

Istražna sonda u antičkom kamenolomu kod Škripa

Tihomir Rukavina
Zagreb

GPR – GROUND PENETRATION RADAR U PROSPEKCIJI LEŽIŠTA ARHITEKTONSKOG KAMENA

UDK: 552.08:53

*Rukopis primljen za tisak 06.12.2010.
Klesarstvo i graditeljstvo, Pučišća, 2010. br.3-4
Pregledni rad
Survey article*

Prikazuju se osnove geofizičke metode GPR (Ground Penetrating Radar) i neke specifičnosti pri prospekciji ležišta arhitektonskog kamena. Uređajem je moguće uočiti diskontinuitete i neke druge geološke i geotehničke karakteristike ležišta koji bitno pridonose ekonomskim parametrima eksploatacije. Bitna odlika metode GPR-a je direktno detektiranje položaja i smjera pružanja diskontinuiteta, zona anizotropne ili erodirane građe stijenske mase kao i prisustvo kaverni i drugih krških fenomena.

Ključne riječi: GPR (Ground Penetrating Radar), dubina penetracije, rezolucija, detekcija geoloških podzemnih struktura, prospekcija ležišta kamena

Uvod

Ground Penetration Radar (u nastavku teksta **GPR**) geofizička je metoda brzog i jednostavnog dijagnosticiranja geoloških i geotehničkih parametara tla i stijenske mase te eksploatacijskih parametara ležišta, rudnika i površinskih kopova.

Iako je metoda GPR slabo zastupljena u recentnoj hrvatskoj inženjerskoj praksi, u geološkim i geotehničkim aplikacijama egzistira još od početka 20. stoljeća, kada se u Austriji i Njemačkoj tom metodom utvrđivala prisutnost ukopanih metalnih objekata (Hulsmeyer; 1904.) debljine naslaga u površinskim kopovima, debljine aluvija u alpskim

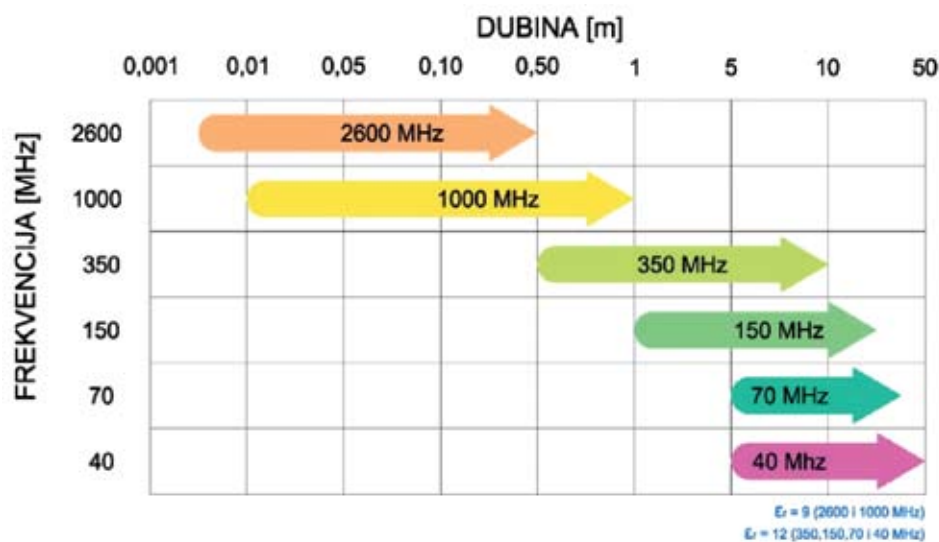
dolinama te debljine snijega i leda (Leinbach and Lowy / Hulsbeck; 1926.).

Nakon stagnacije razvoja u periodu između dva svjetska rata, određen napredak dogodio se za vrijeme Korejskog i Vijetnamskog rata, kada je vojska SAD-a razvijala takve uređaje za detekciju podzemne infrastrukture i minskih sredstava, kao i tijekom razvoja tehnologije osvajanja i istraživanja Mjeseca.

Znatniju primjenu u području inženjerske prakse metoda GPR doživljava recentnim razvojem elektronike i računarstva (period 1985. – 2000.) što je omogućilo praktičnu primjenu antena i analizu signala na frekvencijama koje su svojom rezolucijom i penetracijom bile primjerene inženjerskim konstrukcijama i geotehničkim aplikacijama.

U komercijalnoj eksploataciji GPR-uređaji pretežito rade u spektru frekvencija od 40 MHz do 3,0 GHz što im omogućava različite nivoe rezolucije i penetracije. Rezolucije pri radu sa sustavima visokih frekvencija (preko 1 GHz) daju izvrsnu razlučivost od svega nekoliko milimetara, dok se pri korištenju sustava s niskim frekvencijama mogu postići penetracije ispod površine tla u rasponu do 50 m dubine, ali uz znatno nižu rezoluciju.

Dubinom penetracije GPR-uređaja smatramo dubinu na kojoj je odnos reflektiranog signala i šuma takav da ga možemo detektirati radarskim prijemnikom. Signal odaslan radarskom antenom tijekom svojeg rasprostiranja gubi snagu zbog gubitaka samog uređaja, prigušenja medija, radijalnog širenja tj. prirode elektromagnetskog polja i napokon gubitaka kod refleksije. Dominantan utjecaj na dubinu penetracije ima centralna frekvencija uređaja na kojoj provodimo prikupljanje podataka.



Slika 1. Dubina penetracije GPR-uređaja na pojedinim frekvencijama u vapnenačkoj stijeni

2. Principi i standardi rada

GPR je metoda kojom dobivamo tomografske presjeke (radargrame) kroz tlo neposredno ispod antene sustava. Uređaj radi na istom principu kao i običan radar, ali usmjere-

ni elektromagnetski impuls emitira u ispitivani medij te prati i analizira odaziv. Analizom odaziva elektromagnetskog impulsa dolazimo do podataka koji nam uz detekciju omogućavaju pozicioniranje i karakterizaciju geoloških formacija, uslojenosti tla, ploha diskontinuiteta u stijenskoj masi, kaverni, varijacija u sastavu i građi tla i stijene, nivoa podzemne vode, ukopanih objekata, eventualne infrastrukture i drugih anomalija.

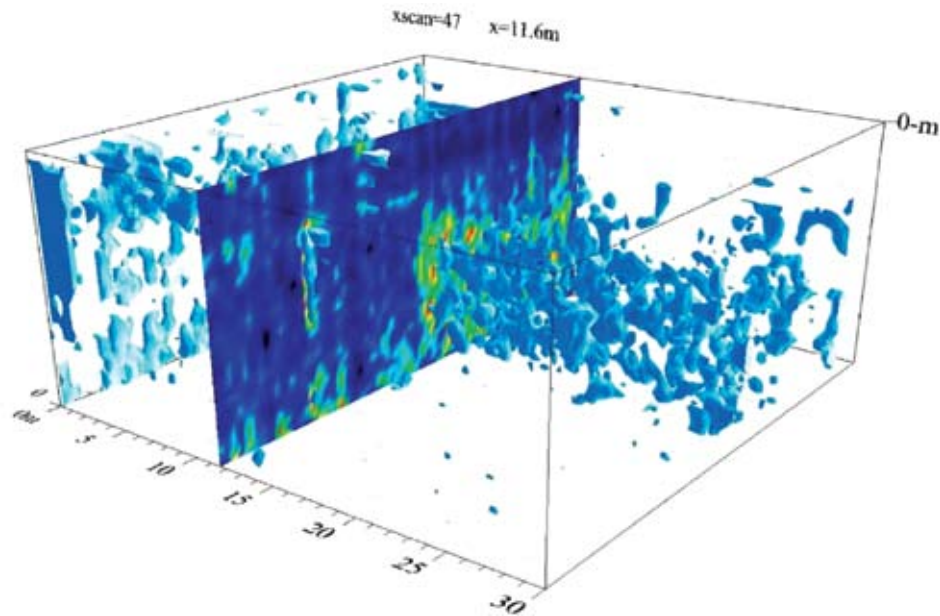


Slika 2: Detekcija krških formacija (kaverni) ispod piste i stajanke aerodroma Čilipi pored Dubrovnika bistatičkim antenskim sustavom na frekvenciji od 40MHz na dubinama većim od 10m, listopad 2008

Također, moguće je provesti naknadnu numeričku analizu rezultata koja uspostavlja relacije između vremena odaziva, faznog pomaka i magnitude refleksije, uz primjenu filtera za uklanjanje elektromagnetskog šuma i neželjenih odaziva. U konačnici moguće je generirati 3D prikaze podzemlja u zoni provedenih ispitivanja.

Rezolucija i dubina penetracije GPR-sustava obrnuto su proporcionalne zbog prirode širenja elektromagnetskog vala kroz provodljiv medij. Ukoliko želimo ostvariti veću dubinu penetracije, moramo koristiti GPR-sustav na nižoj frekvenciji što nam daje manju rezoluciju. Iako to izgleda ograničavajuće, rezolucije koje danas postizemo s obzirom na dubinu penetracije odgovaraju većini inženjerskih zahtjeva.

Kod GPR-radara razlikujemo vertikalnu i horizontalnu rezoluciju; vertikalna rezolucija je sposobnost sustava da razluči dva bliska objekta ili plohe po dubini tj. u smjeru rasprostiranja radarskog impulsa, a horizontalna rezolucija je sposobnost razlučivanja dva bliska objekta na istoj udaljenosti od uređaja (*okomito na smjer rasprostiranja radarskog*



Slika 3. 3D interpretacija anomalija u tlu u kubusu 30x30x10m (bxlxh) koje predstavljaju diskontinuitet u tlu (stijeni) ispunjenu aluvijem

impulsa). Obje su dominantno u funkciji centralne frekvencije uređaja, a horizontalna rezolucija je i u funkciji dubine tj. udaljenosti objekta od antene GPR-sustava i usmjerenja antene.

Gruba ocjena vertikalne rezolucije R_v kreće se oko $\frac{1}{4}$ valne duljine centralne frekvencije sustava (λ), a horizontalna rezolucija izražava se formulom:

$$R_h = \lambda/4 + D/(2\varepsilon-1) ; R_{h1} = 1/2 R$$

R_h horizontalna rezolucija u smjeru polaritet antene

R_{h1} ... horizontalna rezolucija poprečno na polaritet antene

λ valna duljina centralne frekvencije radara

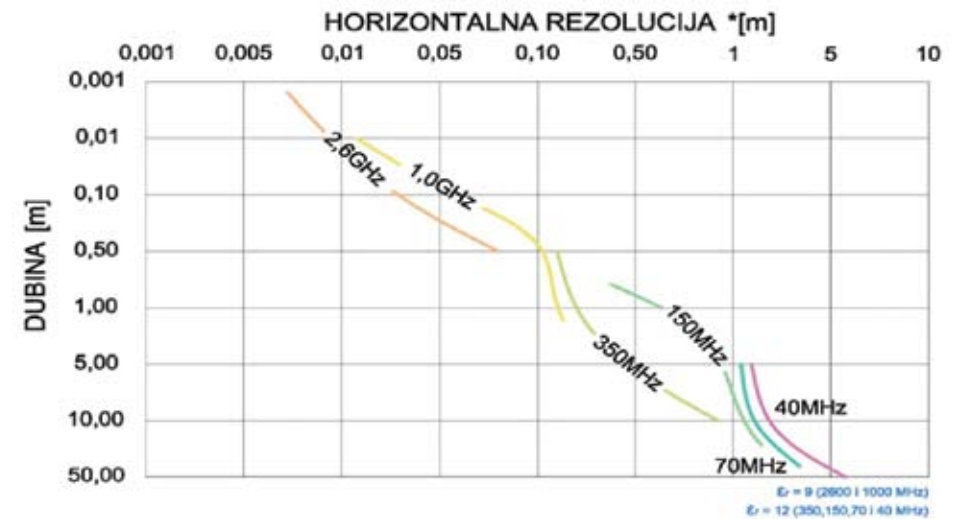
D ... dubina na kojoj ocjenjujemo rezoluciju

ε dielektrična konstanta medija

Iz navedenih izraza vidljivo je da je vertikalna rezolucija stabilna po dubini dok horizontalnu rezoluciju sustava bitno degradira dubina na kojoj provodimo prikupljanje GPR-sustavom (pada linearno s dubinom).

Iako je rezolucija radarskog sustava na većim dubinama malena, on i dalje može detektirati plohe diskontinuiteta, pukotine i kaverne, ali nećemo moći razlučiti bliske objekte ukoliko je njihova udaljenost manja od aktualne rezolucije za promatranu dubinu.

Način rada, akvizicija i obrada podataka prikupljenih GPR-uređajima na ispitivanju podzemlja propisana je standardom **ASTM D 6432-99 (2005) Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation**. Osim ovog standarda, postoji još cijeli niz preporuka izdanih od meritornih strukovnih organizacija i udruženja



Slika 4. Horizontalna rezolucija GPR-uređaja prema dubini i centralnoj frekvenciji

vezanih za specifične upotrebe radara. EN standardi za sada ne propisuju način upotrebe GPR-uređaja.

3. Upotreba GPR-a kod prospekcije ležišta kamena

Tehnika primjene GPR-a izrazito je pogodna i praktična u prospekciji površinskih ležišta tehničkog i arhitektonskog (dekorativnog) kao i ostalih mogućih lokacija za eksploataciju rudače.

Većinu nalazišta arhitektonskog kamena na području Dalmacije čine lokaliteti s kamenom iz gornje krede gdje je za potrebe proizvodnje izrazit problem pronaci kamenu masu očuvanu od tektonskih poremećaja. Za finalni proizvod, u naravi kameni blok – pravilno oblikovani paralelopipedni monolit, bitno je locirati poziciju gdje su diskontinuiteti po svom međusobnom položaju i razmaku takvi da omogućavaju ekonomski isplativu eksploataciju.

Generalno, pukotinski sustavi imaju negativni utjecaj na ekonomsku isplativost nalazišta arhitektonskog kamena jer razbijaju masu na manje nepravilne komade koji otežavaju ili onemogućavaju vađenje većih pravilnih blokova, smanjuju ekonomsku vrijednost proizvoda i povećavaju otkopne gubitke.

Jedinstvena karakteristika GPR-uređaja upravo je neposredno detektiranje diskontinuiteta prilikom rasprostiranja odaslanog elektromagnetskog impulsa kroz kamen kao medij. Na svakom od diskontinuiteta, ma kako oni mali bili, dolazi do refleksije i određeni dio energije emitira se nazad do radarskog (GPR) prijemnika i registrira po parametrima vremena odaziva, magnitude i faznog pomaka.

Iz vremena odaziva ovakve refleksije moguće je locirati diskontinuitet velikom preciznošću (do nekoliko centimetara) uključivo njegov smjer i pružanje, a iz magnitude i faznog pomaka odaziva moguće je u dijelu karakterizirati predmetni diskontinuitet. Kako se GPR-uređaji tijekom terenske akvizicije najčešće pozicioniraju putem GPS satelitske mreže, u konačnici je moguće kartirati diskontinuitete i dobiti dostatne parametre za ocjenu ekonomske isplativosti eksploatacije arhitektonskog kamena na pojedinoj lokaciji.

Osim lociranja diskontinuiteta i pukotina, moguća je i ocjena kvalitete kamena jer su određena nepoželjna svojstva kamene mase, kao zone s razvijenim mikropukotinama i/ili zone porozne kamene mase, obično povezana s povećanim prisustvom vode i disocijacijom mineralnih soli koje izazivaju utjecaj na prigušenje radarskog impulsa i time se jasno očitavaju na radargramu.

Također, kaverne, zone pukotina, anizotropne ili nehomogene građe kamena, utječu na raspršenje signala (scatering) što dodatno indicira anomalije u ležištu.

Bez obzira na svestranost i praktičnost metode GPR, koja u ranoj fazi prospekcije nalazišta daje mogućnost da se uz klasično izučavanje površinskog dijela „zaviri» i pod površinu, ona nikako nije zamjena za uobičajene metode, već je treba uključiti u program istražnih radova radi ekonomske optimalizacije troškova i brze diskriminacije nalazišta bez intenzivnog istražnog bušenja ili uz njegovo minimiziranje.

Kod lokacija za koje se nakon prospekcije provode prethodna istraživanja, izrazitu vrijednost imaju podaci istražnih bušenja koji mogu poslužiti kao osnova za GPR kartiranje i kvantifikaciju lokaliteta po geotehničkim parametrima očitanim iz jezgri istražne bušotine.

Za nalazišta u eksploataciji moguća je analiza postojećih rezervi, snimanje smjera, položaja i rasprostranjenosti otkrivenih diskontinuiteta kao i homogenosti kamena i kamenih blokova.



Slika 5. Detekcija dubine okršavanja GPR sustavom na frekvenciji od 350 MHz, Mošćenička Draga, svibanj 2008

4. Zaključak

GPR-metoda spada u priznate geofizičke metode za plitku prospekciju tla i komplementarna je s ostalim geofizičkim metodama (seizmička, električni otpor, gravimetrija...), posebno u zoni neposredno uz površinu. Za razliku od ostalih metoda, odlikuje se bitno višom rezolucijom i prikupljanjem većeg broja parametara o geotehničkom i geološkom stanju podzemlja.

Nedostatak ove metode je mala dubina prikupljanja podataka (u povoljnim uvjetima, u vapnencu možemo računati na maksimalno 30-50 m dubine penetracije), ali je za površinske lokalitete i većinu geotehničkih inženjerskih problema ova dubina uglavnom dostatna.

Glavne odlike refleksije radarskog elektromagnetskog impulsa (vrijeme odaziva, magnituda i fazni pomak) direktno indiciraju plohe diskontinuiteta koje dominantno utječu na ekonomsku isplativost nalazišta arhitektonskog kamena.

Zbog izrazite brzine i gustoće prikupljenih podataka (uobičajena frekvencija prikupljanja je 100 kHz) moguća je velika pokrivenost lokaliteta i time znatna pouzdanost podataka.

Bibliografija:

- Deniels, David J.: *Ground Penetrating Radar*, 2nd Edition, *The Institute of Engineering and Technology*, London UK, London 2007; ISBN 0 86341 360 9
- Oswald, B., Erni, D., Benedickter H. R., Bachtold, W.: »Dielectric properties of natural materials«, *IEEE Int. Antennas and Propagation Society Symposium*, 2001, Vol 3, pp 761-764
- Harman, S. E., Gjessing, D. T., Hjelmstad, J., Aarholt, E.: »Ground penetrating synthetic pulse radar: dynamic range and models of operation«, *Journal of Applied Geophy*, 1995, 33 pp 15-26
- Hulsenbeck et al.: *German Pat. No 489434*, 1926
- Cook, J. C.: »Radar transparencies of mine and tunnel rocks«, *Geophys.*, 1975, 40, pp. 865-885
- ASTM D 6432-99:2005 »Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation«

GPR - GROUND PENETRATION RADAR FOR DECORATIVE STONE QUARRY PROSPECTION

Summary

Basics of the GPR (Ground Penetrating Radar) method are given with highlights regarding usage for the decorative stone quarry prospection. Ground penetrating radar is capable to indicate interfaces, fissures and other geological formations including karst phenomena that can impact the exploitation costs. Main advantage of the GPR method is direct position and extent detection of such subsurface structures. Further interpretation yields information on structural variations such as anisotropic or degraded areas in stone mass.