

Detekcija i klasifikacija ukopanih objekata primjenom termografije

Detection and classification of buried objects using thermography

Srećko Švaić¹, Vjera Krstelj², Ivanka Boras¹, Josip Stepanić², Marina Malinovec¹

¹Zavod za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,
I. Lučića 5, Zagreb; tel.: 6168 222, fax: 6156 940,
srecko.svaic@fsb.hr, ivanka.boras@fsb.hr, marina.malinovec@fsb.hr

²Zavod za kvalitetu,
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,
I. Lučića 1, Zagreb; tel.: 6168 497, fax: 6157 129,
vjera.krstelj@fsb.hr, josip.j.stepanic@fsb.hr

Sažetak

Infracrvenu termografiju nastoji se primijeniti u učinkovitom otkrivanju ukopanih protupješačkih mina za potrebe humanitarnog razminiranja. Prednosti termografije kao tehnike detekcije su beskontaktnost ispitivanja i trenutni prikaz registriranih signala. Temeljni razlog sadašnje razine primjenjivosti termografije u humanitarnom razminiranju je izrazita nehomogenost vegetacije i tla, koje znatno umanjuje mogućnost detekcije ukopanih objekata i njihove klasifikacije. U radu su opisani rezultati i zaključci dobiveni istraživanjima primjenjivosti infracrvene termografije u kontroliranim uvjetima.

Ključne riječi: termografija, ukopane mine, detekcija, klasifikacija humanitarno razminiranje

Abstract

Infrared thermography is considered for applications in efficient detection of buried antipersonnel mines within the humanitarian demining. The advantages of the thermography as a detection technique are non-contact testing and real-time analysis of registered signals. The basic reason for the presently encountered level of applicability of thermography in humanitarian demining is soil and vegetation non-homogeneity level, which significantly suppresses the capability of buried objects detection and classification. In the paper are presented results and conclusions of research conducted regarding the infrared thermography applicability in the controllable conditions.

Key words: thermography, buried mines, detection, classification, humanitarian demining

1. UVOD

Minirana područja postoje u gotovo 90 zemalja u svijetu [1] i sadrže oko 80 milijuna mina koje su u mogućnosti djelovati više od 50 godina. Godišnje se zabilježi oko 30 000 smrti i ostalih unesrećenja zbog djelovanja mina. U više zemalja, poput Hrvatske i drugih zemalja jugoistočne Europe, minirana područja nastala su u proteklom desetljeću, što je rezultiralo platformom o potrebama zabrane korištenja protupješačkih mina, i svijesti o potrebi učinkovitog uklanjanja postavljenih mina provedbom humanitarnog razminiranja[1].

Humanitarno razminiranje je skup aktivnosti u okviru kojeg se minirano područje pretvara u područje sigurno za svakodnevne socio-ekonomske procese stanovništva. U njemu se zahtijeva potpuno otkrivanje i uklanjanje postavljenih mina. Od više faza humanitarnog razminiranja, detekcija postavljenih mina je faza s pridruženim visokim stupnjem rizika i relativno dugim trajanjem [3]. Tehnike kojima se detektiraju mine u humanitarnom razminiranju su detekcija pipalicom, detekcija primjenom detektora metala i detekcija primjenom pasa tragača [4]. Dodatno, uklanjanje mina provodi se i primjenom strojnog razminiranja. Osim navedenih, u posebnim slučajevima korištene su i druge tehnike, poput infracrvene termografije, ili radara [2, 4, 5].

Infracrvena termografija javlja se zbog svojih svojstava kao moguća tehnika detekcije u humanitarnom razminiranju [6 - 8]. To je nerazorna, beskontaktna tehnika određivanja raspodjele temperature i emisivnosti u infracrvenom području za ispitivanu površinu u toplinski nestacionarnom stanju. U kombinaciji s razumijevanjem procesa izmjene topline, snimljena površinska raspodjela temperature omogućava određivanje stanja ispitivanog objekta ispod površine [9, 10].

U proteklih nekoliko godina na Fakultetu strojarstva i brodogranje, zajedničkim radom Zavoda za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku i Zavoda za kvalitetu razmatrana je mogućnost primjene infracrvene termografije na detekciju i klasifikaciju ukopanih objekata. Dvije su faze rada; prva, u kojoj je radi stjecanja uvida u karakteristične veličine eksperimentirano s modelnim uzorcima u homogenom tlu bez vegetacije, i druga, u kojoj je eksperimentalni postav uključivao i simulaciju vegetacije u obliku pokrova kontroliranih svojstava. Pokrov djeluje kao izvor šuma na termogramima te otežava uočavanje termalnog odziva ukopanih objekata. Termogrami s intenzivnim termalnim šumom sličniji su termogramima realističnih tla zbog njihove nehomogenosti. Prisustvo termalnog šuma nadkritične razine zahtijeva suštinski drugačiji pristup analizi termograma, a u konačnici utječe i na ispitnu konfiguraciju. Za analizu termograma s nadkritičnom razinom termalnog šuma upotrijebljena je tehnika analize nezavisnih komponenti (engl. *Independent Component Analysis*).

U sljedećem odjeljku opisane su postojeće tehnike detekcije mina u humanitarnom razminiranju i naznačena trenutna svojstva tehnika koje se tek razvijaju. U trećem odjeljku opisan je pristup numeričkog modeliranja izmjene topline u tlu, razvijen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, nakon čega je u četvrtom odjeljku opisan pripadni eksperimentalni postav. Neki od dobivenih rezultata navedeni su, analizirani i diskutirani u petom odjeljku, a smjernice daljnjeg rada u šestom.

2. TEHNIKE DETEKCIJE MINA

2.1. Tehnike detekcije koje se primjenjuju u humanitarnom razminiranju

Više je uzroka teškoća vezanih uz detekciju mina. Ponajprije, izvor teškoća je nekarakterizirana okolina mina: tlo sa svojim sastavom i dinamikom, vegetacija, reljef i

klimatski uvjeti. Stjenovito i tvrdo tlo, klizište, tlo s podzemnim vodenim tokovima, područje guste vegetacije kakva je većina područja miniranih više godina u jugoistočnoj Europi, neravno tlo, područje s relativno puno padalina i sl. su neki od primjera kako okolina mina otežava detekciju mina. Minirana područja često su bez popratne dokumentacije koja omogućava relativno brzo razminiranje. Nadalje, svojstva mina otežavaju detekciju. Mine su izrađene najvećim dijelom od organskih materijala, polimera i eksploziva, koji se po mnogim svojstvima ne razlikuju bitno od prosječnih vrijednosti tih svojstava za tlo [11]. Dodatno, vrijednosti pojedinih svojstava mina mogu se nalaziti unutar vrijednosti tih svojstava za tlo. Npr. relativna dielektrična funkcija polimera i eksploziva koji se nalaze u minama relativno su bliskih vrijednosti onima u tlu. Uzimajući u obzir varijabilnu količinu vode i zračnih šupljina u tlu, varijacije u iznosu relativne dielektrične funkcije za tlo mogu obuhvaćati iznose onih za minu. To znatno otežava mogućnost detekcije mina na temelju lokalne razlike u iznosu relativne dielektrične funkcije.

Osim zbog prikladnih svojstava, moguća primjena infracrvene termografije u detekciji mina motivirana je i nedostacima tehnika detekcije koje se u današnje vrijeme primjenjuju: detekcija pipalicom, detekcija primjenom detektora metala i detekcija primjenom pasa tragača.

U detekciji pipalicom pirotehničari ostvaruju fizički kontakt s ukopanim objektom. Problem detekcije pipalicom je da je pirotehničar na ispitivanom području, od kojeg je radi pokretljivosti zaštićen samo zaštitnim odijelom, a ujedno postupak zahtijeva postizanje fizičkog kontakta s ukopanim objektom, dakle i minom. Detekcija pipalicom je pouzdana, ali izrazito spora i riskantna tehnika [3, 4]. Nakon što je objekt detektiran pristupa se njegovom iskopavanju, kojem dodatno može prethoditi primjena druge tehnike detekcije, u pravilu primjene detektora metala.

Detektori metala otkrivaju prisustvo metalnih predmeta putem elektromagnetske indukcije. Današnji detektori metala dovoljno su osjetljivi da otkrivaju mine s relativno malim sadržajem metala. Međutim, u režimu rada visoke osjetljivosti detektori metala su u pravilu vrlo neučinkoviti zbog toga što bez razlikovanja detektiraju svaki metalni predmet u blizini ispitivanog područja. To dovodi do velikog broja lažnih dojava, što usporava razminiranje. U detekciji primjenom detektora metala, pirotehničari nisu u izravnom kontaktu s ukopanom minom, ali se nalaze relativno blizu, zaštićeni također samo zaštitnim odijelom.

Psi tragači obučeni su za reagiranje na prisustvo para koje se stalno oslobađaju iz eksplozivnog punjenja mina, odakle različitim procesima dolaze na površinu tla. Osjetljivost njuha obučenih pasa nedosežljiva je pomoću danas proizvedenih uređaja za detekciju para eksploziva. Međutim, visoka osjetljivost pasa na prisustvo relativno rijetkih koncentracija para eksploziva u atmosferi ograničuje ovu tehniku na detekciju mina u relativno rijetko miniranim područjima. Dodatno, praksa pokazuje da je stanje miniranosti za relativno veliko područje nepoznato, tj. za područja znatne površine nije unaprijed jasno da li su minirana, ili ne. U tom slučaju primjenom pasa tragača može se izdvojiti područja na kojima nema mina. U ovoj tehnici detekcije pirotehničar je od područja ispitivanja, po kojemu se kreće pas, udaljen za dužinu vodilice. Ta udaljenost je manja od sigurne udaljenosti u slučaju aktiviranja mina, ali je veća od prosječne udaljenosti između pirotehničara i ispitivanog objekta u tehnici detekcije pipalicom i primjenom detektora metala.

U strojnom razminiranju mehanički se uništavaju mine u površinskom sloju tla, bilo udaranjem batova u tlo, bilo mljevenjem površinskog sloja tla. Mehaničko razminiranje u prosjeku je najbrži način razminiranja, u kojemu je pirotehničar zaštićeniji nego u navedenim tehnikama detekcije. Strojno razminiranje ograničeno je sastavom tla, reljefom i klimatskim uvjetima. Npr., neprikladno je u stjenovitim tlu, tlu znatnog nagiba. Za teške strojeve propadanje u vlažnom tlu je ograničavajući faktor. U Republici Hrvatskoj, razminiranje određenog područja se nikad ne provodi samo jednom tehnikom, nego bar s dvije tehnike,

npr. strojnim razminiranjem nakon čega slijedi detekcija pomoću pasa tragača, odnosno detekcija pomoću pipalice i detektora metala.

2.2. Infracrvena termografija

Temelj infracrvene termografije su toplinski tranzienti do kojih dolazi nakon izlaganja toplinskoj stimulaciji nehomogene strukture koja je početno u toplinskoj ravnoteži sa svojom okolinom. Tranzienti se očituju u vremenski ovisnim temperaturnim razlikama unutar strukture i na njenoj površini. Razlike u temperaturi T u kombinaciji s razlikama u površinskoj emisivnosti ε dovode do razlika u intenzitetu infracrvenog zračenja [7, 12 - 16]. Budući da je nositelj informacije o stanju ispitivane strukture zračenje, infracrvena termografija je beskontaktna metoda ispitivanja. Infracrvena termografija se može koristiti za određivanje razlika u emisivnosti na izotermnoj površini, razlika u temperaturi dijelova promatrane površine jednake emisivnosti, odnosno za određivanje kombiniranog utjecaja razlika u emisivnosti i temperaturi.

Pomoću razlika u emisivnosti površine nastoji se razviti tehnika detekcije mina postavljenih na površinu, kao i detekcije poteznih žica kao jedna od faza u detekciji mina u humanitarnom razminiranju [17]. Podloga takvog pristupa je razlika u iznosima emisivnosti glatke, polimerne ili metalne površine mine i emisivnosti prosječne površine tla. Dodatno, na glatkim površinama dolazi do izražaja promjena polarizacije reflektiranog infracrvenog zračenja.

Razlike u temperaturi dijela površine postoje u nestacionarnoj fazi toplinske izmjene. Njih se registrira u konfiguraciji aktivne ili pasivne termografije. Prikadnost aktivne termografije je mogućnost primjene u većem dijelu dana, relativno neovisno o lokalnim vremenskim prilikama. Nedostatak aktivne termografije je u većim logističkim zahtjevima, koji se odnose na korištenje izvora napajanja grijalica na terenu. Odsustvo takvih zahtjeva je prikladnost pasivne termografije. Nedostaci pasivne termografije su ograničenost primjene na područja relativno velikog prosječno primljenog Sunčevog zračenja, te mogućnost primjene samo u trenucima kad su postignute toplinske prijelazne pojave u tlu. U prosjeku su dva takva intervala trajanja od po pola sata tijekom dana, u jednom je mina relativno zagrijana u odnosu na tlo a u drugom obrnuto. Dodatni problem je što se vremenske ovisnosti svojstava tla očituju u vremenskim intervalima znatno većim od karakterističnih trajanja procesa izmjene topline uz koje se veže termografsko ispitivanje.

3. MODELIRANJE

Model koji uzima u obzir svojstva tla i atmosfere bitna za otkrivanje ukopanih objekata primjenom termografije postavlja se za relativno suha i homogena tla, oskudne vegetacije. U tom smislu je model izravno primjenjiv za opis izmjene topline u pješčanim i vapnenačkim tlima.

Model se postavlja uzimajući u obzir pretpostavljenu izvedbu – poznato trajanje i jakost toplinske pobude reda veličine 20 min, odnosno $10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Trajanje djelovanja pobude utječe na veličinu dijela tla u kojemu se zapažaju toplinski učinci, a jakost utječe na pozitivne iznose temperaturnih gradijenata.

Temperaturna se raspodjela određuje primjenom trodimenzijskog nestacionarnog modela izmjene topline, temeljenog na metodi kontrolnih volumena [7, 10, 15]. Polazište je diferencijalna jednačina trodimenzijskog, nestacionarnog provođenja topline u pravokutnim koordinatama

$$\rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + \phi, \quad (3)$$

u kojoj je $\theta(x, y, z, t)$ prostorno i vremenski ovisno temperaturno polje, ϕ narinuti toplinski tok, a svojstva materijala opisana gustoćom ρ , specifičnim toplinskim kapacitetom c i koeficijentom toplinske vodljivosti λ . Implicitnom diskretizacijom jednadžbe (3) dobiva se

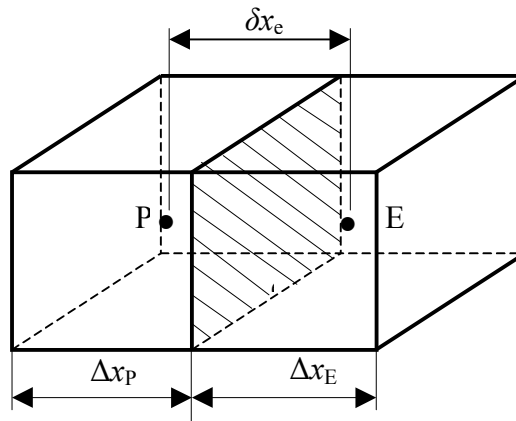
$$a_P \vartheta_P = a_E \vartheta_E + a_W \vartheta_W + a_N \vartheta_N + a_S \vartheta_S + a_T \vartheta_T + a_B \vartheta_B + b. \quad (4)$$

Koeficijenti $a_P, \dots, a_B$ u jednadžbi (4) definirani su prema dimenzijama odgovarajućih kontrolnih volumena i pripadajućih im koeficijenata toplinske vodljivosti. Ako se jednadžba (4) napiše za svaki kontrolni volumen dobiva se niz algebarskih jednadžbi čijim se rješavanjem dolazi do vrijednosti temperatura svih kontrolnih volumena u promatranom vremenskom trenutku.

Mreža kontrolnih volumena postavljena je tako da su mjesta većih temperaturnih gradijenata ujedno i mjesta na kojima je mreža gušća. Lokalno povećanje broja kontrolnih volumena vodi na dobivanje preciznije temperaturne raspodjele.

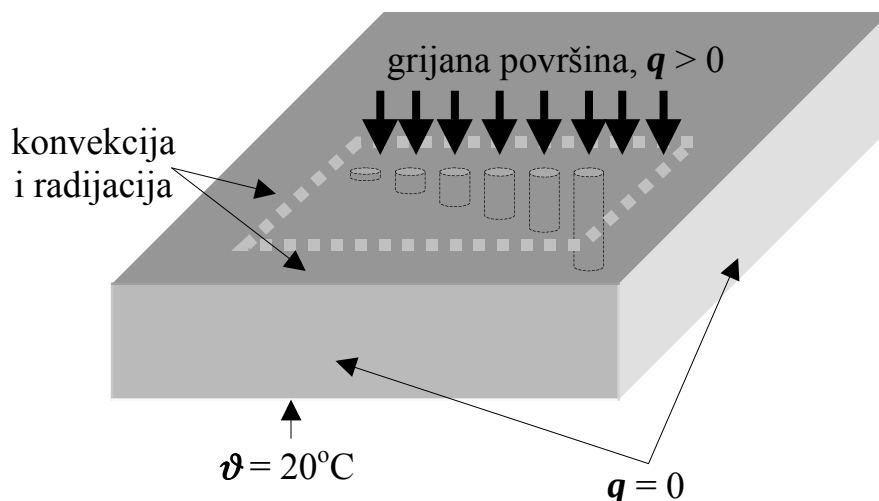
Ukopani su objekti nehomogenosti u strukturi osnovnog materijala (pijesak). U analizu ih se uvodi promjenom svojstava osnovnog materijala: gustoće, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti. U okviru pristupa pomoću kontrolnih volumena potrebno je odrediti efektivni koeficijent toplinske vodljivosti, λ_e , na promatranj duljini puta provođenja topline. On je određen iz zahtjeva jednakosti iznosa gustoća toplinskog toka određenih s jedne strane u homogenom materijalu koeficijenta toplinske vodljivosti λ_e na duljini puta δx_e , a s druge strane u nehomogenom materijalu koeficijenata toplinske vodljivosti λ_E i λ_P odabranih kontrolnih volumena P i E s pripadajućim duljinama provođenja topline, slika 1. Shodno tomu dolazi se do izraza

$$\lambda_e = \frac{1}{\frac{1-f_e}{\lambda_P} + \frac{f_e}{\lambda_E}}. \quad (5)$$



Slika 1. Model za proračun efektivnog koeficijenta toplinske vodljivosti λ_e .

Numeričko rješavanje trodimenzijskog nestacionarnog provođenja topline zahtijeva definiranje početnih i rubnih uvjeta. Rubni su uvjeti preuzeti iz eksperimentalnog dijela istraživanja i skicirani na slici 2. Početni je uvjet jednoliko protemperirani model poznate temperature.



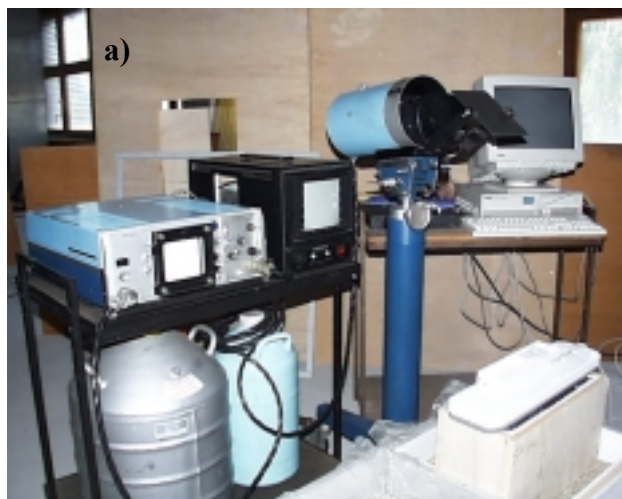
Slika 2. Model za proračun efektivnog koeficijenta toplinske vodljivosti λ_e .

4. EKSPERIMENTALNI POSTAV

Provedeni eksperimenti polaze od nekoliko zajedničkih postavki: (i) koristi se aktivna termografija, (ii) objekti se ukopavaju u pijesak, (iii) geometrija objekata je relativno jednostavna, (iv) stanje površine je kontrolirano. Uobičajeni eksperimentalni postav prikazan je na slici 3a. On obuhvaća termografsku kameru AGA 680 hladenu tekućim dušikom i računalom upravljano očitavanje temperatura pojedinih točaka na koje su postavljeni termoparovi. Ukopani objekti, slika 3b, su uobičajeno postavljani kao što je prikazano na slici 4 za slučaj homogene površine, odnosno na slici 5 za slučaj kontrolirane nehomogenosti površine. Objekti su cilindri različitog promjera i visine, izrađeni od konstrukcijskog čelika, aluminija ili polimera - polietilena ili polipropilena. Nehomogenost površine je ostvarena u obliku pokrova koji se sastoji od aluminijskih listića kvadratnog oblika, duljine stranice 5 mm. Parametar površine s pokrovom je faktor pokrivenosti, koji je jednak omjeru ukupne površine pokrova i ukupne površine prekrivanog dijela tla.

Mjerenja temperature omogućavaju uočavanje vodećih procesa vođenja topline, npr. zagrijavanje pijeska iznad objekta, zagrijavanje objekta na račun hlađenja pijeska iznad njega, hlađenje objekta i zagrijavanje pijeska iznad njega, te hlađenje pijeska slobodnom konvekcijom i zračenjem u okolinu. Stanje ispitivanog dijela tla u određenom trenutku reprezentira se termogramom površine iznad objekata. Termogrami se bilježe samo tijekom hlađenja ako im je relativno povoljan trenutni termalni kontrast, relativna razlika promatrane temperature u odnosu na temperaturu referentne točke u istom trenutku. Pokazuje se da je trajanje razdoblja temperaturnih promjena tijekom kojih je moguće postići relativno povoljan trenutni temperaturni kontrast na površini podjednako trajanju zagrijavanja.

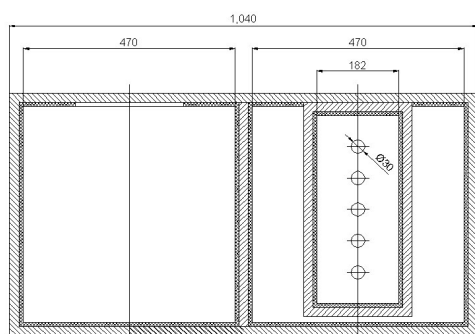
Ako je zagrijavanje intenzivnije, visoke temperature tla postižu se relativno brzo, pa cijeli postupak traje relativno kratko. Međutim, zbog relativno sporih procesa vođenja topline obzirom na zračenje topline, razlike u toplinskim svojstvima ispod površine tla ne dolaze do izražaja. Naprotiv, kod manje intenzivnog grijanja, postupak traje dulje, ali razlike u toplinskim svojstvima više dolaze do izražaja. Granica u smanjivanju intenziteta je zagrijavanje intenzitetom jednakim onom od Sunčevog zračenja. Dakle, obzirom na intenzitete zagrijavanja i pripadno trajanje u aktivnoj termografiji se nastoji optimirati kontrast površine iznad ukopanih objekata i trajanje postupka zagrijavanja i promatranja hlađenja površine.



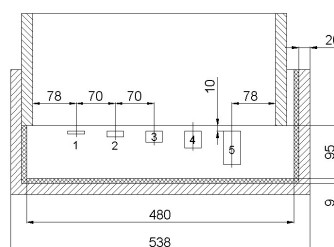
Slika 3. a) Eksperimentalni postav, b) upotrebljavani objekti.

Toplinska svojstva pijeska mogu se kretati u relativno širokom opsegu, a dodatno ovise o količini prisutne vlage. Zbog toga se može dogoditi da u istoj ispitnoj konfiguraciji ukopani objekti jednom imaju veće, a drugi put manje toplinske kapacitete od okolnog tla.

a)

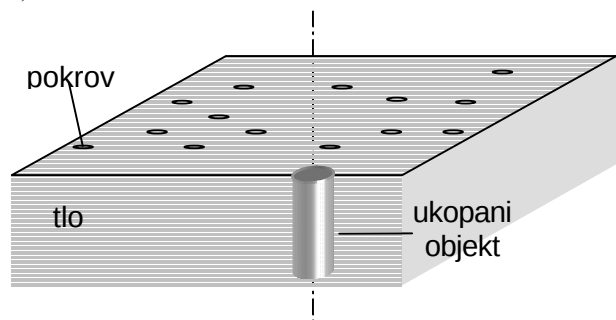


b)



Slika 4. Prikaz postavljanja ukopanih objekata za slučaj pet ukopanih objekata u jednom toplinskom ciklusu. a) tlocrt postava, b) slučaj s uzorcima viisine 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm i 60 mm redom.

a)



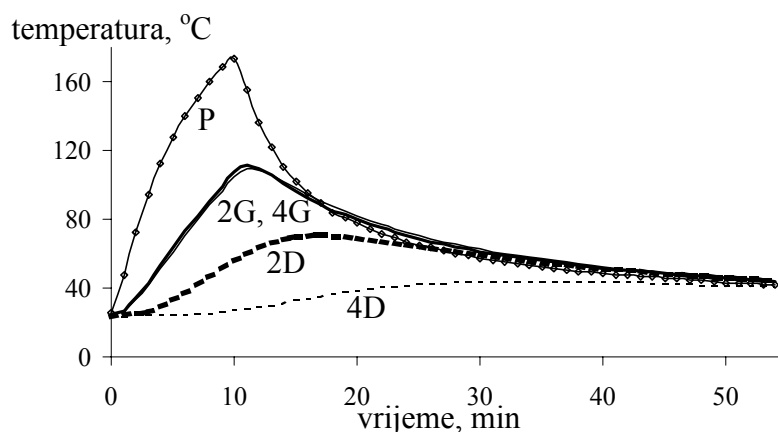
b)



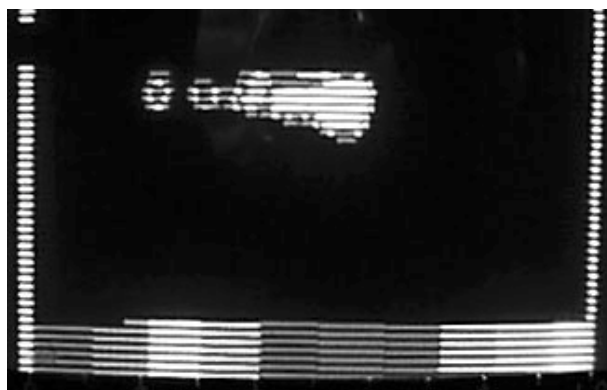
Slika 5. Ispitni postav koji se sastoji od objekta postavljenog ispod površine s nehomogenim pokrovom, a) skica postava, b) izgled površine.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

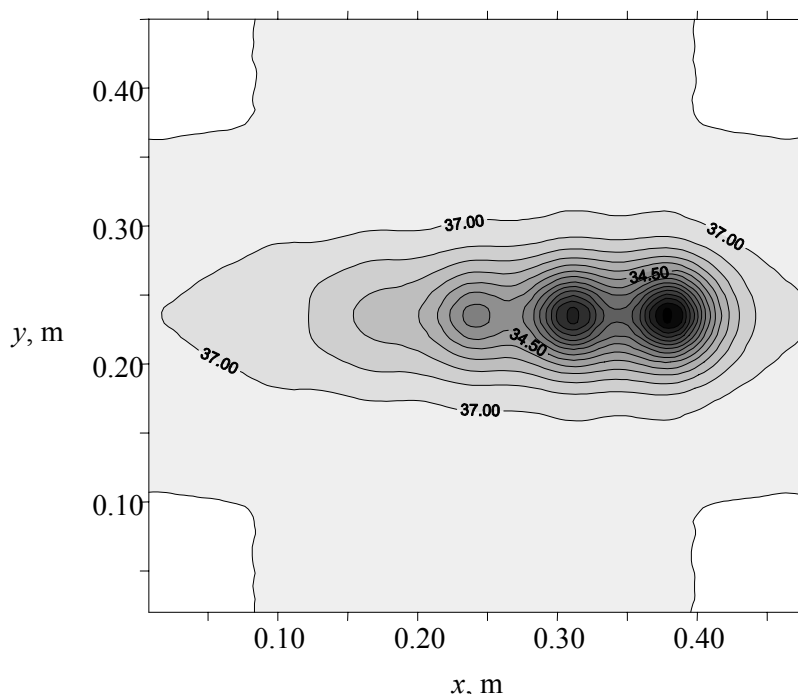
Za konfiguraciju objekata prikazanu na slici 4, registrirana vremenska ovisnost temperature prikazana je na slici 6. Rezultati pokazuju da je površinska temperatura (graf P na slici 6), od koja je određivana na površini tla na polovici udaljenosti između objekata 2 i 3, znatno veća temperatura na određenoj dubini u tlu. Dodatno, između temperatura na gornjim plohama objekata 2 i 4 nema značajne razlike (tijekom grijanja, graf 4G pokazuje neznatno veće temperature od grafa 2G na slici 6). Temperature točaka udaljenijih od površine, osim što se mijenjaju u manjem rasponu, maksimalnu vrijednost postižu kasnije nego točke bliže površini. Nakon što se sustav hladi otprilike onoliko koliko je bio zagrijavan, temperature svih točaka na dubini 10 – 20 mm su praktički jednake. Detaljniji uvid u rezultate pokazuje da su u određenom intervalu tijekom hlađenja točke 2G i 4G, odnosno točka 2D veće temperature nego površina. To je posljedica višestrukih procesa kondukcije u tlu. Karakteristični termogram površine prikazan je na slici 7. Rezultati numeričke simulacije tog slučaja prikazani su na slici 8. Usporedbom slika 7 i 8, vidljivo je kvalitativno slaganje. Promjena temperature površine veća je iznad većih objekata. Njihov je toplinski kapacitet veći, zbog čega djeluju kao jači toplinski ponori tijekom faze zagrijavanja površine. Tijekom relativno kratkog trajanja hlađenja, kao na slikama 7 i 8, oni i dalje djeluju kao toplinski ponori. Različite rezolucije termokamere i prikaza termograma, slika 7, u odnosu na razlučivost mreže kontrolnih volumena, slika 8, potiskuju detaljnije slaganje.



Slika 6. Vremenska ovisnost temperature u slučaju postava ukopanih objekata kao na slici 4. Temperature su mjerene na gornjim (G) i donjim (D) plohama objekata rednih brojeva 2 i 4. Ujedno je mjerena temperatura površine (P).



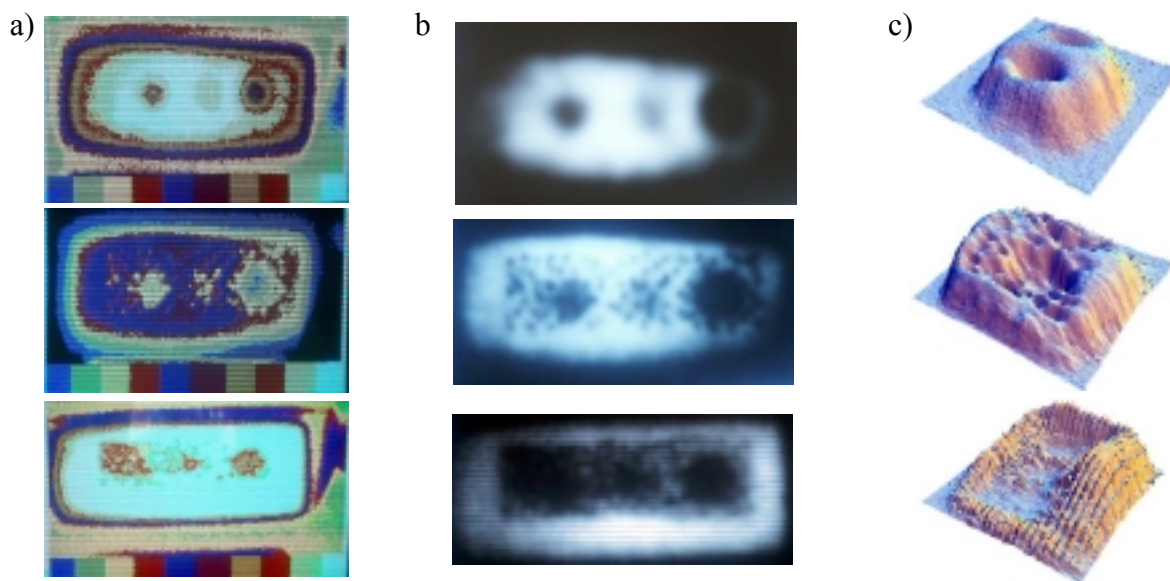
Slika 7. Termogram površine grijanog pravokutnika u situaciji kao na slici 4. Termogram je snimljen 120 s nakon završetka grijanja s toplinskim tokom od $12 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ u trajanju od 600 s. Temperaturna razlika između bliskih temperaturnih razina iznosi nekoliko desetinki K. Dva razlučiva objekta na termogramu su objekti br. 1 i 2 na slici 4.



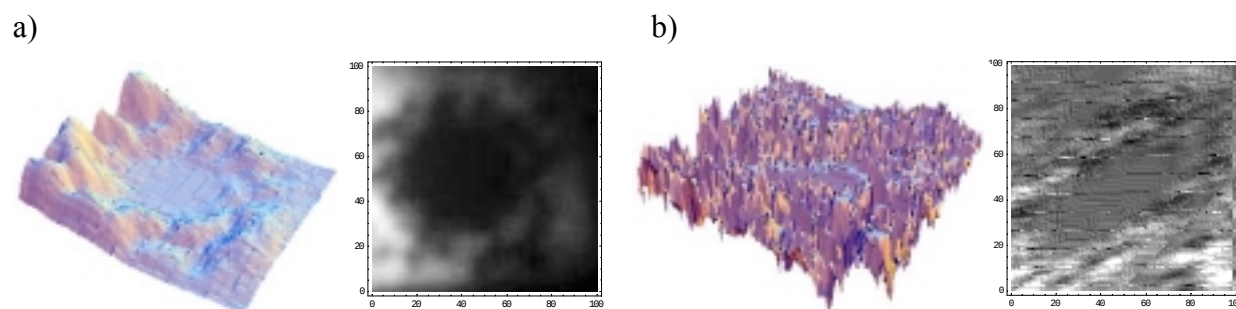
Slika 8. Rezultati numeričke simulacije za postav objekata kao na slici 4 tijekom hlađenja. Iscrtane linije su izoterme s označenom temperaturom.

Izravno iz slika 9., 10. i 11. slijedilo bi da je pokrov hladniji od ostatka tla. Međutim, to je posljedica relativno male emisivnosti metalnih listića, koji su u protemperiranom stanju jednake temperature kao i njihova neposredna okolina. Zahtjevi na primjenjivost analize nezavisnih komponenti su [18] (i) nezavisnost svih komponenti, (ii) broj nezavisnih načina registracije jednak broju nezavisnih komponenti. Nezavisnost svih komponenti približno je ispunjena. Termalni odziv ukopanih objekata je utjecao na temperaturnu raspodjelu pokrova, tako da termalni šum i odziv ukopanih objekata na termogramima nisu bili u potpunosti nezavisni u primijenjenoj ispitnoj konfiguraciji, što je utjecalo na kvalitetu rezultata dobivenih analizom nezavisnih komponenti. Grafovi na slici 10.b. pokazuju da je rezultat analize nezavisnih komponenti, isključi li se po dijelovima izometrijska transformacija termograma što je posljedica kodiranja slike za potrebe analize, pojačavanje razine šuma u području

termograma u kojem nema odziva ukopanih objekata. Takva je raspodjela šuma posljedica razdvajana nezavisnih komponenti.

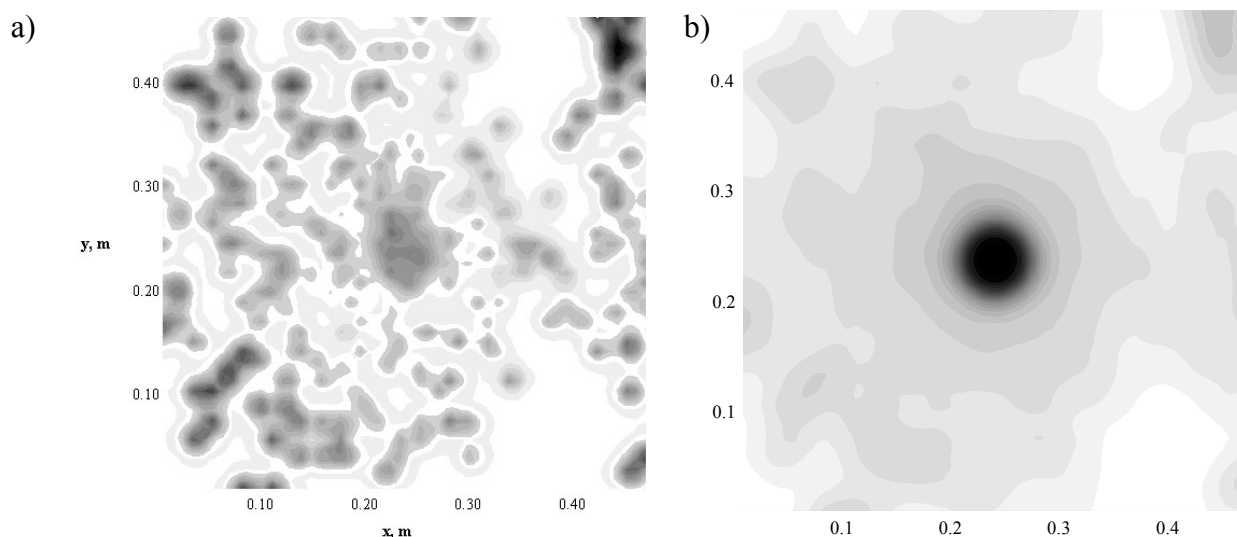


Slika 9. Termogrami ukopanih objekata uz pokrov na površini, a) kolorirani prikaz, b) prikaz moda intenziteta, c) topografski prikaz. Faktor pokrivenosti od gornjeg prema donjem redu iznosi 0, 0,1 i 0,3.



Slika 10. Termogrami objekta ukopanog na dubini 7 mm, uz faktor pokrivenosti jednak 0,1. a) prije i b) nakon analize nezavisnih komponenti.

Numerička simulacija u skladu je s rezultatima eksperimenta. Dodatno, pomoću numeričke simulacije ispitivanja stanja tla primjenom termografije moguće je uočiti interval optimalnog termalnog kontrasta, kao i detaljna svojstva toplinskog odziva pokrova. Preciznost simulacije premašuje rezoluciju korištene opreme, što omogućuje učinkovitije optimiranje procesa detekcije.



Slika 11. Modelirana površinska raspodjela temperature za slučaj 300 s dugog grijanja i faktor pokrivenosti jednak 0,1. Uzorak oblika cilindra je ukopan na osi kroz sredinu slike. a) trenutak prestanka grijanja, b) 300 s hlađenja.

6. SMJERNICE DALJNJEG RADA

U dosadašnjem radu određivani su iznosi utjecajnih varijabli - trajanja grijanja i toplinskog toka, u ovisnosti o materijalu i dubini ukopavanja objekta, za određenu vrstu tla i materijal objekta. Određene su karakteristične vrijednosti i relacije između navedenih veličina.

Budući da je u dosadašnjem radu eksperimentalni postav bio gotovo bez varijacija u postavljenim parametrima, u daljnjem radu proširuje se postav kontroliranim uvođenjem izvora šuma na termogramima. Izvori šuma nalaze se u variranju parametara postava, poput variranja nagiba osi objekta u odnosu na lokalnu okomicu na tlu, i dodavanja komadića materijala na površinu do zadanog stupnja pokrivenosti. Variranje relativnog položaja objekta u odnosu na površinu tla realni je slučaj, do kojeg dolazi slučajno zbog dinamike tla, odnosno namjerno prilikom postavljanja mina kako bi se otežali njihovo uklanjanje. Heterogenom površinom reprezentira se prisustvo vegetacije. Iako se prilikom humanitarnog razminiranja površine prije detekcije mina pripremaju tako da im se ukloni veći dio vegetacije, preostali dio i dalje djeluje kao nehomogenost sa stajališta primjene infracrvene termografije. U opisanim promjenama i dalje se koristi jednaki način toplinskog pobuđivanja tla. Način pobuđivanja izravno utječe na razinu nezavisnosti toplinskog odziva ukopanog objekta od toplinskog šuma površinskog pokrova. Uvođenjem vremenski profiliranog grijanja tu je neprikladnost moguće ukloniti. Kvaliteta rezultata analize nezavisnih komponenti povećava se i uvođenjem istovremenog snimanja ispitne površine pomoću dvije termokamere.

Dobiveni rezultati pokazuju dosege primjene termografije za unaprijeđenje problema detekcije ukopanih mina u okviru humanitarnog razminiranja. Upotrebljivost opisane tehnike u terenskim uvjetima za sada se još ne može precizirati. Razlog tomu je relativna neprofiliranost primjenjene tehnike aktivne infracrvene termografije. Sigurno je da termografija u pravilu ne može biti samostalna metoda, nego dio sustava više tehnika detekcije. U takvom sustavu rezultate primjene termografije potrebno je na razini posebne opreme i posebne programske podrške prilagoditi završnom određivanju prisustva i vrste ukopanog objekta u određenom tijelu tla.

7. LITERATURA

- [1] International Campaign to Ban Landmines, Landmines Monitor Report 2001, Landmine Monitor Core Group, USA, 2001,
- [2] Kingsbury, N.: *Land Mine Detection DOD's Research Program Needs a Comprehensive Evaluation Strategy*, US GAO Report, GAO-01 239, 2001,
- [3] Krstelj, V.; Stepanić, J.; Leljak, I.: *Evaluation and Certification of Humanitarian Demining Detection Equipment*, Journal of Mine Action 4.1, Spring 2000., str. 60-61,
- [4] Krstelj, V.; Stepanić, J.: *Humanitarian de-mining detection equipment and working group for antipersonnel landmines detection*, INSIGHT, Vol. 42(3), 2000., str. 187-190,
- [5] Bruschini, C.; Gros, B.: *A Survey of Current Sensor Technology Research for the Detection of Landmines*, International Workshop SUSDEM '97, Zagreb, Zbornik, 1999., str. 6.18-6.27,
- [6] Georgson, M.; et al.: *Mine Detection Using Infrared Imaging Technique*, International Conference MINE'99, Firenze, Zbornik, 1999., str. 66-71,
- [7] Andrassy, M.; Švaić, S.; Boras, I.: *Development of Applied Thermographic Methods*, International Congress SITHOK 4, Maribor, Zbornik, 2000., str. 48.1-48.7,
- [8] Krstelj, V.; Švaić, S.; Stepanić, J.; Malinovec, M.: *NDT Methods in Landmines Detection*, International Conference Defektoskopie '99, Hradec Kralove, Zbornik, 1999., str. 251-256,
- [9] Boras, I.; Švaić, S.: *Example of use of numerical simulation to help NDT experimental procedure*, Quantitative InfraRed Thermography 5 – QIRT 2000, Reims, Zbornik, 2000, str. 242 – 246,
- [10] Boras, I.; Švaić, S.: *Characterisation of subsurface defect by means of thermography and 3D numerical model*, SPIE 2001, Orlando, USA, Zbornik, SPIE Vol. 4360, str. 516 – 523,
- [11] Krstelj, V.; Stepanić, J.: *Non-Destructive Testing in Antipersonnel Landmine Detection*, International Conference MATEST '99, Cavtat, Zbornik, 1999., str. 109-115,
- [12] Pregowski, P.; Swiderski, W.: *Application of IR Thermography for the Detection of Buried Mines – Prediction and Procedures*, International Conference MATEST '99, Cavtat, Zbornik, 1999., str. 227-232,
- [13] Pregowski, P.; Swiderski, W.; Walczak, R.: *Surface and volume effects in thermal signatures of buried mines: experiment and modeling*, Quantitative InfraRed Thermography 4 - QIRT '98, Lodz, Zbornik, 1998., str. 233-238,
- [14] Schachne, M.; et. al.: *Mine Detection by Means of Dynamic Thermography: Simulation and Experiments*, IEEE 2nd International Conference on the Detection of Abandoned Landmines '98, Edinburgh, Zbornik, 1998., str. 124-128,
- [15] Boras, I.; Malinovec, M.; Stepanić Jr., J.; Švaić, S.: *Modelling of buried object detection using thermography*, Quantitative InfraRed Thermography 5 – QIRT 2000, Reims, Zbornik, 2000, str. 176 – 181,
- [16] Boras, I.; Malinovec, M.; Stepanić Jr., J.; Švaić, S.: *Requirements for using thermography in buried object detection*, 12th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry THERMO, Budimpešta, Zbornik, 2001, str. 157 – 160,
- [17] Kursat Sendur, I.; Johnson, J. T.; Baertlein, B. A.: *Analysis of polarimetric IR phenomena for detection of surface mines*, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets, Orlando, SPIE Vol. 4394, 2001, str. 153 – 163,
- [18] Hyvärinen A., Oja E.: *Independent Component Analysis: A Tutorial*, Neural Networks, 13(4-5), str. 411-430, 2000. Dostupno na <http://www.cis.hut.fi/projects/ica>.