

Beskontaktna magnetometrija i njezina primjena za ispitivanje visokotlačnog plinovoda Gradske plinare Zagreb na trasi od Ivanje Reke do TE-TO Zagreb ukupne duljine 10.735 m u prosincu 2015.

Fran, **JARNJAK**, *HRID – Non destructive testing d.o.o.*, Zagreb, **HRVATSKA**,
fran.jarnjak@hrid-ndt.hr

Ivan, **GRGA**, *HRID – Non destructive testing d.o.o.*, Zagreb, **HRVATSKA**,
ivan.grga@hrid-ndt.hr

SAŽETAK – Opisana je metoda i oprema za inspekciju zakopanih cjevovoda primjenom beskontaktna magnetometrije koja omogućuje inspekciju cjevovoda gdje je nemoguća primjena pigging-a i drugih ispitnih metoda. Također prikazana je i praktična primjena metode na ispitivanju visokotlačnog plinovoda Gradske Plinare Zagreb u duljini od 10735 m obavljenog u prosincu 2015g.

Ključne riječi: beskontaktna magnetometrija, plinovod, magnetna memorija metala

Non-Contact Magnetometric Application on Gradska Plinara Zagreb High Pressure Gas Pipeline Inspection Having Total Length of 10,735 m between Ivanja Reka and TE-TO Zagreb in December 2015

ABSTRACT - In this paper, a non-contact magnetometric method and equipment is presented that is used to perform inspections of unpiggable buried pipelines. Paper also presents method's application to inspect a high pressure gas pipeline owned by the Gradska Plinara Zagreb in December 2015 with the total length of 10735 m.

Keywords: non-contact magnetometric inspection, metal magnetic memory, unpiggable gas pipeline

1. UVOD

U ovom članku biti će prikazana primjena beskontaktna magnetometrijske metode za ispitivanje ukopanog visokotlačnog plinovoda Gradske Plinare Zagreb izvršenog u prosincu

2015. godine, kao jedina mogućnost za nerazorno ispitivanja plinovoda njegovoj kompletnoj trasi, jer isti nije projektiran za druge ispitne metode. Primjena beskontaktna magnetometrijske metode je izuzetno važna kako u Hrvatskoj tako i u svijetu,

jer je velika većina postojećih plinovoda sagrađena još u prošlom stoljeću, koji nisu tada bili projektirani za in-line ispitivanje (engl. pigging), tako da je beskontaktna magnetometrija jedini način da se dobije uvid u postojeće stanje cjevovoda, prate promjene i kreira plan održavanja cjevovoda koji su već nekoliko desetljeća u eksploataciji, te je njihovo ispitivanje nužno za sigurnost kako građana tako i materijalnih dobara.

2. PRINCIPI ISPITNE METODE

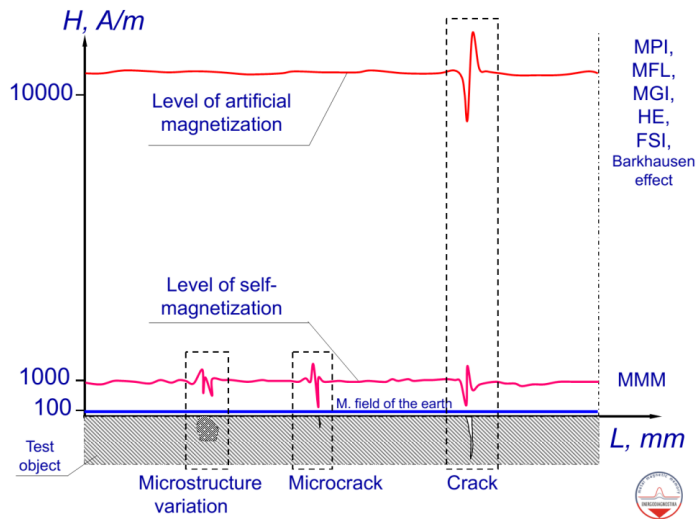
Beskontaktna magnetometrija (non-contact magnetic diagnostic – NCMD) je primjena principa metode Magnetne Memorije Metala (MMM) na ispitivanje ukopanih čeličnih cjevovoda (plinovod, naftovod, vodovod i dr.) radi pronalaska anomalija, pogotovo na cjevovodima koji se ne mogu ispitati na neki drugi način jer nisu bili projektirani za npr. primjenu in-line inspekcijom (pigging). NCMD je moguće primijeniti za ispitivanje u urbanim kao i u ruralnim sredinama, bez neke posebne pripreme od strane naručioca inspekcije, izvođača inspekcije, a i ne zahtjeva obustavu rada cjevovoda. NCMD metodu je također moguće primijeniti za ispitivanje dostupnih cjevovoda preko izolacije npr. u industrijskim postrojenjima, toplovodima i dr. U sljedećim poglavljima objasniti ćemo metodu MMM kao osnovu, te samu metodu NCMD.

2.1. Magnetna memorija metala (MMM)

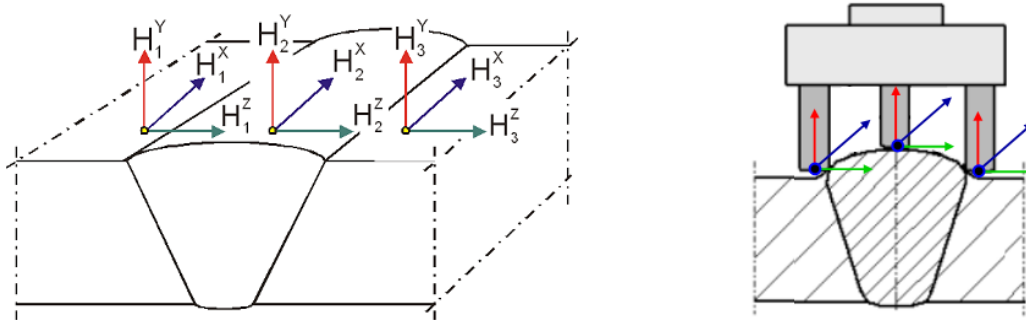
Magnetna memorija metala (MMM) pripada u klasu metoda koje koriste magnetske principe za provedbu bezrazornog ispitivanja sa razlikom da je MMM pasivna metoda koja koristi već postojeće magnetno polje objekta koji se ispituje jer su u njemu već formirane magnetske domene tijekom proizvodnje i tijekom same uporabe objekta. Metoda je razvijena od strane Prof. A.A. Dubova i prvi puta je kao termin MMM bila uvedena 1994. godine, te se kontinuirano razvija od strane tvrtke Energiagnostika (Moskva, Rusija). Metoda za svoj rad koristi principe inverzne magnetorestricije (engl. inverse magnetorestrictive effect - Villari effect) gdje dolazi do promjene u magnetizaciji materijala

kod promjene u naprezanju, magnetoplastičnosti (povećano samo-magnetiziranje u zonama povećane plastične deformacije) i curenja magnetnog toka na nivou (jačini) prirodne magnetizacije (engl. magnetic flux leakage). Samim time, magnetske domene u objektu su izraženije na područjima povećanog naprezanja i deformacije (engl. stress, strain) i na njima dolazi do povećane magnetizacije pod utjecajem magnetnog polja zemlje, zbog gore navedenih principa. Tijekom provedbe MMM ispitivanje bilježi intenzitet magnetskog polja, te se identificiraju zone povećane koncentracije stresa (engl. stress concentration zones - SCZ), jer je u tim zonama najveća vjerojatnost za razvoj defekata tijekom eksploatacije objekta. Moramo napomenuti da je MMM metoda, uz metodu akustičke emisije, jedna od metoda za ranu dijagnostiku stanja metala odnosno objekta još u elastičnoj zoni po krivulji plastičnog tečenja materijala, tako da se tek u plastičnoj zoni defekti mogu potvrditi primjenom klasičnih metoda kao na primjer ultrazvuk. Isto tako, MMM metoda može detektirati i mikropukotine koji zbog svoje male veličine još nije moguće detektirati primjenom ultrazvuka, tako da se preporučuje pojačano praćenje tih područja tijekom eksploatacije.

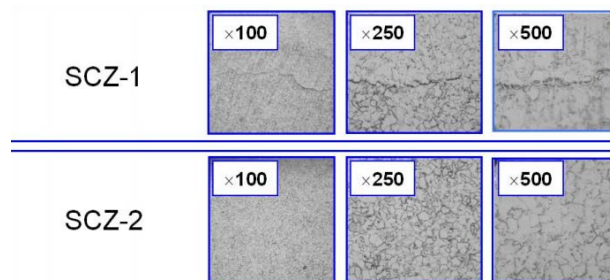
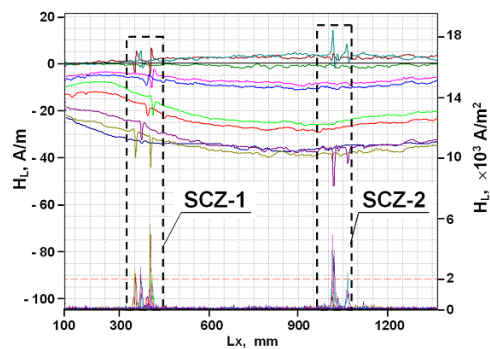
MMM je moguće primijeniti na feromagnetnim i paramagnetnim materijalima tijekom same proizvodnje (npr. prije i poslije toplinske obrade radi potvrde o smanjenju naprezanja, nakon zavarivanja i dr.) kao i tijekom eksploatacije. MMM metoda je primjenjiva za ispitivanje osnovnog materijala, zavarenih spojeva, cijevi, izmjenjivača topline, vijaka na prirubicama tijekom samog rada postrojenja kao i tijekom remonta, čeličnih kablova (dizala, strojevi), lopatica turbina, statora, željezničkih tračnica i drugo. MMM metoda je standardizirana kao ISO 24497, međunarodni standard za osnovnu primjenu i za primjenu na zavarenim spojevima. Za primjenu metode nije potrebna prethodna priprema ispitnog objekta, prikupljanje podataka se vrši skeniranjem površine bez nekih posebnih ograničenja brzine (cca. do 300 mm/s, a i brže u nekim slučajevima), te je samim time MMM jedna od bržih metoda bezrazornog ispitivanja. Na sljedećim slikama 1 do 4 prikazati ćemo osnovne principe same metode i analize.



Slika 1 Usporedba MMM metode i ostalih magnetskih metoda. MMM metoda je jedina pasivna metoda i ne koristi umjetno magnetno polje za provedbu ispitivanja. MMM metoda može detektirati promjene na mikrostrukтури materijala kao i mikropukotine koje klasične metode ne mogu detektirati, čime je MMM metoda idealna i za ranu dijagnostiku (izvor slike: Energodiagnostika)



Slika 2 Primjer komponenti prirodnog magnetnog polja zavarenog spoja i shematski prikaz sonde za MMM ispitivanje zavarenog spoja – senzori ispituju zonu utjecaja topline kao i sam zavar (izvor slike: Energodiagnostika)



Slika 3 Rezultat ispitivanja koljena parovoda termoelektrane. Detektirane su dvije zone koncentracije stresa na čijem području je došlo do strukturne promjene materijala (izvor slike: Energodiagnostika)

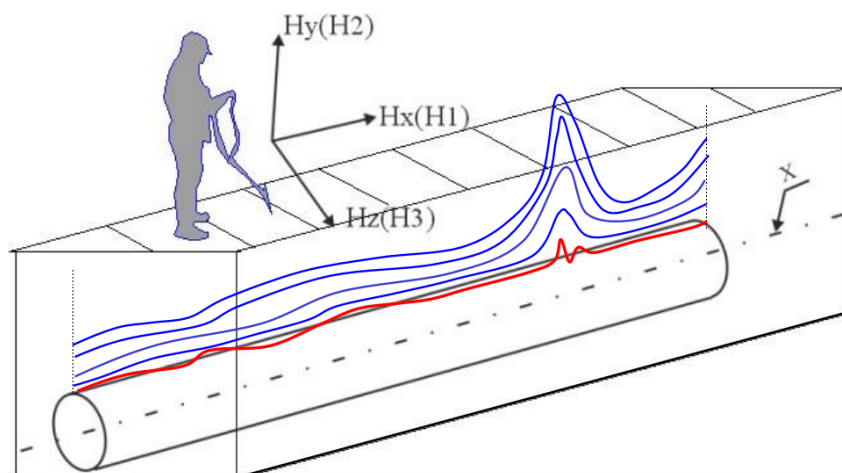


Slika 4 Prikaz MMM ispitivanja - skeniranje se provodi sa senzorima u kontaktu sa objektom koji ne zahtjeva specijalnu površinsku primjenu (razmak samog senzora i površine objekta je cca 1 mm). Prikazani primjeri su ispitivanje zavora, cjevovoda, lopatica turbine, te cijevi kotla termoelektrane. Za svaki ispitni objekt postoje namjenski držači senzora radi ubrzanja ispitivanja kao i univerzalni držači senzora. (izvor slike: HRID – Non destructive testing i Energodiagnostika)

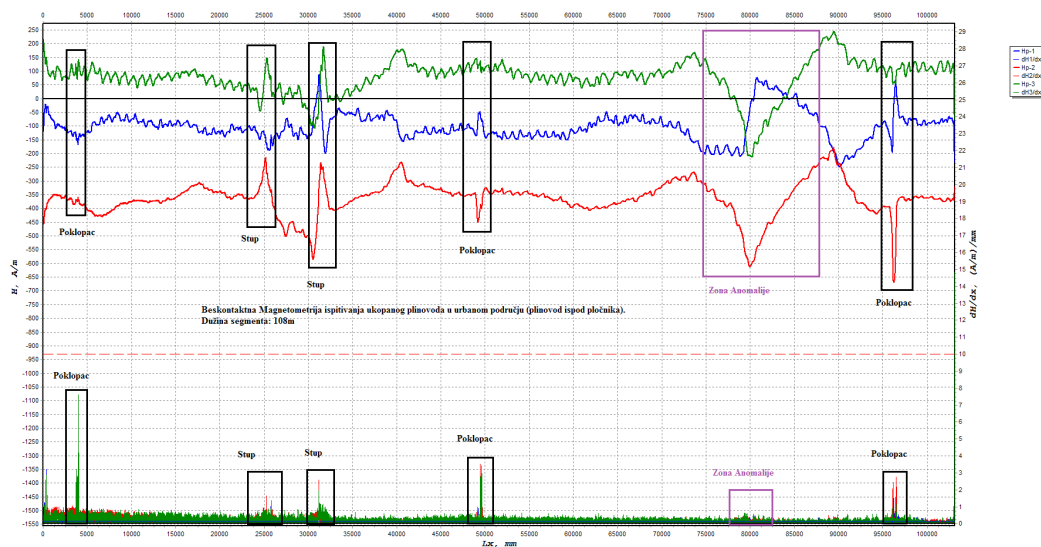
2.2. Beskontaktna magnetometrija

Beskontaktna magnetometrija (non-contact magnetic diagnostic – NCMD) je razvijena na načelima metode MMM, na način da se beskontaktnim senzorom mjeri sve tri komponente magnetnog polja zemlje (X, Z, Y) koje je iskrivljeno na mjestu ukopanog cjevovoda koji se ispituje, a samo iskrivljenje magnetnog polja je isto tako pod utjecajem stanja naprezanja/deformacije cjevovoda odnosno prisutnosti degradirajućeg procesa na cjevovodu. Analizirajući prikupljene podatke, po karakteristikama deformacija magnetnog polja detektirane anomalije se klasificiraju u 3

kategorije od kojih je prva kategorija najznačajnija. Sama karakterizacija anomalije se vrši kasnije u rovu iskopom cjevovoda na toj lokaciji. Prilikom analize podataka, analizator treba imati uvid o svim preprekama i magnetnim smetnjama tijekom inspekcije (stupovi, automobili, ograde, dalekovodi i dr.), što bilježi tijekom prikupljanja podataka, te je također poželjno imati nacrt cjevovoda (ventili, paralelni cjevovodi ako ih ima, potpornji i dr.). NCMD je moguće također primijeniti na dostupnim cjevovodima za ispitivanje preko izolacije, npr. u industriji ili kod toplovoda. Na sljedećim slikama biti će prikazan osnovni princip NCMD metode kod prikupljanja podataka, Slika 5, te kod analize na Slici 6.



Slika 5 Opći prikaz beskontaktna magnetometrije. Promjena na cjevovodu utječe na magnetno područje zemlje koje se detektira i zabilježi za kasniju analizu i klasifikaciju anomalija (izvor slike: Energodiagnostika)



Slika 6 Primjer analize 108 m dugog segmenta ukopanog plinovoda u urbanom području. Gornji grafovi prikazuju intenzitet magnetnog polja (u A/m) a donji grafovi prikazuju gradijent polja ($\Delta H/\Delta x$). Pronađena je jedna anomalija, dok su drugo magnetne smetnje – željezni poklopci plinovoda na pločniku, te stupovi za sprječavanje vožnje automobila po pločniku (izvor slike: HRID - Non destructive testing)

3. PRIMJENA BESKONTAKTNE MAGNETOMETRIJE NA ISPITIVANJU CJEVOVODA GRADSKE PLINARE ZAGREB

Beskontaktna magnetometrija (non-contact magnetic diagnostic – NCMD) je bila primijenjena u prosincu 2015. godine na ispitivanje visokotlačnog (VT) plinovoda Gradske Plinare Zagreb ukupne duljine od 10.735 m. Plinovod nije bio projektiran za primjenu in-line inspekcije (pigging), a pošto je ukopan, jedina metoda za ispitivanje ukupne trase plinovoda je beskontaktna magnetometrija. Trasa plinovoda je podijeljena u dva dijela, i to promjera DN500 od PČ Ivanja Reka do PPMRS Zagreb Istok (Etilen) duljine 4.200 m izgrađen bešavnim cijevima 2000. godine, te drugi dio promjera DN600 od PPMRS Zagreb Istok (Etilen) do ispred ograde PMRS TE-TO Zagreb, duljine 6.535 m, izgrađen spiralno zavarenim cijevima u periodu 1984.-1986. godine. Dionica DN500 ima nominalnu debljinu materijala od 8,8 mm, dok dionica DN600 ima nominalnu debljinu od 9,31 mm do 11 mm. Prosječna dubina do tjemena cjevovoda je 2-3 m, a na nekim kraćim segmentima dubina ukopa doseže i 4-4,5 m radi raznih nasipa, korištenja zemlje i drugih sličnih uzroka na trasi pod utjecajem tijeka vremena.

3.1. Oprema za ispitivanje

Lokator cjevovoda – Za točno i precizno određivanje trase plinovoda koristio se

lokator cjevovoda, kao standardni proizvod za tu primjenu kojeg koriste razne državna i privatna poduzeća na poslovima održavanja cjevovoda. Lokator cjevovoda ima više osjetljivih detektora magnetnog polja i za primjenu ispitivanja plinovoda je podešen na traženje frekvencije aktivne katodne zaštite, koja je u ovom slučaju bila 100 Hz. Lokator sadrži grafički prikaz koji prikazuje dubinu do tjemena cjevovoda i navodi operatera grafičkim prikazom na precizno lociranje trase cjevovoda. Lokator koristi baterije velikog kapaciteta za cjelodnevni rad. U slučaju cjevovoda koji nema katodnu zaštitu ili ona nije aktivirana, postoje generatori koji se povežu na cjevovod te se tako lokator može primijeniti. Primjer takvog lokatora je prikazan na Slici 7.

GPS uređaj - GPS uređaj se koristi za točno mapiranje početnih točaka segmenta cjevovoda koji se u danom trenutku snima kao i za mapiranje same trase cjevovoda. Na osnovu mapirane trase pronalaze se GPS koordinate detektiranih anomalija.

Video kamera - video kamera se koristi za bilježenje glasovnih komentara kao i vizualnog stanja same trase prilikom prikupljanja, te kasnije tijekom analize podataka. Na primjer, u slučaju prolaska automobila prilikom prikupljanja podataka, odaziv signala na instrumentu zbog automobila će se moći kompenzirati, što će biti vidljivo na video kameri.

NCMD oprema - sastoji se od senzora, nosača opreme s odometrom (mjeriteljem udaljenosti) te samog instrumenta. Senzor ima dva 3-osna visoko osjetljiva flux-gate magnetometra, jedan blizu površine zemlje dok je drugi vertikalno udaljen i montiran na laganom teleskopskom aluminijskom štapu radi lakšeg transporta i cjelodnevnog baratanja. Nosač opreme se sastoji od okvira za montiranje video kamere i instrumenta, te kotača s enkoderom koji mjeri udaljenost. Nosač i odabir jednog kotača omogućuje fleksibilnost u ispitivanju u raznim uvjetima,



Slika 7 Tipičan lokator cjevovoda - na slici proizvođača RIGID (izvor slike: HRID - Non destructive testing)

od čiste livade do guste šume ili šikare. Instrument ima internu memoriju i baterijsko napajanje dostatno za cjelodnevni rad, te pomoću integralnog ekrana i tipkovnice omogućuje konfiguriranje, prikupljanje i analizu podataka, te provjeru kvalitete prikupljenih podataka. Sama analiza je ugodnija i brža korištenjem software-a za analizu na prijenosnom računaru nakon prebacivanja podataka s instrumenta, te provjerom komentara i trase pregledom snimljenog video/ audio materijala. Prikaz NCMD opreme je na slikama 8a, 8b i 8c. Sam instrument je prikazan na Slici 9.



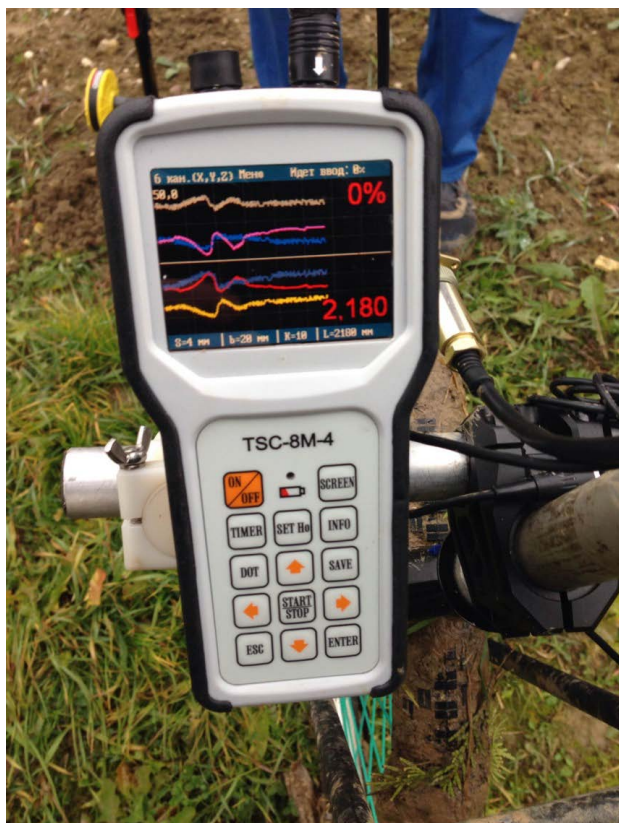
Slika 8b 3-osni senzor udaljen od površine. Osim senzora u kućištu je i elektronika za oba senzora (izvor slike: HRID - Non destructive testing)



Slika 8a 3-osni senzor blizu površine za prikupljanje NCMD podataka (izvor slike: HRID - Non destructive testing)



Slika 8c Nosač instrumenta i video kamere zajedno s enkoderskim odometrom (izvor slike: HRID - Non destructive testing)



Slika 9 Prikaz NCMD instrumenta (izvor slike: HRID - Non destructive testing)

Gornji graf prikazuje vrijednosti gornjeg, a donji graf prikazuje vrijednosti donjeg 3-osnog senzora. Trenutno je snimljeno 2,18 metara, a 0% je postotak koji prikazuje trenutno stanje memorije za snimanje određenog segmenta, gdje je 0% početno stanje, a 100% stanje kada je memorija kompletno puna. Instrument ima dovoljno memorije za segment duljine od nekoliko stotina metara, a nakon spremanja interna memorija instrumenta ima kapacitet od nekoliko km, tako da kod tipičnih ispitivanja nije potrebno nositi dodatnu opremu za presnimanje podataka kao npr. prijenosno računalo.

3.2. Provedba ispitivanja

Za ispitivanje je potrebno imati tim od dvoje ljudi. Osoba ispred određuje trasu cjevovoda lokatorom i bilježi je preko GPS uređaja, dok je osoba koja prikuplja podatke pomoću senzora i instrumenta slijedi. Ispituje se uvijek u smjeru protoka plina. Tipičan primjer ispitivanja je prikazan na Slici 10.

Ispitivanje se provodilo u segmentima, gdje je početak i kraj segmenata uvjetovan određenim prikladnim orijentirima radi lakše orijentacije prilikom analize i prilikom kasnijih iskopa radi provjera rezultata. Kao orijentiri, najčešće su uzimana raskršće ceste, crkva, željeznička pruga, nadvožnjak, obala jezera, i drugo.

Snimljeni podaci su vezani uz početnu točku svakog segmenta zabilježenu GPS-om, izgled početne točke putem kamere (audio komentar/video snimak) kao i sama ruta segmenta po trasi cjevovoda zabilježena preko odometra s preciznošću u centimetrima. Na primjer, kod analize podataka neka anomalija može započeti na 12,3 m od početne točke segmenta po trasi cjevovoda i završava na 18,3 m, te time ima ukupnu duljinu od 6 m. Pošto je znana početna točka, početak i kraj anomalije, kao i cijela ruta, može se preko GIS software-a naći GPS koordinata sredine anomalije.

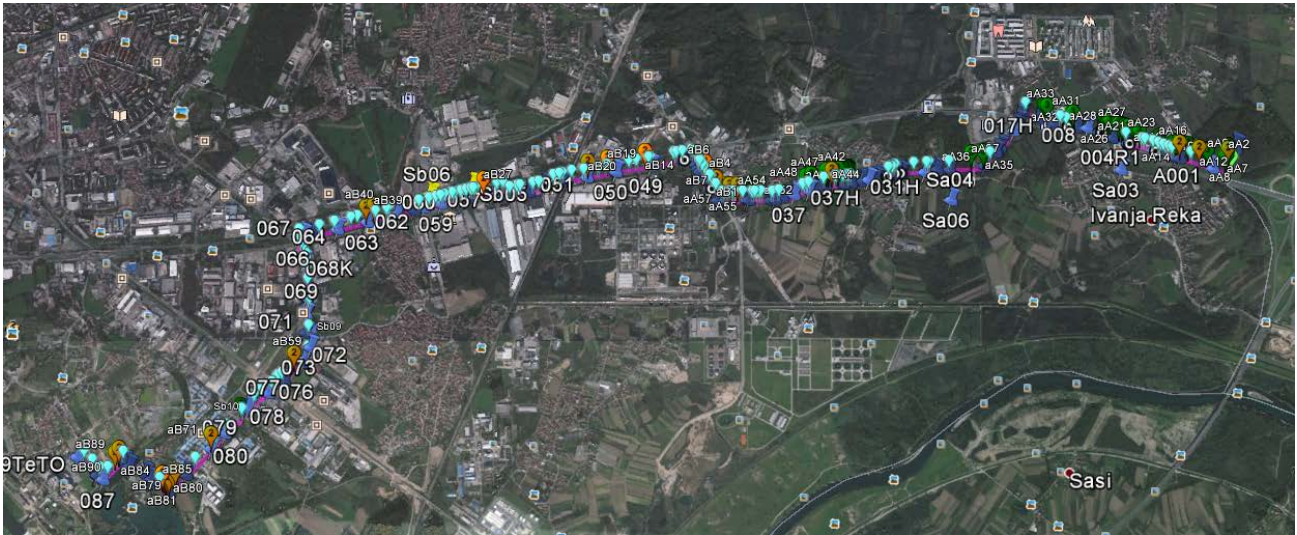
3.3. Rezultati ispitivanja

Izveštaj s rezultatima ispitivanja sadrži tablicu pronađenih anomalija, njihovu duljinu i GPS koordinatu. Osim toga dio izvještaja je i datoteka u univerzalnom *.kml formatu, koja se može otvoriti u GIS software-u s kartama ili



Slika 10 Tipično provođenje ispitivanja - lokacija Resnik (izvor slike: HRID - Non destructive testing)

besplatnom Google Earth, gdje se može vidjeti na primjer ispitana trasa, točke segmenata ispitivanja, anomalije i drugo radi lakšeg pregleda i orijentacije pronađenih anomalija na samoj trasi odnosno u prostoru. Primjer takvog prikaza cijele ispitane trase prikazan je na Slici 11.



Slika 11 Prikaz ispitane trase cjevovoda

Nakon što se izvještaj preda naručiocu ispitivanja, uobičajeni postupak je vršenje iskopa na identificiranim mjestima anomalija prvog ranga, odnosno određenim anomalijama drugog ranga, radi provjere stanja cjevovoda primjenom klasičnih metoda bez-razornog ispitivanja kao na primjer vizualna metoda (VT) ili ultrazvuk (UT). U slučaju ispitanog cjevovoda, anomalije prvog ranga nisu bile pronađene tako da je vršen iskop anomalija drugog ranga, prilikom čega su nađena mjesta površinske korozije ispod izolacije te lokalno stanjenje stjenke od nominalne debljine, ali i dalje u prihvatljivim okvirima za daljnju eksploataciju cjevovoda.

4. ZAKLJUČAK

U praksi, općenito govoreći, prosječna brzina za ispitivanje može se računati kao prosjek 2 km dnevno ovisno o stanju na terenu i da li je pretežno urbana ili ruralna sredina gdje prolazi cjevovod. U slučaju ovog plinovoda, prikupljanje podataka je provedeno u 4 radna dana, gdje je jedan radni dan utrošen na relativno kratkoj dionici kroz Resnik gdje plinovod prolazi kroz ograđena dvorišta obiteljskih kuća zbog kontaktiranja vlasnika radi dozvolu za ulaz u dvorište, prelaska prometne ceste i drugo. Dionice kroz poljane i šumu su bile znatno brže ispitane. Nakon prikupljanja podataka kompletne trase, pristupilo se analizi podataka i pisanju izvještaja,

te potvrdama određenih anomalija u rovu, gdje je brzina iskopa i bila uvjetovana vremenskim prilikama radi zimskog perioda inspekcije. Pronađene anomalije su bile potvrđene, te je time beskontaktna magnetometrija odličan izbor za inspekciju ukopanih cjevovoda koji se ne mogu drugačije ispitati, a isto tako ne zahtijevaju neku posebnu pripremu niti obustavu rada cjevovoda. Ovom prilikom bi se htjeli zahvaliti tvrtci Energodiagnostika (Moskva, Rusija) na pravu za korištenje grafičkih dijagrama oko objašnjenja principa metode MMM i NCMD, kao i djelatnicima Gradske Plinare Zagreb na podršci u pripremi i tijekom ispitivanja trase plinovoda.

5. LITERATURA

1. Technical guideline for non-contact magnetic inspection of gas and oil pipelines. Energodiagnostika, Moskva, Rusija
2. Dubow A. A., Physical Base of the Method of Metal Magnetic Memory, Proceedings of the Workshop on Non-Destructive Testing of Materials and Structures, NTM'02 Warsaw, IPPT PAN, 2002, 1-9
3. Tester of Stress Concentration (TSC) User Manual. Energodiagnostika, Moskva, Rusija
4. Scanning device Type 11-6W User Manual. Energodiagnostika, Moskva, Rusija