

# PRIRUČNIK ZA IZRADU BETONA I OPEKE POBOLJŠANE OTPORNOSTI NA PRODOR EM ZRAČENJA

Projekt: Razvoj i primjena naprednih građevinskih materijala za izgradnju zdravih zgrada: zaštita od neionizirajućeg zračenja-Z2grade

Nositelj projekta:  
Građevinski i arhitektonski fakultet u Osijeku

LIPANJ 2023.

Sufinancirano od strane operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014.-2020. - Europski fond za regionalni razvoj

## PARTNERI:



# 1. PROJEKTNIA IDEJA

---

Projektna ideja započela je istraživanjem tržišta tvrtki koje se bave proizvodnjom glinenih opeka i predgotovljenih betonskih građevinskih elemenata, te smo došli do spoznaje kako na tržištu RH trenutno ne postoje gotovi građevinski proizvodi kojima bi se postigla učinkovita zaštita od elektromagnetskog zračenja. Na temelju brojnih studija utjecaja elektromagnetskih polja (EMP) na ljudsko zdravlje, mnoge države u svijetu reagirale su novim propisima i zakonima kojima se ograničavaju razine EMP i uvode posebni zahtjevi u pogledu njihovih izvora. Prema klasifikaciji Svjetske zdravstvene organizacije (WHO), 2011. godine radiofrekvencijska elektromagnetska polja svrstana su u grupu mogućih uzročnika karcinoma mozga, a Vijeće Europe je svojom rezolucijom 1815 usvojenom iste godine pozvala sve europske vlade da poduzmu sve razumne mjere kako bi se smanjila izloženost EMP-u. Ono što ova rezolucija posebno naglašava jeste da je potrebno posebnu pažnju obratiti na osjetljive skupine društva (djeca i mladi). Također se naglašava u istoj rezoluciji da je potrebno smanjiti izloženost u prostorima na 0.6 V/m, s ciljem konačnog smanjenja na 0.2 V/m.

Ovi napredni materijali su temelj za izgradnju stambenih, javnih i poslovnih objekata sa izuzetno niskim nivoom jakosti elektromagnetskog polja što se odražava na povećanje nivoa zaštite zdravlja stanovništva (zaštite od EMZ), posebno najosjetljivijih skupina: djeca, trudnice, bolesnici i starije osobe. I u RH ovo je područje zakonski regulirano Zakonom o zaštiti od neionizirajućeg zračenja (NN br.91/2010) i Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja (NN br. 146/2014) kojima se propisuju granične razine EMP s frekvencijama do 300 GHz. Ovaj projektni prijedlog rezultirati će izradom naprednog građevinskog materijala čija će primjena u gotovim betonskim i glinenim elementima konstrukcije omogućiti veliku apsorpciju elektromagnetskog zračenja, te utječe na područje zaštite okoliša važno za održivi razvoj: zaštitu zraka kao čimbenik zdravlja i kvalitete života.).

***POČETAK PROJEKTA: 20. 12. 2019.***

***ZAVRŠETAK PROJEKTA: 20. 6. 2023.***

## 2. BETONSKI ELEMENTI

---

### 2. 1. Opis sistema

Namjena meta materijala koji će biti prikazan u nastavku jest visokoučinkovita zaštita od elektromagnetskog zračenja, uz zadovoljenje zahtjevanih svojstava nosivosti i uporabivosti. Opisani meta materijal osmišljen je na temelju izračuna i dimenzijskog i parametarskog prilagođavanja dimenzija mikrorezonatora. Prilikom osmišljavanja sistema zaštite, analizirani su meta i semi-meta materijali sa SRR česticama različitih dimenzija radi osiguravanja širokopojasne apsorpcije EM energije. Nakon definiranja dimenzija i karakteristika mikrorezonatora na temelju računalnih simulacija, izrađeni su testni armiranobetonski blokovi s ugrađenim mikrorezonatorima. Ovakav sustav planiran je za korištenje u armiranobetonskim pločama i zidovima. Meta materijal sastoji se od samozbijajućeg betona dostatne čvrstoće, armaturne mreže i mikrorezonatora. Sastav samozbijajućeg betona prikazan je u tablici 1, dok su svojstva kemijskih dodataka prikazana u tablici 2

*Tablica 1. Sastav samozbijajućeg betona*

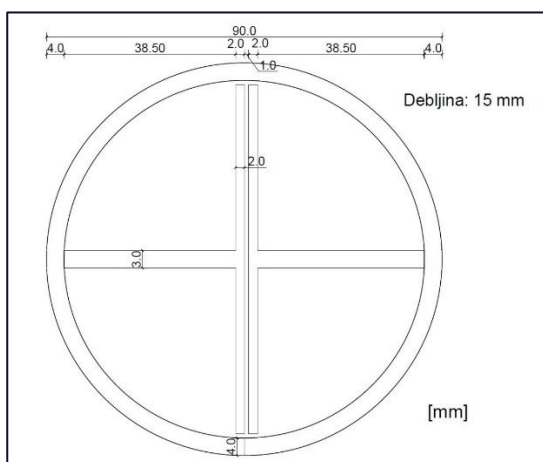
SAMOZBIJAJUĆI BETON – M0		Masa za 1 m <sup>2</sup> (kg)	
		%	(kg)
<b>Cement</b>	CEM II 42,5R (GRAND Nexe)	-	450,0
<b>Filer</b>	Dolomitno brašno	-	80,0
<b>Voda</b>	Voda iz slavine	-	180,0
<b>Vodocementni omjer</b>	0,40	-	
<b>Kemijski dodatci</b>	Energy FM 500 (SP)	1,00 %	4,50
	Premadd Stabilisator X (VMA)	0,25 %	1,13
<b>Agregat</b>	0-2 mm – riječni pijesat	20 %	325,52
	0-4 mm – dolomit	35 %	616,03
	4-8 mm – dolomit	20 %	363,38
	8-16 mm – dolomit	25 %	454,22
<b>Ukupno</b>			2474,78

**Tablica 2.** Svojstva kemijskih dodataka

Svojstvo	SP-Energy FM500	VMA-Premadd Stabilisator X
Oblik	Tekućina	Tekućina
Boja	Jantarna	Bijela
Gustoća (kg/L)	1,08 ± 0,02	1,04 ± 0,02
pH vrijednost	3,5 ± 2,0	7,0 ± 2,0

## 2. 2. Mikrovalni rezonatori

Mikrovalni rezonatori su elektromagnetske strukture koje mogu rezonirati na određenoj frekvenciji (odnosno opsegu frekvencija) u mikrovalnom području. Ovi rezonatori su, u ovom projektu, izvedeni kao prstenasti LC (induktivitet-kapacitet) rezonatori koji rezoniraju na frekvenciji  $f^2 = 1/(2\pi)^2 LC$ . U ovoj izvedbi zavojnica i kondenzator (induktivitet i kapacitet) načinjeni su kompaktno kao vodljivi prstenovi sa centralnim pločastim kondenzatorom. Radi osiguranja velike čvrstoće buduće strukture izvedeni su kao čelični prstenovi kvalitete čelika S235. Temeljna ideja korištenja ovih rezonatora za smanjenje propagacije EM vala kroz njih jest disipiranje energije EM vala u ciljanom frekvencijskom opsegu rezoniranja mikrovalnih rezonatora, budući da se pri rezoniranju realnih rezonatora znatan dio EM energije troši (budući da se osim L i C pojavljuju i disipativne komponente). Rezonatori su oblikovani u jednu planarnu periodičku strukturu u kojoj, osim osnovne rezonantne frekvencije (opsega) do izražaja dolaze i kapacitivnosti uslijed susjednih bliskih vodljivih prstenova što dodatno utječe (povećava) na frekvencijski opseg rada rezonatora. Ova struktura je bazirana na metamaterijalnim strukturama. Numeričkim proračunima u softveru Ansys HFSS analizirano je dvije vrste mikrovalnih rezonatora ( sa ekcentričnim unutarnjim prstenom i sa centralnim kondenzatom). Varirajući dimenzije, oblike i raspored odabrana je struktura sa centralnim kondenzatorom i definiran je konačan oblik. Dimenzije, 3D prikaz i izrađen mikrovalni rezonator mogu se vidjeti na slikama 1 i 2.

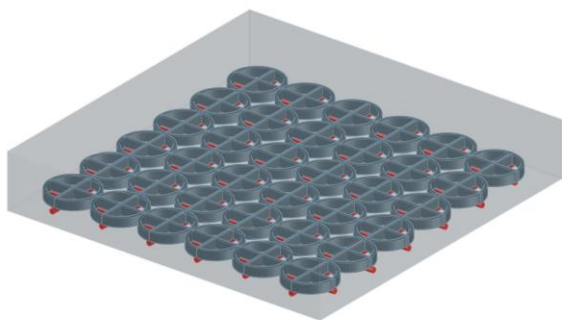


**Slika 1.** Dimenzije mikrovalnog rezonatora



**Slika 2.** Dimenzije mikrovalnog rezonatora

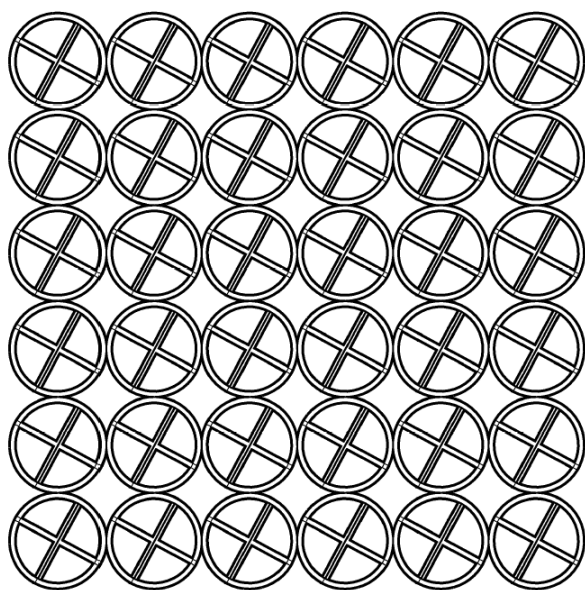
Prilikom izrade elementa s ugrađenim mikrovalnim rezonatorima, potrebno je mikrorezonatore postaviti jedan do drugog i od njih načiniti mrežu u kojem je svaki prsten okrenut u istom smjeru. Slike 5 i 6 prikazuju izradu apsorbera na primjeru betonskog bloka dimenzija 60 cm x 60 cm x 10 cm. S donje strane nakon zaštitnog sloja postavlja se armaturna mreža na koju se postavlja sustav mikrorezonatora. Mikrovalni rezonatori su međusobno povezani pomoću plastičnih „kopči“ izrađenih pomoću 3D printera.



**Slika 3.** Prikaz planarne periodičke structure (PPS) apsorbera (bazirane na meta-materijalnim apsorberima) na primjeru AB ploče



**Slika 4.** Poprečni presjek PPS apsorbera



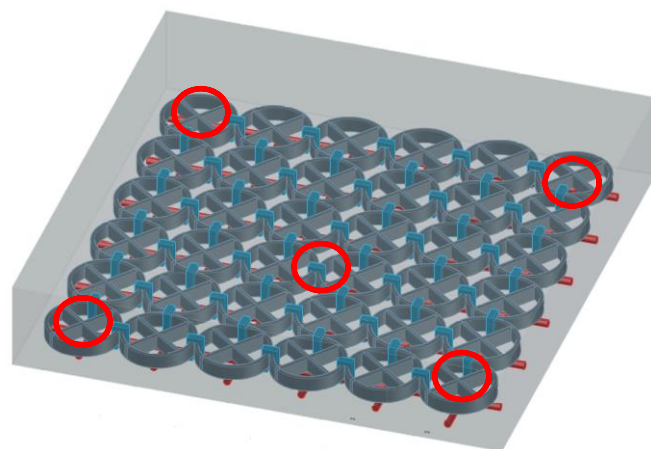
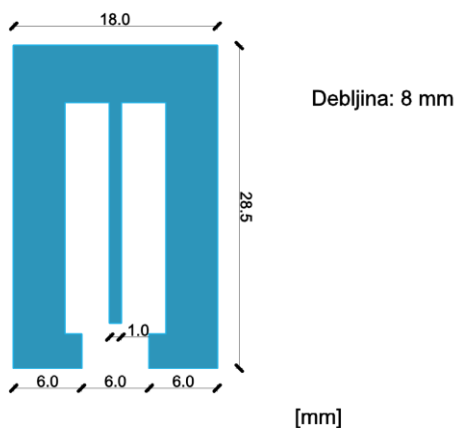
**Slika 5.** Shema slaganja mikrorezonatora



**Slika 6.** Postupak izrade betonskog bloka s PPS

### 2. 3. Sustav povezivanja mikrovalnih rezonatora

Međusobno povezivanje mikrorezonatora ostvareno je pomoću plastičnih kopči izrađenih u 3D printeru. Dimenzije plastičnih kopči prikazane su na slici 7. Kako bi se ostvarila željena zaštita, sustav mikrorezonatora (meta-materijal) i armaturna mreža ne smiju se dodirivati. Preporuka je koristiti drvene letvice koje će imati ulogu distancera (prikazano na slici 6.). Kako bi cijeli sustav ostao kompaktan nakon betoniranja, preporuča se povezivanje mikrorezonatora, drvenih distancera i armaturne mreže pomoću PVC plastičnih vezica (slika 9.). Povezivanje se preporuča u 5 točaka, na lokacijama označenim na slici 8.



**Slika 7.** Dimenzije plastičnih kopči

**Slika 8.** Prikaz sustava meta materijala zajedno s kopčama



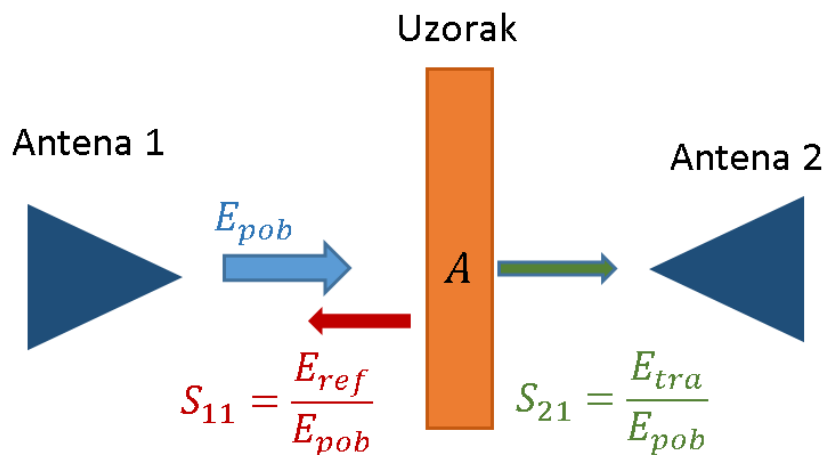
**Slika 9.** Prikaz sustava meta materijala zajedno s kopčama

## 2. 4. Način ugradnje betona

Prilikom ugradnje betona, potrebno je koristiti samozbijajući beton, bez vibriranja betona. Beton mora imati konzistenciju SF3 i razred viskoznosti VS1, prikladno za gusto složenu armaturu. Ugradnja se mora odvijati polako, kako bi postavljeni sustav mikrozonatora i armature ostao u položaju u kakvom je bio prije početka ugradnje.

2. 5. Transmisija, refleksija i apsorpcija energije EM vala pri prolazu kroz betonske elemente  
Provedenim mjerenjima direktno su mjerene vrijednosti parametara sprege (S-parametara; Slika 10.), a prigušenje je moguće odrediti iz izmjerenih vrijednosti koeficijenata transmisije ( $S_{12}$  i  $S_{21}$ ). Pri tome, je pretpostavljeno da parametri transmisije odgovaraju konstanti prigušenja što kod mjernih sustava otvorenog tipa predstavlja približne vrijednosti. ApSORPCija energije EM vala pri prolasku kroz materijal može se odrediti korištenjem relacije:

$$A = 10 \log[1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2] \quad - \text{relacija A}$$



**Slika 10.** Refleksija, transmisija i atenuacija (prigušenje) EM vala pri prolazu kroz materijal

Sva mjerenja parametara sprege provedena su u opsegu frekvencija od 30 MHz do 18 GHz. Konačni rezultati transmisije i refleksije (posredno - prigušenja) iskazuju se u odnosu prema parametrima transmisije i refleksije standardnog betona. Vrijednosti parametara transmisije i refleksije ostvarene ovakvim strukturama frekvencijski su ovisne. Naime, u opsegu od 30 MHz do 1 GHz maksimalno smanjenje parametra transmisije u odnosu na beton iznosi -24,2 dB na frekvenciji 763 MHz, u opsegu od 1 GHz do 18 GHz smanjenje parametra transmisije u odnosu na beton iznosi -21,3 dB na frekvenciji od 2.58 GHz, a od frekvencije 4.0 GHz nema nekog značajnog smanjenja parametra transmisije u odnosu na standardni beton. Parametri refleksije u ovim strukturama ne mijenjaju se značajno u odnosu na standardni beton u cijelom mjerenom frekvencijskom opsegu.

# 3. OPEČNI ELEMENTI

---

## 3.1. Opis sistema

Zbog osjetljivosti gline na pucanje prilikom pečenja, mikrorezonatori nisu primijenjivi za korištenje u glinenoj opeci. Kako bi se postigla učinkovita EM zaštita, zajedno s glinom biti će umiješani nanomaterijali koji će povećati EM prigušenje u odnosu na običnu opeku. Na temelju detaljne analize, kao najučinkovitiji dodatak usvojen je antimon kositar oksid (ATO) (slika 11). Riječ je o prahu plave boje, vrlo netopljivom i termički stabilnom izvoru aluminija pogodnom za staklene, optičke i keramičke primjene.

## 3.2. Antimon kositar oksid

Uvođenjem antimona u kristalnu strukturu kositar oksida rezultira novim spojem sa poboljšanim svojstvima. Utvrđeno je da uvođenje antimona u kristalnu strukturu kositara ne samo da mijenja njegovu boju, već i znatno utječe na druga fizikalna svojstva. Dopiranje (nadzirano uvođenje primjesa u poluvodič radi mijenjanja električnih svojstava) kositrenog oksida antimonom ima široke učinke. Jedna od najvažnijih prednosti dopiranja kositar oksida antimonom jest što se električni izolator kositreni oksid pretvara u poluvodljivi oksid. Na taj se način stvaraju preduvjeti za potencijalno uspješnu zaštitu antimon kositrenog oksida od elektromagnetsko zračenja. Uz povećanje električne provodljivosti dopiranjem dolazi i do promjene u optičkim svojstvima. Dolazi do snažne apsorpcije bliske infracrvene svjetlosti, a prozirnost u vidljivom području može se održavati u tankim filmovima. ATO čestice se najčešće sintetiziraju reakcijom u čvrstom stanju i metodom koprecipitacije.



*Slika 11. Antimon kositar oksid*



### 3. 3. Priprema uzoraka

Glineni materijal dobavljen je iz lokalne tvornice. Kako bi se glina i dodatak adekvatno pomiješali, glina je osušena i usitnjena do željene granulacije nakon čega se glina i dodatak miješaju dok se ne procjeni da je smjesa dovoljno homogena (slika 12 i 13). Nakon miješanja dodaje se voda kako bi se postigla željena obradivost (vlažna oko 20 %). Uzorci se zatim ukalupljuju i postepeno suše kako bi se izbjegle pukotine (slika 14). Zadnji korak prije pečenja je sušenje opeka u sušioniku na 105 °C kako bi se u potpunosti uklonila sva vlažnost. Posljednji korak izrade opeke je pečenje uzoraka. Uzorci su pečeni u lokalnoj tvornici na 900 °C.



**Slika 12.** Proces miješanja gline i dodatka



**Slika 13.** Smjesa gline i dodatka



**Slika 14.** Proces sušenja kompozitne opeke



**Slika 15.** Pečena kompozitna opeka

### 3. 4. Vezivo

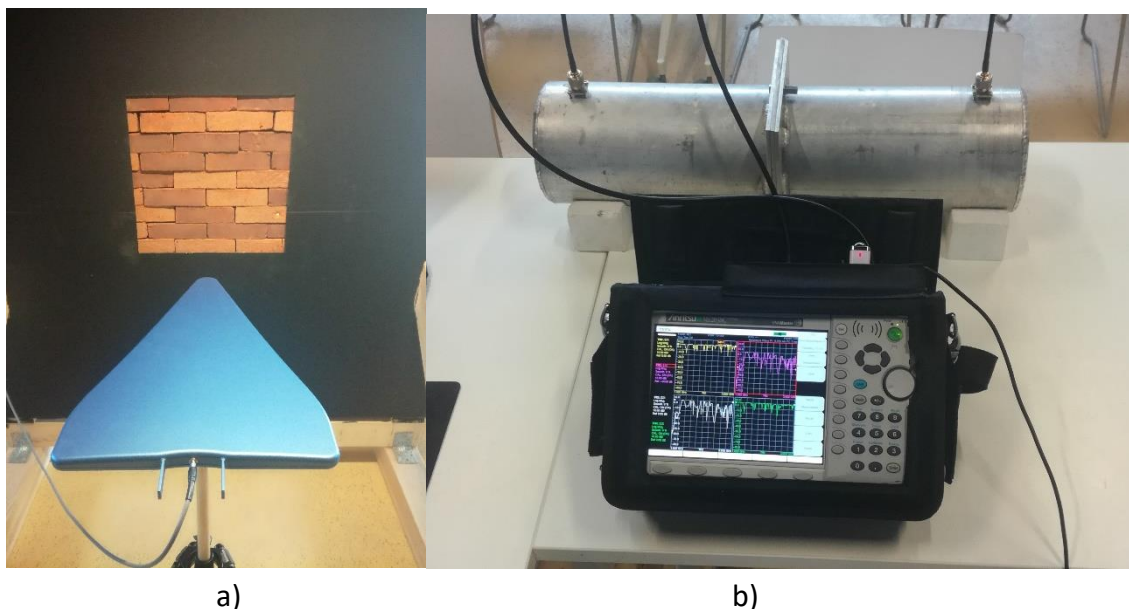
Umjesto klasičnog morta, kako bi se izbjegle „slabe točke“ u zidu, koristit će se lijepilo porothern drifix extra. Riječ je o ljepilu za brušenu opeku koje je vrlo jednostavno za rukovati i koji omogućuje bržu ugradnju u odnosu na standardno miješanje i nanošenje morta. Prije korištenja lijepila, potrebno je brušenjem osigurati ravne i glatke površine opeka.



**Slika 16.** Rezanje i brušenje opeke

### 3. 5. Transmisija, refleksija i apsorpcija energije EM vala pri prolazu kroz opečne elemente

Kao i kod betonskih elemenata provedenim mjerenjima direktno su mjerene vrijednosti parametara sprege (S-parametara). Prigušenje je moguće odrediti iz izmjerenih vrijednosti koeficijenata transmisije ( $S_{12}$  i  $S_{21}$ ). Naime, kod jednostavnih sustava kao što je valovodni sustav vrijednost parametra transmisije je praktički jednaka konstanti prigušenja. Ova konstanta govori o prigušenju amplitude EM vala pri prolasku kroz materijal. Apсорpcija u materijalu kroz koji EM val prolazi može se odrediti prema relaciji A navedenoj u poglavlju 2.5. Mjerenje je provedeno korištenjem valovodnog mjernog sustava uz relativno tanke uzorke (25 mm) te zaslonskog mjernog seta (otvor zaslona 600 x 600 mm – elektromagnetski neizoliran prostor) sa opekama standardnih dimenzija.



a)

b)

**Slika 17.** Mjerenje parametara sprege opečnih elemenata: a) zasloni mjerni set; b) valovodni mjerni set.

Mjerenja parametara sprege provedena su u opsegu frekvencija od 1,5 do 8 GHz. Konačni rezultati transmisije (prigušenja) i refleksije iskazuju se u odnosu prema parametrima

transmisije i refleksije standardne pečene glinene opeke (standardnih dimenzija i bez dodataka). Vrijednosti parametara transmisije i refleksije ostvarene ovakvim strukturama frekvencijski su ovisne. U mjerenom opsegu maksimalno smanjenje parametra transmisije u odnosu na standardnu opeku (glinu) iznosi -38,62 dB na frekvenciji 6,30 GHz pri mjerenju zaslonkim setom te -25,92 dB na frekvenciji 3,50 GHz pri mjerenju valovodnim setom (za kompozit sa dodatkom antimon kositar oksida). Parametri refleksije u ovim strukturama ne mijenjaju se značajno u odnosu na standardnu opeku u cijelom mjerenom frekvencijskom opsegu.

**Partneri:**

- 1.) Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku,
  - 2.) Odjel za kemiju, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku,
  - 3.) Odjel za matematiku, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku,
  - 4.) Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu
- Financiranje: Europski fond za regionalni razvoj

**Za dodatne informacije o projektu posjetiti web stranicu:**

<http://www.gfos.unios.hr/zgrade/razvoj-i-primjena-naprednih-gradevinskih-materijala-za-izgradnju-zdravih-zgrada>

**Za više informacija o EU fondovima posjetiti stranicu:**

[www.strukturnifondovi.hr](http://www.strukturnifondovi.hr)

Sadržaj publikacije/emitiranog materijala isključiva je odgovornost Građevinskog i arhitektonskog fakulteta u Osijeku.