrtložnih struja, koje također formiraju magnetsko polje. To dovodi do promjene impedancije zavojnice na osnovi čega se određuju debljina zaštitnog sloja i promjer armature [8].



Slika 2. Princip rada tragača armature

Ispitivanje se provodi povlačenjem uređaja duž linije, a na taj način se mogu detektirati samo šipke koje su okomite na liniju povlačenja. Stoga, ispitivanje u najvećem broju slučajeva podrazumijeva nekoliko linijskih ispitivanja u dva pravca koji formiraju mrežu. Točnost mjerenja je ograničena u slučajevima preklapanja armature i ugrađenih mreža, sidara i drugih metala, u slučajevima prisutnosti agregata s magnetskim svojstvima u betonu te kod većih debljina zaštitnog sloja betona.

2.1.2. Princip rada georadara

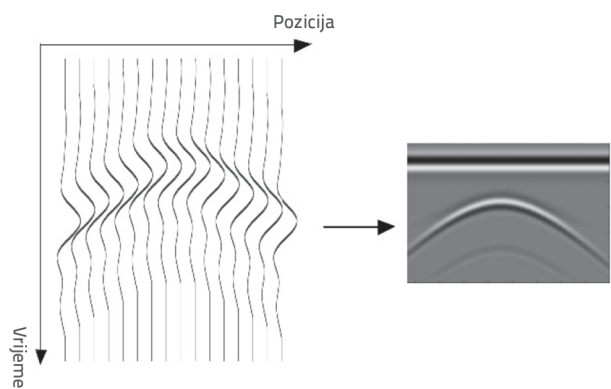
Rad georadara se temelji na emisiji elektromagnetskih valova u materijal s ciljem utvrđivanja položaja objekata koji se nalaze ispod površine. U većini slučajeva sastoji se od odašiljačke antene (odašiljač) koja emitira elektromagnetske valove, koji se zatim odbijaju kada naiđu na objekt. Reflektirani val registrira prijamna antena (prijamnik) (slika 3.a). Zapis registriranog vala se naziva i A-sken (slika 3.b). Na jednoj osi bilježi se vrijeme putovanja vala, a na drugoj snaga odziva vala.

Ispitivanje georadarom podrazumijeva skeniranje duž određene linije tijekom čega se valovi u materijal emitiraju kontinuirano, a reflektirane valove registrira prijamna antena. Dvodimenzionalnom rekonstrukcijom reflektiranih valova po



Slika 3. a) Sustav georadara, b) A-sken

dubini duž određenog pravca dobiva se radargram ili B-sken. Na horizontalnoj osi je pozicija georadara na površini ispitivanja, a na vertikalnoj osi se nalazi vrijeme putovanja vala (eng. TWT – two-way travel time) ili dubina (slika 4.). Emitirana energija je približno konusnog oblika [9] pa se valovi reflektiraju i prije nego što je uređaj pozicioniran točno iznad objekta. Valovi tada imaju nešto veće vrijeme putovanja do prijmnika, što za posljedicu daje da cilindrični objekti (npr. armaturna šipka) na radargramu imaju karakteristični oblik hiperbole ako se skeniranje izvodi okomito na njihov pravac pružanja. Radargram je najčešće crno-bijele boje gdje je intenzitet određen amplitudom reflektiranog vala. U najčešćem tipu prikaza radargrama, najveća pozitivna vrijednost amplitude odgovara područjima bijele boje, a najveća negativna vrijednost područjima crne.



Slika 4. Formiranje radargrama (desno) udruživanjem A-skenova

Objektom se smatra svaka prepreka koja ima različita dielektrična svojstva od okolnog materijala. Snaga odziva se može procijeniti izračunavanjem koeficijenta refleksije R , koji je dan sljedećim izrazom [10]:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1)$$

gdje su ϵ_{r1} i ϵ_{r2} relativne dielektrične konstante okolnog materijala i materijala objekta. To znači da će se određeni dio energije reflektirati, dok će ostatak energije prodrijeti u dublje slojeve. Relativne dielektrične konstante za materijale koji su od interesa za ocjenu stanja konstrukcija dane su u tablici 1.

Polarnost amplitude i snaga refleksije ovise o odnosu dielektričnih konstanti; što je veća razlika između ovih veličina dvaju materijala, veća je snaga refleksije. Beton i suh pijesak imaju slične dielektrične konstante, te bi refleksija između ta dva materijala bila slaba. S druge strane, cijev ispunjena vodom u betonu bi stvorila jaku pozitivnu refleksiju s obzirom na to da je dielektrična konstanta vode velika u odnosu na konstantu betona. Također,

kontakt betona sa zrakom stvara veoma vidljivu negativnu refleksiju. U slučaju metala, dielektrična konstanta nije brojčano definirana, ali se smatra da ovaj materijal reflektira cjelokupnu elektromagnetsku energiju. Metalni objekti, kao što je armatura, prepoznatljivi su po jakim hiperboličkim refleksijama pozitivnog znaka.

Tablica 1. Relativne dielektrične konstante materijala [11, 12]

Materijal	Relativna dielektrična konstanta ϵ_r [-]
Zrak	1
Čista voda	81
Suhi beton	4-10
Vlažan beton	10-20
Drvo	2-6
Suhi pijesak	2-6
Suha glina	2-6
Suha zemlja	4-10
Vlažna zemlja	10-30

Određeni dio energije signala se rasipa uslijed kretanja elektromagnetskog vala kroz materijal. Prigušivanje signala, odnosno atenuacija, ovisi o stanju materijala kroz koji se val kreće. Ako je materijal vlažan i ako se u njegovim porama nalaze soli, konduktivnost je povećana te je gubitak signala veći u odnosu na suh materijal bez prisutnosti soli. Učinkovitost ispitivanja georadarom u takvim uvjetima je upitna jer se velik udio energije gubi tijekom prolaska signala kroz materijal.

Osim opisane učinkovitosti prodiranja signala ovisno o stanju materijala kroz koji se signal rasprostire, učinkovitost ovisi i o srednjoj frekvenciji antene georadara. Ove dvije pojave su u takvoj sprezi da s povećanjem frekvencije mogućnost prodiranja signala opada, i obratno. Međutim, sa povećanjem frekvencije poboljšava se rezolucija refleksije otkrivenog područja. Frekvencijski ovisna rezolucija ima dvije komponente, vertikalnu i horizontalnu [13]. Vertikalna rezolucija određuje mogućnost prepoznavanja dva bliska objekta kao dvije odvojene pojave po dubini, a horizontalna prepoznavanje dva objekta na istoj dubini u smjeru ispitivanja georadarom. Iako se za ocjenu stanja armiranobetonskih konstrukcija koriste radari frekvencija 500 MHz – 2,5 GHz [14], karakteristike uređaja u ovom opsegu se veoma razlikuju. Približno, dimenzija objekta treba biti minimalno 10 % od valne duljine da bi bila detektirana georadarom, a razmak između dva susjedna objekta u smjeru ispitivanja georadarom treba biti jednak najmanje jednoj valnoj duljini da bi bili detektirani kao dvije odvojene pojave [15]. To znači da georadar središnje frekvencije signala 500 MHz ne bi prepoznao armaturne šipke u betonu promjera manjeg od 20 mm, niti ih odvojio kao dva objekta ako su one na razmaku manjem od 20 cm, a s druge strane, georadar frekvencije 2,5 GHz one manje od 4 mm i na razmaku manjem od 4 cm.

Prisutnost vlage smanjuje i brzinu rasprostiranja vala. Brzina rasprostiranja vala se može procijeniti na sljedeći način [16]:

$$v = \frac{c_{air}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

gdje je c_{air} brzina rasprostiranja vala u zraku (300 mm/ns). Dubina objekta (d) može se procijeniti ako su poznati brzina rasprostiranja vala i vrijeme putovanja vala od odašiljača do objekta, a zatim nazad do prijarnika (t), prema izrazu (3).

$$d = v \cdot \frac{t}{2} \quad (3)$$

Georadar mjeri vrijeme putovanja vala, što znači da je točnost procijenjene dubine objekta ovisna o procijenjenoj brzini rasprostiranja vala. Brzina rasprostiranja vala se može procijeniti na osnovi izraza (2) i vrijednosti dielektričnih konstanti (tablica 1.). Ovo ujedno predstavlja najmanje precizan postupak određivanja brzine. Drugi način se odnosi na proračun brzine pomoću izraza (3) ako je poznata dubina nekog objekta. Još jedan od načina za procjenu brzine rasprostiranja vala je postupak procjene na osnovi hiperboličkih refleksija prikazanih na radargramu.

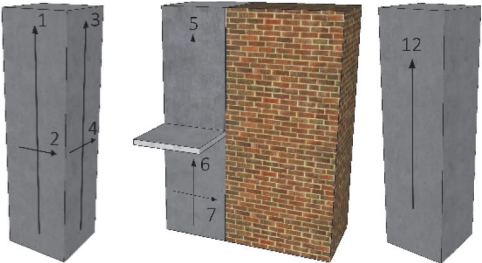
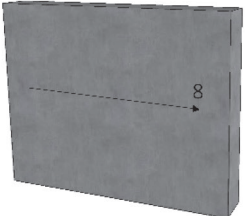
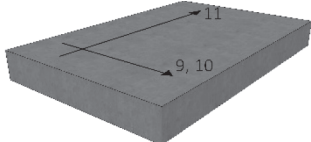
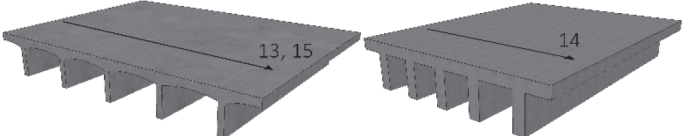
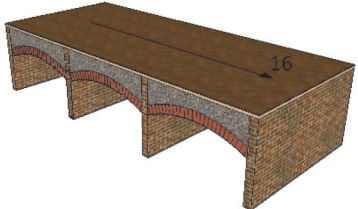
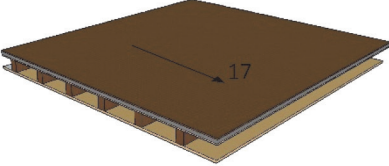
2.2. Opis primjera iz prakse

Počevši s najjednostavnijim primjerom lociranja armature armiranobetonskog stupa sve do rekonstrukcije međukatne konstrukcije potpuno nerazornom metodom, prikazano je ukupno devet primjera iz prakse ispitanih na ukupno pet konstrukcija. Cilj ispitivanja dviju konstrukcija bilo je utvrđivanje vrste i količine armature radi ocjene nosivosti kao dio projekta obnove nakon potresa koji je pogodio Hrvatsku u ožujku i prosincu 2020. godine [17-19]. Kod tih konstrukcija projektna dokumentacija postoji, pa je ispitivanjima bilo nužno potvrditi podatke iz dokumentacije, odnosno utvrditi postoje li određene neusklađenosti. Kod druge dvije konstrukcije projektna dokumentacija nije postojala, a utvrđivanje nosivosti bio je zahtjev promjene namjene i uporabe građevine. Ispitivanja zadnje konstrukcije su dio projekta obnove povijesne građevine. Svi primjeri prikazani u radu prikupljeni su na području Republike Hrvatske tijekom 2021. godine.

Uzimajući u obzir da kod ispitivanja nerazornim metodama često može doći do dvoumljenja u interpretaciji rezultata, pozicije ispitivanja su birane s pozornošću. Mjerna mjesta na konstrukcijskim elementima su odabrana tako da je pristup elementu omogućen s više strana. To je bitno u slučajevima kada je uslijed dvoznačnih rezultata potrebno provesti dodatna ispitivanja elemenata.

Oznake prikupljenih radargrama i njihovi smjerovi, kao i frekvencije antene koje odgovaraju georadaru kojima je dobiven radargram dani su tablici 2. U okviru ovog rada obrađeni su primjeri nerazornih ispitivanja na stupovima, zidu, monolitnoj armiranobetonskoj ploči, sitnorebrastim stropnim konstrukcijama, masivnoj svodnoj konstrukciji i drvenoj stropnoj konstrukciji.

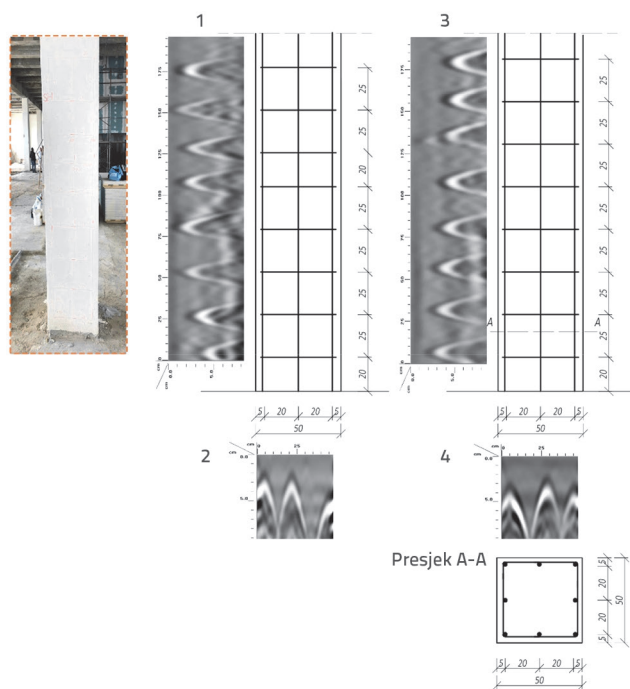
Tablica 2. Pregled i oznake prikupljenih radargrama

Element za ispitivanje	Pozicije i oznake radargrama	Frekvencija antene
Stup		2,7 GHz
Zid		2,7 GHz
Monolitna armiranobetonska ploča		2,7 GHz
Sitnorebrasta stropna konstrukcija		2,7 GHz
Masivna svodna stropna konstrukcija		0,2 – 4 GHz
Drvena stropna konstrukcija		0,2 – 4 GHz

3. Rezultati ispitivanja

3.1. Lokalizacija armature nerazornim metodama

Na slici 5. prikazan je postupak određivanja položaja armature u stupu na osnovi prikupljenih radargrama i nacрта formiranih na osnovi njih. Za utvrđivanje rasporeda spona u stupu korišteni su radargrami 1 i 3, a glavna je armatura određena na osnovi radargrama 2 i 4. Vrhovi hiperbola jednoznačno određuju položaj armaturene šipke, a razmak između vrhova predstavlja razmak između šipki. Ispitivanje je provedeno i tragačem armature, a rezultati ispitivanja su pokazivali apsolutno poklapanje s georadarom.

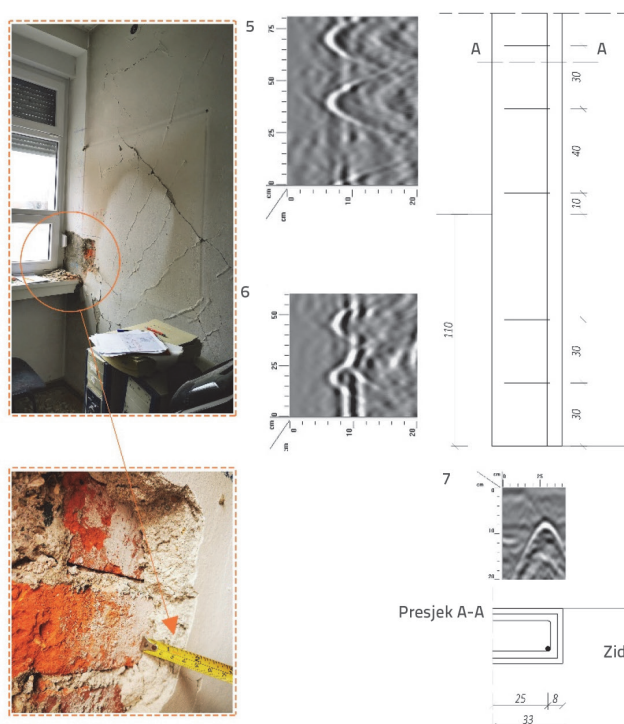


Slika 5. Određivanje rasporeda armature stupa sa sve četiri strane

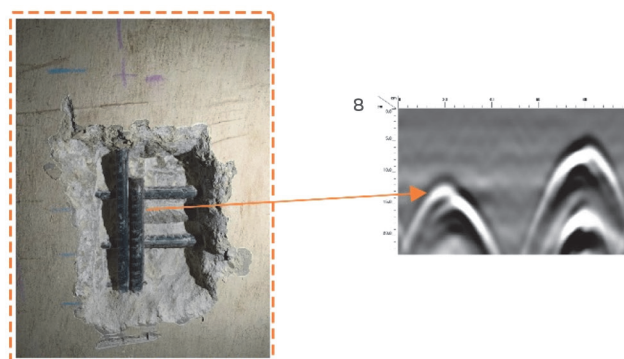
Prikazani stup predstavlja slučaj gdje je jednostavnom analizom moguće odrediti točan raspored armature; no, to nije uvijek slučaj kod stupova u tipičnim armiranobetonskim konstrukcijama. Veća debljina završnog sloja može biti ograničavajući faktor u lokalizaciji armature tragačem. Takvi primjeri često se mogu naći kod starijih građevina gdje debljina žbuke može doseći i do 5 cm. Jedan od takvih primjera prikazan je na slici 6. Prosječna udaljenost armature od ispitne površine iznosila je oko 7 cm (3,5 cm žbuke i 3,5 cm zaštitnog sloja betona) zbog čega armaturu nije bilo moguće detektirati tragačem, već je lokalizirana isključivo georadarom.

Na sljedećem primjeru prikazano je određivanje preklopa armature, što predstavlja izazov za oba uređaja. Tragač armature ne može vizualizirati ovu pojavu, eventualno je moguće, kao u ovom slučaju, posumnjati na istu na temelju procjene veličine promjera armature. Kod zida na slici 7. tragačem armature utvrđen je promjer jednak 40 mm. S druge

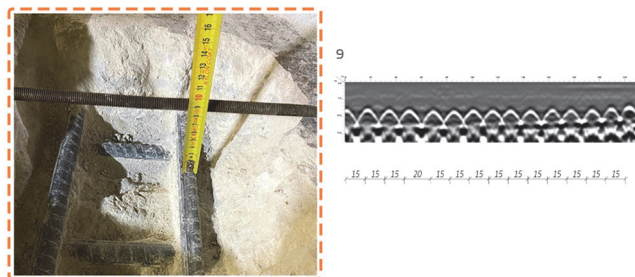
strane, rezolucija georadara uglavnom nije dovoljna da bi uređaj prepoznao preklap kao dvije odvojene šipke. Međutim, u nekim slučajevima se može prepoznati u obliku dvostrukih pomaknutih hiperbola što je bio slučaj kod ispitivanog zida, slika 7. Ova pojava nije uvijek prisutna u slučaju preklopa i ovisi o promjerima šipke i položaju šipki u preklopu. Ako je jasno vidljiva, ona može upućivati na njegovo postojanje, ali nekad može biti suptilna, te izostavljena iz razmatranja kod neiskusnih ispitivača. Zbog nestandardne veličine promjera armature, utvrđene tragačem, za tu vrstu konstrukcijskog elementa te postojanja dvostrukih pomaknutih hiperbola na radargramu na istom mjestu provedeno je razorno otvaranje površine. Otvaranjem zaštitnog sloja je utvrđeno preklapanje šipke promjera 22 mm sa šipkom promjera 25 mm.



Slika 6. Određivanje rasporeda armature stupa s jedne strane



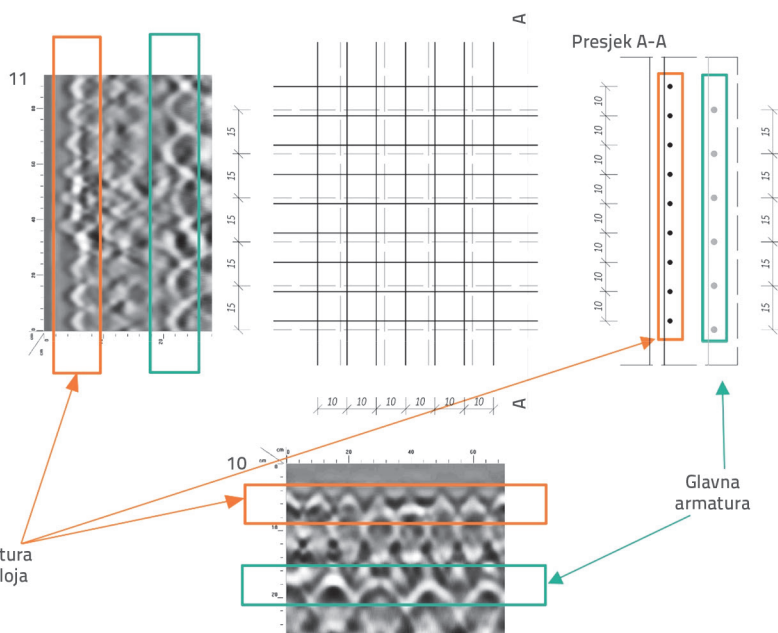
Slika 7. Otvaranje zaštitnog sloja zida radi potvrđivanja preklopa armature



Slika 8. Određivanje rasporeda armature monolitne armiranobetske ploče

Postojanje dva sloja armature također može biti ograničavajući faktor u adekvatnoj lokalizaciji armature tragačem. Na sljedećem primjeru pokazano je kako nesustavan pristup analizi može dovesti do pogrešnih zaključaka. Ispitivanjem monolitne armiranobetske ploče na jednom mjernom mjestu utvrđeno je postojanje jednog sloja armature s većom debljinom zaštitnog sloja (oko 9 cm), slika 8. Ponovo, tragač nije uspio pronaći armaturu zbog zaštitnog sloja izvan mjernog raspona, pa je ona lokalizirana radarom.

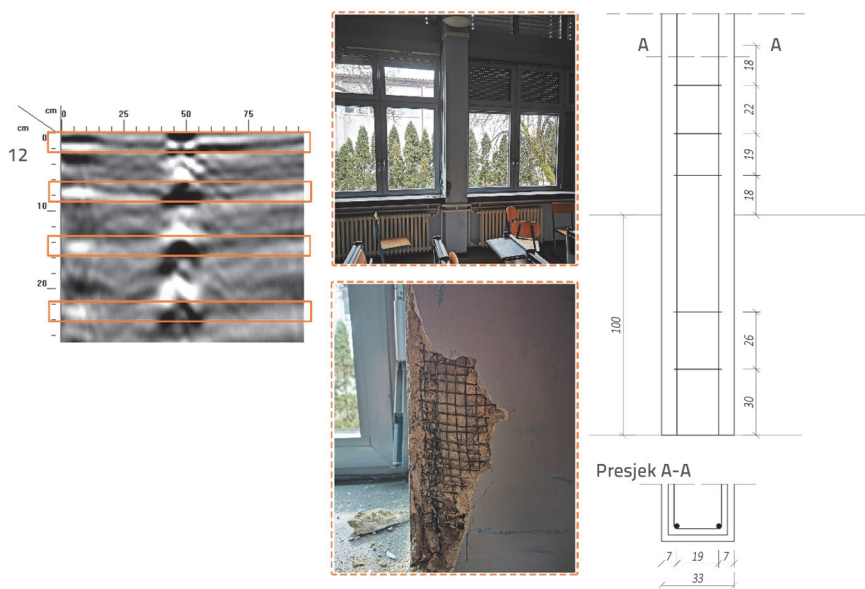
Međutim, ispitivanjem iste konstrukcije nekoliko metara dalje, radargrami prikupljeni na isti način kao u prethodnom slučaju upućuju na drugačiji raspored armature (slika 9.), a tragač armature u ovom slučaju uspijeva lokalizirati armaturu. Ali, pregledanjem radargrama zaključeno je da postoji novi red armature u odnosu na prethodno mjerno mjesto sa značajno manjom vrijednosti zaštitnog sloja ($c_{nom,sr} = 4,43 \text{ cm}$) koju zapravo registrira tragač armature. Drugi sloj armature se nalazi na još većoj dubini nego u prethodnom slučaju. Analizom radargrama zaključeno je da prvi red armature najvjerojatnije odgovara armaturi nadsloja koji je prisutan u određenim dijelovima konstrukcije i armiran je armaturom manjeg promjera i razmaka. Drugi red armature odgovara glavnoj armaturi ploče i razmak između šipki toga sloja armature poklapa se s razmakom utvrđenim u prethodnom slučaju.



Slika 9. Određivanje položaja armature nadsloja i glavne armature stropne ploče

Iz ovog primjera se vidi očigledna prednost georadara u odnosu na tragač armature. Prednost se odnosi na sam princip rada georadara koji daje mogućnost skeniranja te vizualnog pregleda "otkrivenog". Samostalna interpretacija rezultata dobivenih tragačem vjerojatno bi dovela do pogrešnih zaključaka. Prvi red armature, jedini registriran tragačem, vjerojatno bi bio okarakteriziran kao glavna armatura, te bi došlo do podcjenjivanja statičke visine ploče.

Međutim, mogući su slučajevi i kada georadar nije prikladan za lokalizaciju armature. Na slici 10. lijevo prikazan je radargram dobiven ispitivanjem stupa armiranobetske konstrukcije na kojem se ne mogu uočiti hiperboličke refleksije kao znaci prisutnosti armature. Nakon otvaranja stupa na tom mjestu uočeno je postojanje Rabićove mreže (slika 10. sredina), koja je dio završne obrade stupa. Mreža



Slika 10. Radargram 12 (lijevo), Rabićova mreža stupa (sredina) i nacrt rasporeda armature (desno)

je uočena na 1,5 cm od površine stupa. Pretpostavlja se da su gusto postavljena pletiva mreže potpuno reflektirala elektromagnetske valove i na taj način spriječila prodiranje energije do armature stupa. U tom uskom prostoru, signal ostaje "zarobljen" između površine stupa i mreže, i u kratkom vremenu može se uspostaviti nekoliko uzastopnih refleksija od te površine. Reflektirane valove uspijeva registrirati prijamna antena, a na radargramu se one mogu uočiti u obliku približno jednakih refleksija na približno jednakim razmacima po dubini. Ova pojava se naziva "ringing" [20].

Raspored armature u ovom slučaju utvrđen je tragačem armature. Unatoč postojanju Rabicove mreže, veći promjer glavne armature stupa omogućio je utvrđivanje rasporeda armature bez otvaranja zaštitnog sloja.

3.2. Određivanje debljine zaštitnog sloja nerazornim metodama

U ovom poglavlju prikazana je usporedba rezultata određivanja debljine zaštitnog sloja dobivenih tragačem armature i georadarom.

Kod tragača armature nije potrebno postavljati početne parametre, dok kod georadara rezultati prije svega ovise o postavljenoj vrijednosti dielektrične konstante. Za sva četiri slučaja prikazana u tablici 3., dielektrična konstanta je određena na osnovi poznate dubine objekta. Prvobitno je izvršeno ispitivanje georadarom i tragačem, a nakon toga je konstrukcija otvorena na tom mjestu te je izmjerena stvarna debljina zaštitnog sloja armature. Dielektrične konstante su zatim određene na osnovi izraza (2) i (3). Procijenjene vrijednosti dielektričnih konstanti su sljedeće, stup: $\epsilon_r = 6,7$, zid: $\epsilon_r = 6,5$, ploča: $\epsilon_r = 7,5$. Ovako određena dielektrična konstanta predstavlja vrijednost koja je lokalna i svojstvena za ispitani dio konstrukcije. Razmatrajući tipove konstrukcije i izloženost njihovih pojedinih dijelova okolišu, usvojene su konstantne vrijednosti dielektričnih konstanti za cijelu konstrukciju.

Prvi slučaj na kojem je provedena usporedba rezultata jest armiranobetonski stup (primjer 1). Usporedba pokazuje veliku podudarnost rezultata dvaju uređaja. Razlika u prosječnoj debljini zaštitnog sloja je samo 2,5 mm. Takvi rezultati su očekivani; naime, debljine zaštitnog sloja su u sigurnom mjernom opsegu oba uređaja (15 – 48 mm), razmak između šipki armature je 20 – 25 cm za spone te 20 cm za glavnu armaturu, i ne postoje drugi metalni objekti u blizini. Ovakvi uvjeti su idealni za oba uređaja što znači da rezultati ispitivanja mogu biti jednoznačno interpretirani.

Specifikacije tragača armature upućuju na to da je mjerni opseg debljine zaštitnog sloja do 8 cm. Zbog toga je ispitan zid (primjer 2) kod kojeg su na mjernom mjestu prethodno poznate sve debljine zaštitnog sloja i u rasponu su od 64 do 86 mm. Varijacije u mjerenju tragačem armature već su uočljive za debljine zaštitnih slojeva 64 do 69 mm gdje

odstupanja idu i do 10 mm. Ovo postaje još uočljivije za veće debljine zaštitnog sloja kod kojih odstupanja idu do 20 mm. Georadar istovremeno pokazuje stabilnosti rezultata koje ne odstupaju od stvarnih debljina zaštitnih slojeva.

Zadnji primjer je obrađen za slučaj monolitne armiranobetonske ploče prikazane u prethodnom poglavlju (primjeri 3 i 4). Kao što je napomenuto, tragač armature je detektirao jedan sloj armature za koji se pretpostavlja da je nadstoj u ploči. Razlika u mjerenjima dva uređaja je značajnija u odnosu na prethodni slučaj. Debljine zaštitnog sloja mjerene tragačem armature su veće nego podatci koje daje georadar. Pretpostavlja se da je u ovom slučaju drugi sloj armature (glavna armatura) utjecao na rezultate tragača armature te da su neke od prikazanih vrijednosti veće od stvarnog zaštitnog sloja jer tragač armature daje debljine koje su između debljine zaštitnog sloja armature nadstoj i glavne armature. Sve to je prouzročilo i veću standardnu devijaciju ($\pm 20,8$ mm). S druge strane, georadar daje prilično konzistentne podatke. To se primjećuje i u slučaju glavne armature ploče gdje je prosječna debljina zaštitnog sloja velika, 156,5 mm (primjer 4). Uzimajući u obzir da je armatura na velikoj dubini, te da signal nije tako jasan kao u slučaju plićih slojeva armature, debljine zaštitnog sloja su uniformne.

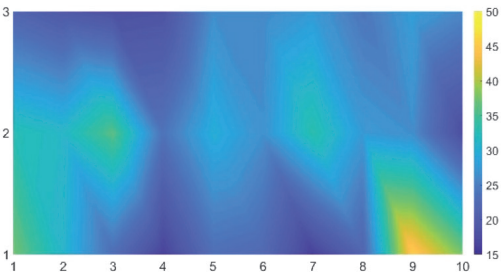
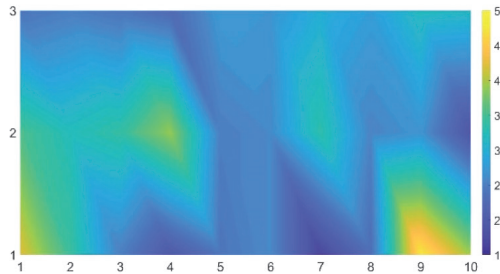
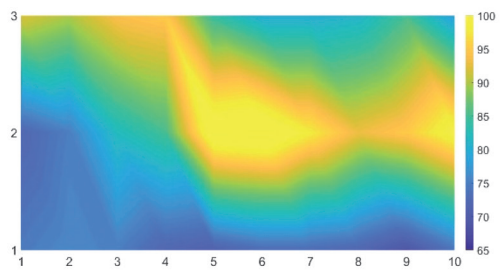
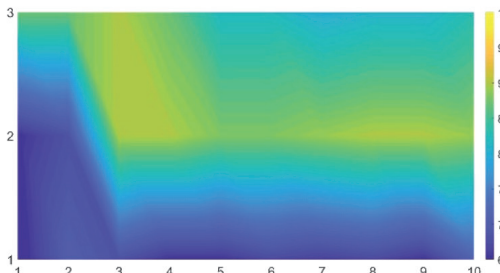
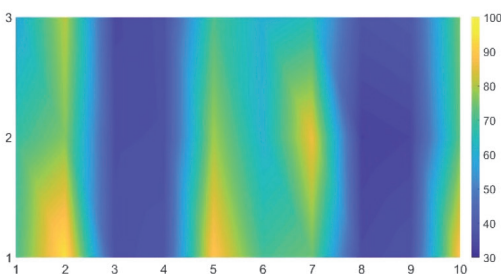
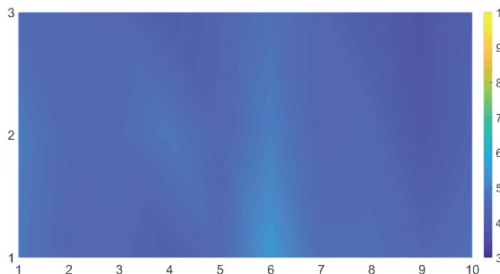
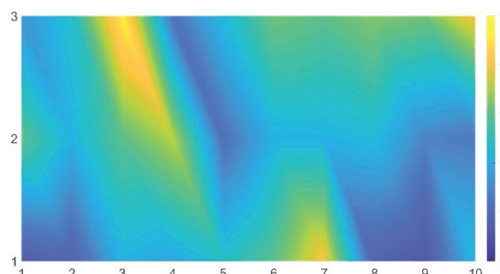
3.3. Dodatne mogućnosti georadara

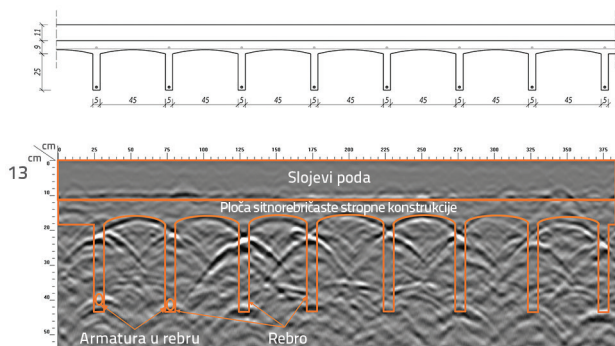
Neminovna prednost georadara u odnosu na tragač armature jest to što ovaj uređaj omogućava procjenu geometrije ispitane konstrukcije na osnovi radargrama. U ovom poglavlju opisan je pristup u analizi radargrama dobivenih ispitivanjem stropnih konstrukcija. Cilj takvih ispitivanja je procijeniti geometriju konstrukcijskih elemenata te utvrditi njihove međusobne položaje. Dodatno, moguće je utvrditi prisutnost i dimenzije drugih elemenata konstrukcija, kao što su slojevi podova, te lokalizirati šupljine i slične defekte. Analiza se zasniva na promatranju oblika refleksija i polarosti amplitude reflektiranih valova.

Prikazana su četiri tipa stropnih konstrukcija: sitnorebrasta stropna konstrukcija s lučnim betonskim svodom, sitnorebrasta stropna konstrukcija, masivna stropna konstrukcija i drvena stropna konstrukcija.

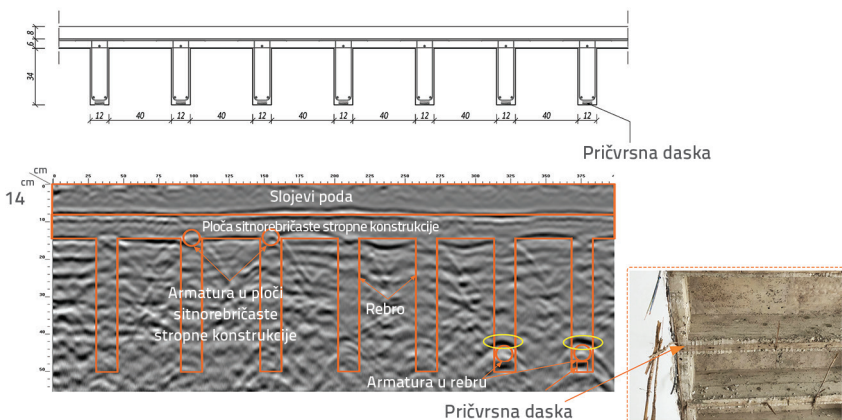
Prva linijska refleksija na radargramima stropnih konstrukcija uglavnom odgovara završetku slojeva poda i početku ploče. Kod ovakvih tipova elemenata gdje je prisutno više različitih tipova materijala, treba biti obazriv u analizi dimenzija po dubini. Preciznija analiza dubina zahtijeva odabir posebnih dielektričnih konstanti za svaki materijal ako postoji značajna razlika između njih. Za sitnorebraste međustropne konstrukcije karakteristične su ponovljive negativne refleksije (beton-zrak) koje odgovaraju donjim rubovima ploče, a njihov osni razmak odgovara razmaku između rebara. Na slikama 11. i 12. prikazani su primjeri sitnorebrastih konstrukcija sa svodnim i ravnim donjim rubom ploče.

Tablica 3. Usporedba rezultata tragača armature i georadara u određivanju debljine zaštitnog sloja

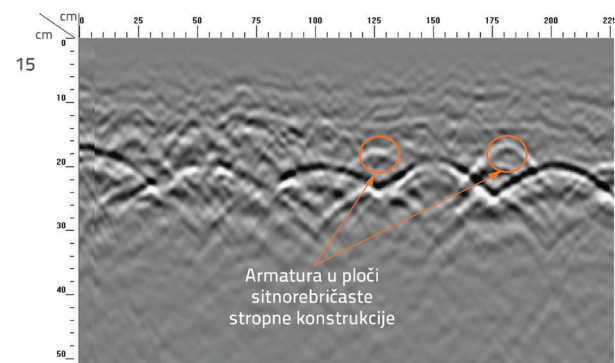
	Tragač armature	Georadar
PRIMJER 1 Stup		
	Rezultat mjerenja s pouzdanošću 99 % (mm)	
	$26,4 \pm 3,9$	$28,9 \pm 3,9$
PRIMJER 2 Zid		
	Rezultat mjerenja s pouzdanošću 99 % (mm)	
	$83,4 \pm 6$	$78,5 \pm 5,7$
PRIMJER 3 Monolitna armiranobetonska ploča (armatura nadstolja)		
	Rezultat mjerenja s pouzdanošću 99 % (mm)	
	$59 \pm 11,7$	$44,3 \pm 1,8$
PRIMJER 4 Monolitna armiranobetonska ploča (glavna armatura)	nije primjenjivo (debljina zaštitnog sloja veća od mjernog raspona uređaja)	
	Rezultat mjerenja s pouzdanošću 99 % (mm)	
	-	$156,5 \pm 3$



Slika 11. Rekonstrukcija sitnorebraste stropne konstrukcije georadarom na osnovi radargrama 13



Slika 12. Rekonstrukcija sitnorebraste stropne konstrukcije georadarom na osnovi radargrama 14



Slika 13. Utvrđivanje prisutnosti armature u ploči sitnorebraste stropne konstrukcije

Kod ispitivanja ovakvih tipova elemenata zbog velikog broja gustih refleksija veoma često prisutnost i položaj određenih objekata nije jednoznačno određen. Primjerice, kod prethodnog slučaja sa svodnim rubom ploče reflektirani valovi donjeg ruba ploče otežali su određivanje položaja armature u ploči. U ovakvim slučajevima, kao što je već napomenuto, provodi se ispitivanje istog tipa radargrama na više mjernih pozicija radi donošenja pouzdanijih zaključaka. Jedan od njih prikazan je na slici 13. gdje

hiperbolički znaci iznad mjesta koja odgovaraju pozicijama rebra potvrđuju prisutnost armature u ploči.

Slično, ispitivanjem paralelno s pravcem pružanja rebara s gornje strane stropne konstrukcije, utvrđeno je postojanje razdjelne armature u ploči ali s razmakom koji je različit u odnosu na projektnu dokumentaciju. Proširena ispitivanja u ovom slučaju su zahtijevala ispitivanje ploče sa donje strane i ispitivanje rebra na osnovi čega su doneseni zaključci o položaju i rasporedu armature.

Negativne refleksije nepravilnog oblika na radargramima mogu upozoravati na prisutnost šupljina, nepravilnosti, segregacije i sl. Jedna takva pojava označena je žutom bojom na slici 12. gdje su vidljive crne refleksije iznad armature u rebru. U tom slučaju se pretpostavlja da one odgovaraju značajnoj segregaciji na

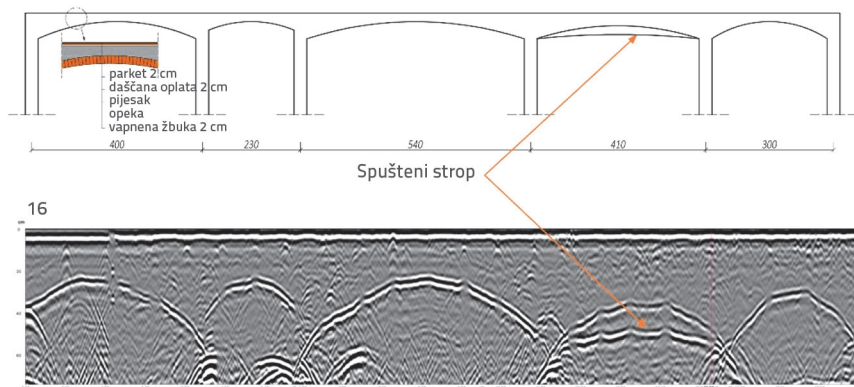
mjestima gdje se pričvrsna daska vezuje za ostatak konstrukcije. Kako god, dubina objekata o kojima je ovdje riječ je oko 45 cm, i u ovakvim slučajevima analiza rezultata postaje otežana. Na ovim dubinama dolazi do značajnijega gubitka signala i pojava šumova može prevladati nad refleksijama o objekte. U ovim slučajevima, dodatna obrada signala može djelomično doprinijeti kvalitetnijoj analizi.

U sljedećem slučaju ploča prizemlja je masivna svodna stropna konstrukcija kod koje se svodovi nalaze između zidova podruma. Ploča prvog kata je drvena stropna konstrukcija s drvenim grednicama u jednom smjeru. Na osnovi

radargrama prikupljenog okomito na smjer pružanja svodova izvršena je procjena raspona svodova te njihove visine i debljine, slika 14. Pretpostavlja se da debljine slojeva stropne konstrukcije odgovaraju stropovima zidanih zgrada koje su građene u vrijeme gradnje razmatrane građevine, a prema knjizi [21]. Na radargramu se mogu uočiti negativne refleksije koje odgovaraju reflektiranim valovima od donjeg ruba svoda. Pretpostavlja se da su dielektrične konstante pijeska i opeke slične, te da se prema izrazu (1) većinski dio energije propusti na prelasku jednog materijala u drugi. Zbog toga, refleksija na tom mjestu nije uočljiva na radargramu, već samo donja koja odgovara zajedničkoj refleksiji između opeke, žbuke i zraka.

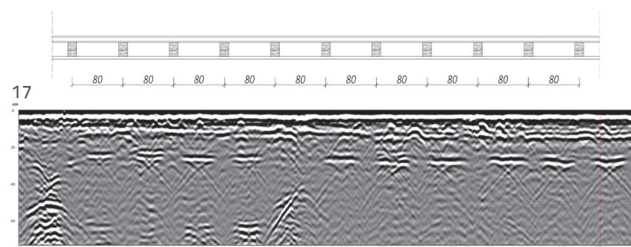
Osim procjene raspona i visine svodova, moguće je utvrditi i postojanje spuštenih stropova te procijeniti njihovu visinu. Prva refleksija koja odgovara donjemu rubu svoda (opeka, žbuka – zrak) negativnog je znaka. Međutim, sljedeća refleksija koja odgovara gornjemu rubu spuštenog stropa (zrak – spuštenu strop) pozitivnog je znaka. Pretpostavlja se da rezolucija nije dovoljna da bi identificirala debljinu spuštenog stropa, te se registrira samo prva reflektirana amplituda (zrak – spuštenu strop).

Kod ispitivanja drvene stropne konstrukcije, velik broj reflektiranih valova u gornjoj zoni (slojevi poda, gornji rub ploče)



Slika 14. Procjena raspona, visine svodova postojanja spuštenog stropa georadarom

nije dao mogućnost jasnom formiranju geometrije grednika. Zbog toga su razmaci grednika drvene stropne konstrukcije određeni indirektnim putem na osnovi osnih razmaka refleksija od donjeg ruba. Treba napomenuti da se ispitivanje drvenih konstrukcija kod kojih je dielektrična konstanta materijala blizu konstante zraka ($\epsilon_r \approx 2$) može pospješiti vlaženjem drva kako bi se povećale razlike dielektričnih konstanti materijala, a time i jačine refleksija između drva i zraka.



Slika 15. Utvrđivanje razmaka između drvenih grednika

4. Rasprava

Na osnovi rezultata predstavljenih u ovom radu doneseni su zaključci o prednostima i nedostacima analiziranih nerazornih metoda (tablica 4.).

Oba uređaja su najprikladnija za lokalizaciju longitudinalne armature u pločama te spona u gredama/stupovima. Maksimalna dubina mjerenja georadarom višestruko je veća u odnosu na tragač armature, pa georadar za razliku od tragača može lokalizirati armaturu sa zaštitnim slojem većim od 8 cm. Osim toga, razlika je i u tome što je georadarom moguće utvrditi položaj više slojeva armature u presjeku. Tragač armature dva bliska sloja bilježi kao jedan, bez mogućnosti razdvajanja signala što se često manifestira kao problem kod tankostijenih armiranobetonskih elemenata ($d < 15$ cm). Ipak, prisutnost guste armature mreže u površinskom sloju, poput Rabicove mreže, može u potpunosti onemogućiti prodor elektromagnetskog vala georadara dublje po presjeku. U tom slučaju, metalni objekti blizu površine predstavljaju barijeru prolasku elektromagnetske energije, te armatura postaje nevidljiva za georadar. U slučaju

da postoji zahtjev za lokalizacijom armature u području ležaja i spojeva, gdje je armatura najgušća, treba biti vrlo oprezan u interpretaciji rezultata.

Debljina zaštitnog sloja armature ima značajan utjecaj na točnost rezultata mjerenja, a u vezi je s minimalnim promjerom armature. Točnost mjerenja znatno se smanjuje s porastom debljine zaštitnog sloja, ali i prisutnošću drugih magnetnih materijala u blizini [22]. Procjena veličine promjera armature primjenom tragača armature, s vjerojatnošću pogreške manjom od 10 %, moguća je kod debljina zaštitnog sloja <

4 cm [22]. Kod modernih građevina kakve gradimo danas, gdje je debljina zaštitnog sloja usklađena s EC2, vjerojatnost pogreške značajno raste, čak do 100 % za $c > 7$ cm.

Na tržištu zasad ne postoje georadari s mogućnošću procjene veličine promjera. Ipak, dostupna su istraživanja koja obrađuju različite algoritme za procjenu veličine promjera. Primjerice, promjer armature prvog reda može se približno procijeniti na osnovi razlike dubine armature u dva smjera izmjerene georadarom. Opisano predstavlja veoma jednostavan i brz postupak, ali koji daje približne informacije i to samo za prvi red armature. S druge strane, napredna analiza radargrama može pružiti točnije utvrđivanje promjera. U literaturi su predstavljeni algoritmi koji se uglavnom zasnivaju na određivanju parametara hiperboličkih refleksija na osnovi kojih se može dobiti promjer armature [23–25]. Općenito, točnost određivanja promjera je veoma osjetljiva na prisutnost šumova i drugih čimbenika koji utječu na jasnoću hiperbola [23]. Osim toga, svaki od algoritama zahtijeva naprednu analizu signala, pa je to glavni razlog zašto oni i dalje nisu zaživjeli u praksi. Preklap armature nije moguće pouzdano utvrditi ni s jednom od razmatranih metoda jer se zasnivaju na razmatranju indirektnih pojava koje uređaji ne mjere izvorno.

Kod konstrukcija s jednim slojem armature gdje su debljine zaštitnog sloja do 6 cm, a razmaci armature veći od 10 cm, i tragač armature i georadar su pogodne metode za određivanje debljine zaštitnog sloja. U području zaštitnih slojeva 60 – 80 mm točnost mjerenja tragačem opada, a za vrijednosti preko toga mjerenje nije ni moguće. Kod konstrukcija s dva sloja armature, georadarom je moguće odrediti zaštitne slojeve betona za oba sloja armature, a kod tragača armature samo za prvi sloj i to s velikom nepouzdanošću. Bitno je napomenuti da su razmatrane točnosti određivanja debljine zaštitnog sloja primjenjive za slučajeve kad je dielektrična konstanta pravilno određena. U ovom radu, dielektrična konstanta je određena lokalno i usvojena kao konstantna za cijelu konstrukciju. Međutim, u slučaju kad su dijelovi konstrukcije izloženi različitim okolišnim uvjetima, ovakav postupak ne bi bio dovoljno točan. Naime, moguće je da određeni dijelovi budu izloženi povećanom prodoru klorida ili vlage, koji bi izazvali promjene u dielektričnim

Tablica 4. Primjena tragača armature i *ground-coupled* georadara ($f > 2\text{GHz}$)

Tražena informacija	Opis situacije	Tragač armature	Georadar
Lokalizacija armature	Lokalizacija prvog reda armature sa zaštitnim slojem <8 cm	■	■
	Lokalizacija prvog reda armature sa zaštitnim slojem >8 cm	■	■
	Lokalizacija drugog reda armature	■	■
	Lokalizacija armature u prisutnosti Rabičove mreže	■	■
	Procjena veličine promjera	■	■
	Preklop armature	■	■
Određivanje debljine zaštitnog sloja betona	Debljine zaštitnih slojeva do 6 cm prvog reda armature	■	■
	Debljine zaštitnih slojeva 6 - 8 cm prvog reda armature	■	■
	Debljine zaštitnih slojeva preko 8 cm prvog reda armature	■	■
	Debljine zaštitnih slojeva prvog reda kod konstrukcija sa dva reda armature	■	■
	Debljine zaštitnih slojeva drugog reda armature	■	■
Ostalo	Geometrija konstrukcijskih elemenata	■	■
	Vjerojatnost pojave korozije	■	■
	Šupljine, delaminacije, cijevi, kabeli za prednapinjanje i sl.	■	■

Legenda:
 ■ Moguće
 ■ Moguće, ali rezultati su nepouzdana ili zahtjevaju napredniju analizu
 ■ Nije moguće

svojstvima materijala, a time i promjene u konstanti. Ako je to slučaj, dielektrične konstante moraju biti lokalno određene, a kalibraciju je potrebno izvesti za svaki dio konstrukcije zasebno. Ovim radom nisu obuhvaćene sve mogućnosti georadara. Osim lokalizacije armature i određivanja debljine zaštitnog sloja, obradom signala georadara moguće je doći i do informacija o geometriji strukturnih elemenata [26], stanju korodiranosti armature [27] te locirati šupljine, delaminacije, kabele za prednapinjanje i cijevi [28]. Određivanje geometrije konstrukcijskih elemenata bazira se na promatranju oblika refleksije o objekte i njihovoj polarnosti. Ponovo, dielektrična konstanta i u ovom slučaju ima važnu ulogu u određivanju točnih pozicija otkrivenih objekata. Ovakva analiza može biti veoma značajna kod stropnih konstrukcija. Uzimajući u obzir debljine završnih slojeva, te debljine konstrukcijskih elemenata, dubina objekata od interesa je veoma često na gornjoj granici dubine prodiranja signala (oko 60 cm). Zbog gubitka energije tijekom prolaska kroz materijale, energija koju valovi vraćaju nakon refleksije od veoma dubokih objekata najčešće je mala. Naknadnim pojačanjem signala moguće je nadoknaditi pad amplitude, ali to najčešće izaziva i pojavu šumova, pa interpretacija rezultata postaje otežana. Kako god, treba biti veoma oprezan s rezultatima koji ne omogućavaju jednoznačno određivanje položaja i oblika objekata. Preporučeno je da se ovakvi slučajevi nesklada potvrde ispitivanjem drugim metodama ili otvaranjem konstrukcije. Ocjena korozije se uglavnom zasniva na promatranju promjene

amplitude reflektiranog vala kod korodirane šipke [29] te na promjeni spektra frekvencije vala [30]. Uzročnici korozije, vlaga i kloridi, te njene posljedice, hrđa i pukotine, izazivaju atenuaciju signala, pa se analiza korozije svodi na pronalazak područja gdje je došlo do značajnijeg gubitka elektromagnetske energije. Kako bi se došlo do zaključka da postoji atenuacija, nužno je imati podatak o amplitudi za zdrav beton i nekorođiranu šipku [31], ili atenuaciju detektirati na osnovi promjene signala uzastopnih mjerenja tijekom određenog perioda [32]. Kod ovakve vrste analize treba biti posebno obazriv s primjenom obrade signala kako bi se sačuvala originalnost reflektiranog vala s obzirom na to da je njegova snaga polazna točka u analizi. U slučajevima lokalizacije većih oštećenja manifestiranih u obliku većih pukotina, delaminacija, slabljenja presjeka, georadar također nalazi primjenu.

5. Zaključak

U ovom radu su prikazane prednosti i nedostaci tragača armature i georadara u određivanju lokacije armature i debljine zaštitnog sloja, te je prikazana njihova međusobna usporedba na devet primjera iz prakse. Dodatno, prikazana je primjena georadara u rekonstrukciji geometrije stropnih konstrukcija na potpuno nerazoran način. Primjena tih dviju metode je od iznimne važnosti onda kad ne postoji projektna dokumentacija tijekom ocjenjivanja stanja postojećih građevina.

Zaključeno je da u određenim slučajevima, poput velikih debljina zaštitnih slojeva, te postojanja dva reda armature, može doći do poteškoća prilikom mjerenja tragačem armature. Poteškoće se prije svega očituju kroz nemogućnost detektiranja armature do dobivanja nepouzdanih vrijednosti koje predstavljaju vrijednost koja je između debljina zaštitnog sloja dva reda. Ovakve pogrešne interpretacije mogu dovesti do podcjenjivanja nosivosti. U takvim se slučajevima georadar pokazao kao primjereniji i pouzdaniji uređaj.

Osim toga, kako je prikazano u radu, utvrđene su dodatne prednosti georadara koji osim lokalizacije armature istovremeno bilježi prisutnost i drugih promjena u presjeku armiranobetonskog elementa. Istim ispitivanjem moguće je utvrditi geometriju elemenata, prisutnost kabela za prednapinjanje, cijevi, segregacije, odlamanja, zračnih ili vodenih "džepova" i sl. Dodatno, georadarom je moguće provoditi

ispitivanja bez uklanjanja zaštitnih slojeva na betonu čak i ako postoje asfalt, žbuka ili drugi oblici završnih slojeva. Međutim, takve primjene zahtijevaju nešto napredniju analizu signala i poznavanje osnovnih principa elektromagnetske teorije. Analiza postaje još kompleksnija u slučaju kompliciranih geometrija s puno detalja koje izazivaju često reflektiranje valova. Tada se preporučuje potvrđivanje svih nesigurnosti dodatnim ispitivanjima, razornim ili nerazornim metodama.

Zahvala

Ovo istraživanje dio je znanstvenog projekta "Autonomni sustav za pregled i predviđanje integriteta prometne infrastrukture (ASAP)" financiran od strane Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj u sklopu poziva Ulaganje u znanost i inovacije – prvi poziv KK.01.1.1.04.

LITERATURA

- [1] Hrvatski sabor, Zakon o gradnji, NN 153/2013, Narodne novine, Zagreb, Hrvatska, 2017.
- [2] Mehta, B.Y.P.K., Burrows, R.W.: Building Durable Structures in the 21st Century, Concrete International, 23 (2001), pp. 57-63.
- [3] Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja, Tehnički propis za građevinske konstrukcije, NN 17/2017, Zagreb, Hrvatska, 2017.
- [4] Cusson, D.: Durability of repaired concrete structures, Failure, Distress and Repair of Concrete Structures, ed. N. Delatte, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, New Delhi, India, pp. 296-321, 2009.
- [5] Lounis, Z.: Aging highway bridges, Canadian Consulting Engineer, 48 (2007) 1, pp. 30-34.
- [6] Lukovic, M.: Influence of interface and strain hardening cementitious composite (SHCC) properties on the performance of concrete repairs, TU Delft, Delft, Netherlands, 2016.
- [7] Ohtsu, M.: Introduction, Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures, ed. M. Ohtsu, Springer, Dordrecht, Germany, pp. 1-4, 2016.
- [8] Raupach, M., Büttner, T.: Concrete Repair to EN 1504: Diagnosis, Design, Principles and Practice, CRC Press, London, 2014.
- [9] Wang, Z.W., Zhou, M., Slabaugh, G.G., Zhai, J., Fang, T.: Automatic detection of bridge deck condition from ground penetrating radar images, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 8 (2011) 3, pp. 633-640, <https://doi.org/10.1109/TASE.2010.2092428>.
- [10] Clem, D.J., Schumacher, T., Deshon, J.P.: A consistent approach for processing and interpretation of data from concrete bridge members collected with a hand-held GPR device, Construction and Building Materials, 86 (2015), pp. 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.105>.
- [11] Daniels, D.J.: Ground Penetrating Radar 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, London, 2008.
- [12] Torgovnikov, G.I.: Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer-Verlag, New York, 1993.
- [13] Annan, A.P.: Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar, Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, ed. M.H. Jol, Elsevier B.V, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1-40, 2009.
- [14] Tosti, F., Ferrante, C.: Using Ground Penetrating Radar Methods to Investigate Reinforced Concrete Structures, Surveys in Geophysics, 41 (2020) 3, pp. 485-530, <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09565-5>.
- [15] Utsi, E.C.: Ground penetrating radar: Theory and practice, Elsevier Ltd., Oxford, United Kingdom, 2017.
- [16] ACI 228.2R-98 – Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete Structures, Concrete Repair Manual, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 1999.
- [17] Šavor Novak, M., Uroš, M., Atalić, J., Herak, M., Demšić, M., Baniček, M., Lazarević, D., Bijelić, N., Crnogorac, M., Todorčić, M.: Zagreb earthquake of 22 March 2020 – preliminary report on seismologic aspects and damage to buildings, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 10, pp. 843-867, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2966.2020>
- [18] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Sigmund, Z., Baniček, M., Demšić, M., Hak, S.: Post-earthquake damage assessment of buildings – procedure for conducting building inspections, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 12, pp. 1089-1115, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2969.2020>
- [19] Pojatina, J., Barić, D., Anđić, D., Bjegović, D.: Structural renovation of residential building in Zagreb after the 22 March 2020 earthquake, GRAĐEVINAR, 73 (2021) 6, pp. 633-648, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3195.2021>
- [20] Solla, M., Lorenzo, H., Pérez-Gracia, V.: Ground penetrating radar: Fundamentals, methodologies and applications in structures and infrastructure, Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure, eds. B. Riviero, M. Solla, CRC Press Taylor & Francis Group, New York and London, pp. 89-111, 2016.
- [21] Peulić, Đ.: Konstrukcijski elementi zgrada, Croatia knjiga, Zagreb, 2002.
- [22] Drobiec, Ł., Jasiński, R., Mazur, W.: Accuracy of eddy-current and radar methods used in reinforcement detection, Materials (Basel), 12 (2019) 7, <https://doi.org/10.3390/ma12071168>.

- [23] Xiang, Z., Ou, G., Rashidi, A.: Integrated Approach to Simultaneously Determine 3D Location and Size of Rebar in GPR Data, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34 (2020) 5, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001502](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001502).
- [24] Chang, C.W., Lin, C.H., Lien, H.S.: Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 2, pp. 1057–1063, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.018>.
- [25] Mechbal, Z., Khamlichi, A.: Determination of concrete rebars characteristics by enhanced post-processing of GPR scan raw data, *NDT and E International*, 89 (2017), pp. 30–39, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.03.005>.
- [26] Pérez-Gracia, V., Caselles, O., Clapés, J., Osorio, R., Canas, J.A., Pujades, L.G.: Radar exploration applied to historical buildings: A case study of the Marques de Llió palace, in Barcelona (Spain), *Engineering Failure Analysis*, 16 (2009) 4, pp. 1039–1050, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.05.007>.
- [27] Tešić, K., Baričević, A., Serdar, M.: Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced Concrete Using Ground Penetrating Radar: A Review, *Materials (Basel)*, 14 (2021) 4, <https://doi.org/10.3390/ma14040975>.
- [28] Dinh, K., Gucunski, N.: Factors affecting the detectability of concrete delamination in GPR images, *Construction and Building Materials*, 274 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121837>.
- [29] Wong, P.T.W., Lai, W.W.L., Sham, J.F.C., Poon, C.S.: Hybrid non-destructive evaluation methods for characterizing chloride-induced corrosion in concrete, *NDT and E International*, 107 (2019) January, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.05.008>.
- [30] Lai, W.L., Kind, T., Stoppel, M., Wiggerhauser, H.: Measurement of Accelerated Steel Corrosion in Concrete Using Ground-Penetrating Radar and a Modified Half-Cell Potential Method, *Journal of Infrastructure Systems*, 17 (2013) December, pp. 395–408, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS).
- [31] Diamanti, N., Annan, A.P., Redman, J.D.: Concrete Bridge Deck Deterioration Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR), *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 22 (2017) 2, pp. 121–132, <https://doi.org/10.2113/JEEG22.2.121>.
- [32] Dinh, K., Zayed, T., Romero, F., Tarussov, A.: Method for analyzing time-series GPR data of concrete bridge decks, *Journal of Bridge Engineering*, 20 (2015) 6, pp. 1–8, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.000067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.000067).

VAŠ PARTNER U SANACIJI

LAGANI KONSTRUKTIVNI BETON

idealno je rješenje za razne vrste sanacija. Kako bi se smanjilo opterećenje na konstrukciju, uz pravilno projektiranje njegovog sastava, težina betona može se reducirati preko 30 % (beton razreda gustoće D1,6) uz istovremeno osiguranje dovoljne tlačne čvrstoće (razred čvrstoće laganog betona LC30/33).



cemex.hr
hr.info@cemex.com

