

Ulaganje u znanost i inovacije

# Razvoj inovativnog sustava za zaštitu cjelovitosti konstrukcija na hrvatskim fakultetima

## ZaCjel



Europska unija  
Zajedno do fondova EU



**EUROPSKI STRUKTURNI  
I INVESTICIJSKI FONDOVI**



Operativni program  
**KONKURENTNOST  
I KOHEZIJA**

Projekt je sufinancirala Europska unija iz  
Europskog fonda za regionalni razvoj

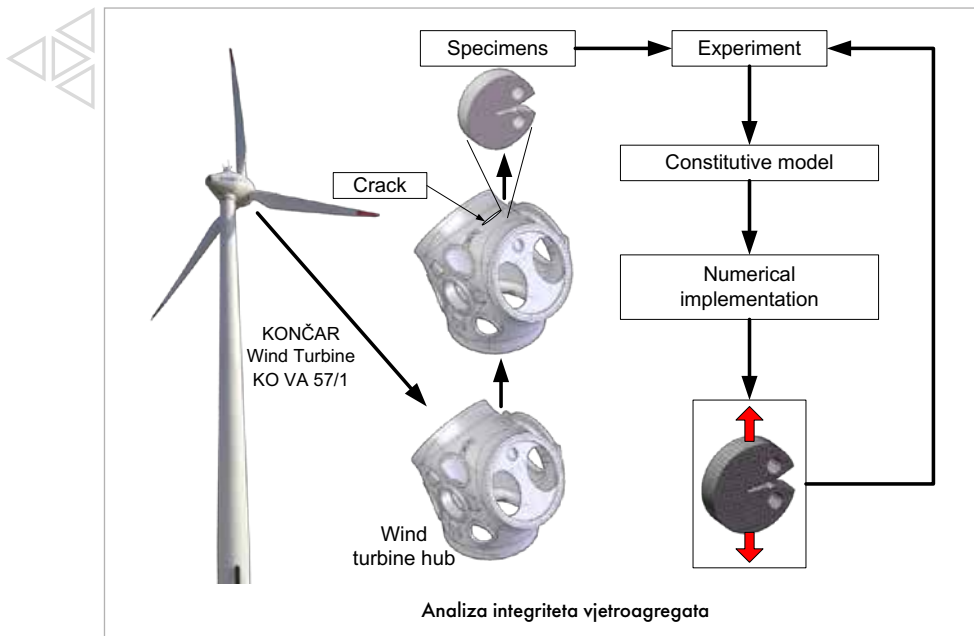


# ZaCjel

## Integrirani sustav nadzora i upravljanja - inteligentno rješenje razvijeno za industriju

Mehaničke konstrukcije postaju sve složenije, a zahtjevi koji se postavljaju pri projektiranju i eksploataciji u smislu učinkovitosti, sigurnosti i pouzdanosti predstavljaju sve veći izazov. Nosivost konstrukcija smanjuje se tijekom radnog vijeka zbog starenja materijala uslijed zamora, korozije, rupičenja i drugih degradacijskih mehanizama. Akumuliranje oštećenja i rast pukotina u materijalu može dovesti do gubitka integriteta, odnosno cjelovitosti pojedine komponente ili čitave konstrukcije. Ovisno o vrsti konstrukcije, takve pojave mogu imati katastrofalne posljedice. Sustavi za nadzor cjelovitosti konstrukcija (*eng. Structural Health Monitoring (SHM) systems*) osiguravaju njihovu sigurnost i pouzdanost, omogućuju projektiranje zahtjevnih dinamički opterećenih konstrukcija te smanjuju troškove upravljanja i održavanja. Takvi sustavi su automatizirani za kontinuirano praćenje stanja konstrukcije i detektiranje oštećenja uz minimalne intervencije. Među najvažnije zadaće SHM sustava spadaju detektiranje, lokalizacija i kvantifikacija oštećenja, uz procjenu preostalog radnog vijeka. Proteklih godina su razvijeni „inteligentni“, odnosno „aktivni“ sustavi, koji prikupljaju odgovarajuće odzive konstrukcije i reagiraju na unaprijed predviđeni način u zadanom vremenu. Ovi sustavi su sastavljeni od pasivnih i aktivnih elemenata, koji djeluju kao senzori i aktuatori.

Korištenje inteligentnih sustava za nadzor i upravljanje nužno je u energetske postrojenjima, transportnim i drugim sustavima u kojima su konstrukcijske komponente dinamički opterećene poput vjetroagregata, turbina, generatora, klipnih strojeva, dijelova procesnih postrojenja, cestovnih, pružnih i ostalih vozila, transporterata i slično. Osim toga, kako je zahtjevani radni vijek složenih dinamički opterećenih konstrukcija dosta dugačak, to zahtjeva primjenu naprednih numeričkih i eksperimentalnih metoda za što realniju simulaciju procesa deformiranja materijala, kao i za razvoj novih materijala s čim boljim mehaničkim svojstvima.



Unatoč potrebi i potražnji, trenutno na tržištu ne postoji proizvod koji industriji (u Hrvatskoj i šire) nudi objedinjeno rješenje za sustavni pristup očuvanju konstrukcija i njihovu što bolju eksploataciju već stručnjaci kombiniraju različite proizvode za nadzor i zasebno za upravljanje konstrukcijama.

Kako bi ponudili industriji jedinstveno rješenje, znanstvenici triju hrvatskih fakulteta (Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB), Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu (FER) i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci (GF-RI)) kroz provedbu projekta ZaCjel - *Zaštita cjelovitosti konstrukcija u energetici i transportu* razvijaju inovativni sveobuhvatni sustav nadzora i upravljanja dinamički opterećenim konstrukcijama za očuvanje njihove cjelovitosti, odnosno sprečavanje pojave oštećenja s ciljem povećanja njihove pouzdanosti, sigurnosti i radnog vijeka uz smanjene troškove održavanja.

Inteligentni sustav nadzora i upravljanja olakšat će korisnicima upravljanje konstrukcijama i postrojenjima. Potencijal za upotrebu u industriji je širok.

U suradnji s industrijom znanstvenici mogu razviti i proširiti inicijalnu primjenu sustava te ga kroz zajedničke projekte personalizirati i prilagoditi pojedinačnim potrebama.

# Znanstveno istraživanje

Interdisciplinarno istraživanje spoj je tri cjeline istraživačkih metoda s ciljem dizajniranja cjelovitog sustava za nadzor i upravljanje:

## 1. Određivanje trenutnog stanja cjelovitosti konstrukcijskih elemenata (dijagnostika) za što je potrebno:

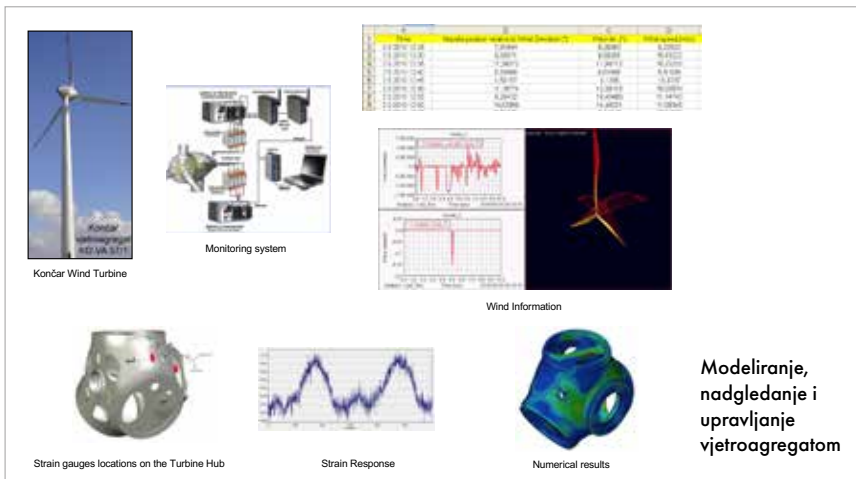
- ▶ Razviti algoritam za optimizaciju smještaja senzora i uzbuđivača vibracija sustava za monitoring
- ▶ Razviti potupak za detektiranje, lokalizaciju i kvantifikaciju zamornih oštećenja u laboratorijskim uvjetima.

## 2. Određivanje dopuštenih režima opterećenja konstrukcijskih elemenata na temelju procijenjenog stanja cjelovitosti s ciljem osiguranja definiranog radnog vijeka konstrukcijskih elemenata što uključuje:

- ▶ Eksperimentalno istraživanje zamornog ponašanja materijala
- ▶ Razvoj inverznih i statističkih modela za određivanje nepoznatih parametara modela iz rezultata mjerenja
- ▶ Razvoj numeričkih algoritama za modeliranje procesa deformiranja eksperimentalnih uzoraka i procjenu dopuštenih opterećenja i zamora konstrukcije.

## 3. Nadogradnja postojećeg sustava upravljanja s algoritmima koji se temelje na tehnikama predviđanja i matematičkog programiranja s ciljem očuvanja dopuštenih režima rada

- ▶ Validacija novog sustava za nadzor i upravljanje na laboratorijskim modelima
- ▶ Primjena sustava na realnim konstrukcijskim komponentama energetskih postrojenja i transportnih sredstava.



## Što sustav obuhvaća?



Struktura sustava za zaštitu cjelovitosti dinamičkih konstrukcija

## Što istraživački tim nudi industriji?

Terenska i laboratorijska mjerenja vibracija mehaničkih konstrukcija, monitoring stanja konstrukcija i postrojenja, projektiranje i izradu studija i proračuna čvrstoće, stabilnosti, integriteta konstrukcija i dinamike sustava, projektiranje sustava za upravljanje i zaštitu cjelovitosti konstrukcija te ostale djelatnosti vezane za grane industrije gdje je primarna djelatnost usko vezana uz dinamički opterećene konstrukcije.

## Konkurentne prednosti novog sustava:

- ▶ Povećanje učinkovitosti i pouzdanosti te produljenje radnog vijeka konstrukcija kroz točnije definiranje dopuštenih režima rada
- ▶ Učinkovitije praćenje pojave i rasta oštećenja u konstrukcijskim komponentama optimalnim smještajem senzora sustava za monitoring
- ▶ Unapređenje planova održavanja opreme
- ▶ Smanjenje troškova održavanja opreme
- ▶ Smanjenje potencijalnih troškova izazvanih zastojem u eksploataciji sustava.



## Upravljanje

Postojeći sustavi upravljanja za složene sustave s konstrukcijama dizajniraju se bez mogućnosti prilagodbe na trenutno stanje integriteta konstrukcije te bez mogućnosti prilagodbe s ciljem izbjegavanja velikih opterećenja koja konstrukcijama značajno smanjuju integritet.

Nadogradnja će se usredotočiti na korištenje informacija o dopustivim režimima opterećenja te o stanju konstrukcije kako bi se na postojeći algoritam upravljanja dinamičkim sustavom mogao nadograditi algoritam kojim se opterećenja čuvaju unutar dopuštenih granica. Uvest će se mogućnost provjere jesu li upravljački signali polaznog upravljačkog algoritma sustava takvi da će konstrukciju biti moguće sačuvati unutar zadanih režima rada.

Za dizajn nadogradnje koristi se metodologija prediktivnog upravljanja i robusnih invarijantnih skupova za dinamičke sustave.

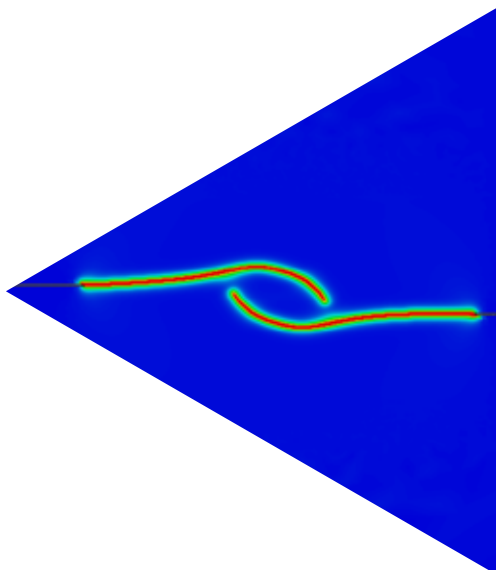
Poboljšani sustav upravljanja imat će mogućnost sprječavanja ekstremnih opterećenja u skladu s dopuštenim režimima opterećenja konstrukcije te mogućnost držanja gradijenta zamora u konstrukcijskim elementima unutar granica određenih dopuštenim režimima naprezanja.

Potvrđivanjem razvijenih algoritama dizajna nadogradnje sustava upravljanja bit će moguće osigurati projicirani radni vijek konstrukcije. Razmatraju se primjene na industrijskim primjerima iz područja energetike i transporta.

## Patentirana inovacija - finalni proizvod

Potencijalno intelektualno vlasništvo koje će proizaći iz rezultata projekta očekuje se u sljedećem:

- ▶ Metodologija za zaštitu cjelovitosti dinamički opterećenih konstrukcija
- ▶ Nadogradnja postojećeg sustava upravljanja s ciljem smanjenja gradijenta zamora u skladu sa zadanim dopuštenim režimima opterećenja konstrukcije
- ▶ Algoritam za optimizaciju smještaja senzora i aktuatora sustava za monitoring.



## Interdisciplinarni pristup partnera

Za projektiranje učinkovitog sustava za zaštitu cjelovitosti konstrukcije nužna je integracija dostignuća fundamentalnih znanosti (teorija automatskog i robusnog upravljanja, numeričke i eksperimentalne metode u mehanici, optimizacija, itd.), primjena i integracija suvremenih tehnologija (upravljački i mjerni sustavi), ispitivanja i znanost o materijalima, te srodnih područja.

Partnere okuplja postojeći Centar izvrsnosti za procjenu stanja konstrukcija – CEEStructHealth.

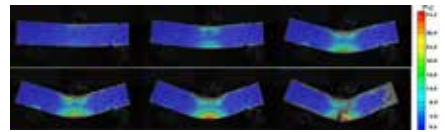
## Fakultet strojarstva i brodogradnje

Djelatnost istraživača FSB-a fokusirana je na provedbu numeričkih proračuna iz područja čvrstoće, stabilnosti, zamora materijala i konstrukcija, mehanike loma, modeliranja materijala, vibracija mehaničkih sustava i dinamike strojeva, kao i razvoja novih algoritama i metoda za navedene proračune. Do sada razvijeni algoritmi implementirani su u industriji u okviru više projekata s hrvatskim i međunarodnim tvrtkama.

Na projektu ZaCjel FSB provodi aktivnosti vezane uz eksperimentalno ispitivanje materijala, s ciljem razumjevanja zamornog ponašanja, ali i istraživanja mogućnosti primjene metode dinamičkog odziva za detektiranje, identifikaciju (lokalizaciju) i procjenu veličine oštećenja. Uz numeričko modeliranje, FSB pokriva i obradu signala te optimizaciju.

U sklopu ZaCjel projekta kapaciteti FSB-a su osnaženi zapošljavanjem dva mlada istraživača i nabavom opreme za eksperimentalna istraživanja i numeričko modeliranje:

- ▶ Visokofrekvencijski pulzator za dinamička ispitivanja materijala pri frekvencijama većim od 200 Hz
- ▶ Pametni sustav za nadzor stanja konstrukcija u laboratorijskim uvjetima s mogućnošću aktivnog i pasivnog prikupljanja informacija koji omogućava globalni nadzor konstrukcije za detekciju udara, ili lokalni nadzor za detekciju manjih oštećenja
- ▶ Oprema za mjerenje vibracija mehaničkih sustava što uključuje: višekanalni analizator, pripadne senzore, udarni čekić i programski paket za pohranu i analizu izmjerenih podataka
- ▶ Računalni hardver i softver.



Laboratorijska ispitivanja materijala



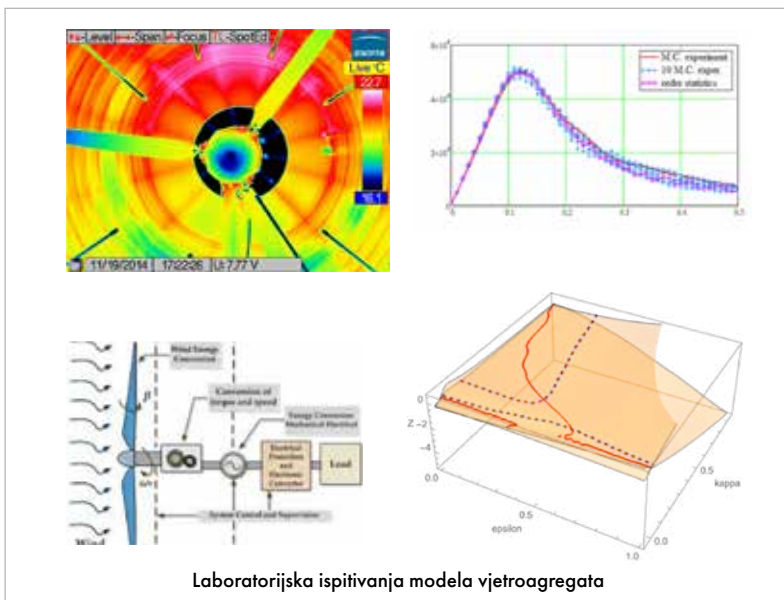


## Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

Tim Građevinskog fakulteta u Rijeci provodi aktivnosti identifikacije sustava, primjene statističkih metoda i inverznog modeliranja ključnima kod implementacije metodologije na stvarnoj konstrukciji. Isto tako, tim će doprinjeti svojim iskustvom u planiranju i provođenju pokusa za određivanje dinamičkog odziva konstrukcije.

Tim Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci uz podatke mjerenja u laboratoriju i na samoj konstrukciji, na temelju inverznih modela, statističkih modela materijala, teorije sličnosti konstrukcija, i dr., razvija računske postupke za određivanje parametara modela.

Za provedbu projekta zaposlen je jedan mladi istraživač i nabavljen laserski dopler vibrometar za precizno beskontaktno mjerenje brzina, iz čega se mogu izračunati pomaci i ubrzanja. Uređaj će omogućiti precizno praćenje dinamičkih pokusa na zamor a omogućit će i vibriranje (relativno) visokim frekvencijama što će skratiti trajanje pokusa.





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

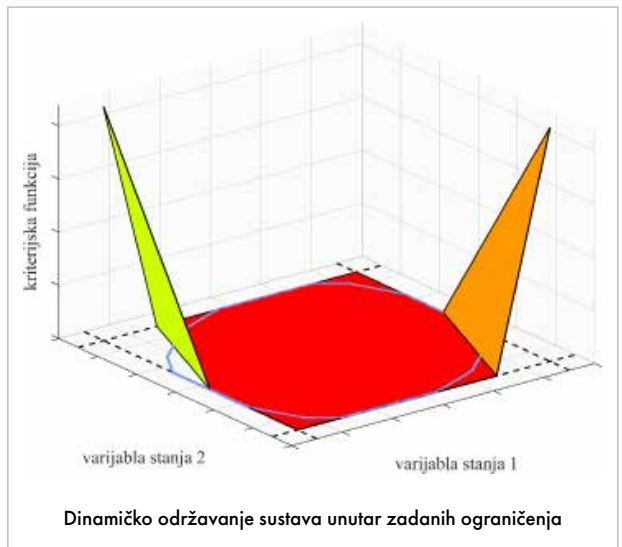
Fakultet  
elektrotehnike i  
računarstva

## Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu

Tim Fakulteta elektrotehnike i računarstva odgovoran je za unaprjeđenje sustava upravljanja dinamičkim sustavom s konstrukcijskim elementima s ciljem očuvanja dopuštenih režima rada, što na neki način sublimira sva znanja stečena na projektu, od razumjevanja i modeliranje zamornog ponašanja materijala (FSB), određivanja dopuštenih režima rada na stvarnoj konstrukciji (FSB, GF-Ri, FER), optimizaciju položaja senzora (FSB) i konačno sintezu sustava za upravljanje (FER).

Kao partner na projektu FER razvija načine automatskog upravljanja korištenjem metoda matematičke optimizacije i računalne geometrije koji se neinvazivno nadodaju na postojeće algoritme i čuvaju integritet konstrukcije.

Projektom se na strani FER-a nabavlja novi programski paket za numeričke simulacije dinamičkih sustava s multifizikom koji će se povezati s novim programskim paketom za računalnu matematiku, s ciljem simulacije cjelovitog dinamičkog sustava te za provedbu zahtjevnijih simulacija te proračuna upravljačkog algoritma u uredu.

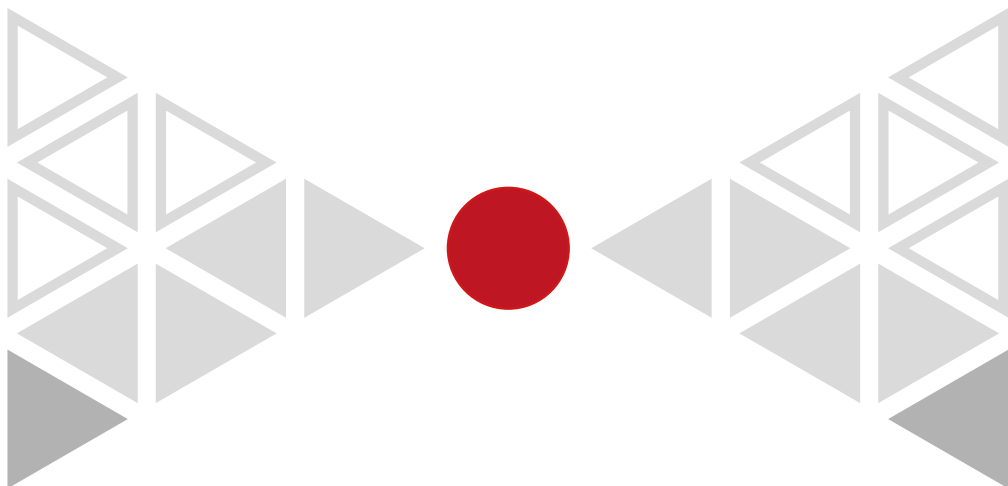




## Centar izvrsnosti za procjenu stanja konstrukcija

Centar izvrsnosti za procjenu stanja konstrukcija djeluje kao centralna točka, čvorište, različitih aktivnosti koji imaju kao zajednički krovni cilj zaštitu cjelovitosti konstrukcija. U Centru djeluju istraživači triju hrvatskih fakulteta, studenti, suradnici iz industrije te brojni pojedinci čije područje djelovanja dijeli isti cilj s Centrom. Centar izvrsnosti za procjenu stanja konstrukcija osnovan je 2014. g. u sklopu projekta *Centre of Excellence for Structural Health* (CEEStructHealth) financiranog iz operativnog programa IPA IIIC (ERDF).

Područje djelovanja Centra izrazito je opširno te istraživački tim Centra provodi projekte koji sudjeluju u rješavanju identificiranih specifičnih problema iz različitih perspektiva. Interdisciplinarnost projekata i prijenos informacija potiče uspješno rješavanje problema, a posebice razvoj znanosti i inovacija u korist gospodarstva.





## Inovacija se razvija u sklopu projekta ZaCjel - Zaštita cjelovitosti u energetici i transportu

Ukupna vrijednost projekta: 7.167.360,62 HRK  
Europski fond za regionalni razvoj: 6.056.698,04 HRK  
Trajanje: 4. 2020. - 4. 2023.

### Kontakt

Prof. dr. sc. Zdenko Tonković, voditelj projekta  
Fakultet strojarstva i brodogradnje  
Sveučilište u Zagrebu  
tel: +385 1 61 68 450  
e-mail: Zdenko.Tonkovic@fsb.hr  
[www.fsb.unizg.hr/ceestructhealth](http://www.fsb.unizg.hr/ceestructhealth)

### Više o projektu ZaCjel i inovacijama Centra izvrsnosti za procjenu stanja konstrukcija

[www.fsb.unizg.hr/ceestructhealth](http://www.fsb.unizg.hr/ceestructhealth)

### Za više informacija o EU fondovima

[www.strukturnifondovi.hr](http://www.strukturnifondovi.hr)  
[www.safu.hr](http://www.safu.hr), [info@safu.hr](mailto:info@safu.hr)  
[www.mzos.hr](http://www.mzos.hr), [uzoj@mzos.hr](mailto:uzoj@mzos.hr)



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje



Sveučilište  
u Rijeci  
Građevinski  
fakultet



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
Fakultet  
elektrotehnike i  
računarstva



Europska unija  
Zajedno do fondova EU



EUROPSKI STRUKTURNI  
I INVESTICIJSKI FONDOVI



Operativni program  
KONKURENTNOST  
I KOHEZIJA

Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog fonda za regionalni razvoj  
Sadržaj ove publikacije isključiva je odgovornost Fakulteta strojarstva i brodogradnje