

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2013/69



ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	J1-2200
Naslov projekta	Biomimetični sistemi v mikrofluidiki
Vodja projekta	18275 Mojca Vilfan
Tip projekta	J Temeljni projekt
Obseg raziskovalnih ur	4173
Cenovni razred	C
Trajanje projekta	05.2009 - 04.2012
Nosilna raziskovalna organizacija	106 Institut "Jožef Stefan"
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	
Raziskovalno področje po šifrantu ARRS	1 NARAVOSLOVJE 1.02 Fizika 1.02.01 Fizika kondenzirane materije
Družbeno-ekonomski cilj	13.01 Naravoslovne vede - RiR financiran iz drugih virov (ne iz SUF)

2. Raziskovalno področje po šifrantu FOS¹

Šifra	1.03
- Veda	1 Naravoslovne vede
- Področje	1.03 Fizika

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

3. Povzetek raziskovalnega projekta²

SLO

V okviru raziskovalnega projekta smo proučevali biomimetične sisteme, s katerimi smo ustvarjali tekočinske tokove v mikrofluidičnih napravah. Poglavitni del raziskav je obsegal umetne migetalk, ki smo jih sestavili iz superparamagnetnih kroglic in jih krmilili z zunanjim magnetnim poljem. Z izrazito asimetričnim gibanjem tako nastalih migetalk smo dosegli tekočinski tok v vzorcu. Izmerili smo profil hitrosti črpanja tekočine nad poljem migetalk v odvisnosti od parametrov gibanja –

frekvence, stopnje asimetrije, oddaljenosti od površine, dolžine migetalk ... in zrisali karte tokovnic črpane tekočine okoli ene same gibajoče se migetalke. Ugotovili smo, da je premikanje tekočine sestavljeno iz treh prispevkov: dveh rotacijskih in enega translacijskega, zaradi katerega pride do tekočinskega toka. Eksperimentalne rezultate smo primerjali z rezultati teoretičnega modela in ujemanje je bilo odlično.

Z vpeljavo ene pasivne – nemagnetne – migetalke smo proučevali hidrodinamsko sklopitev med sosednjima migetalkama. Pomerili smo kotno odvisnost koeficienta sklopitve v odvisnosti od razdalje med migetalkama in določili doseg sklopitve. Na ta način smo pokazali, da je hidrodinamska sklopitev med migetalkami poglavitnega pomena pri njihovem usklajenem delovanju, ki je ključno za uspešno črpanje tekočine oziroma premikanje.

S teoretičnim pristopom smo poleg tekočinskega toka gibajočih se migetalk obravnavali tudi optimizacijo zamaha migetalk na podlagi energetske učinkovitosti. Na primeru ene migetalke smo poiskali najbolj učinkovit način gibanja, nato pa model razširili na veliko skupino migetalk. Z modelom smo pokazali, da so metahroni valovi ključnega pomena za visoko učinkovitost črpanja.

Obravnavali smo tudi druge sisteme, na primer umetne membrane in umetne plavalce ter tako pokazali, da so biomimetični vzorci izredno primerni za uporabo v mikrofluidičnih aplikacijah. Zgledujejo se namreč po bioloških sistemih, za katere vemo, da delujejo izredno učinkovito tudi pri nizkih Reynoldsovih številih. S takim pristopom vpeljujemo nove idejne rešitve v tehnološke postopke, hkrati pa nam ponovljivi in natančno nadzorovani poskusi dajo tudi nova spoznanja o bioloških modelih.

ANG

The main objective of the project was to study biomimetic systems, which can be used to generate fluid flow in microfluidic devices. We concentrated on artificial cilia, created from superparamagnetic beads, assembled and driven by an external magnetic field. By inducing asymmetric and non-reciprocal beating pattern to the cilia, we were able to generate fluid flow. We measured the velocity profile above a ciliated surface as a function of a number of parameters, such as the beat frequency, degree of asymmetry, elevation above the surface, cilium length ... and mapped the generated flow around one beating cilium. We established that the fluid motion is composed of three components: two rotational movements and one translational that is responsible for generation of the net flow. The experimentally obtained results were compared with the results of the theoretical model and an excellent agreement was found.

By introducing one passive – non-magnetic – cilium into the sample we were able to study hydrodynamic coupling between neighbouring cilia. We measured angular dependence of the coupling coefficient as a function of separation between the cilia and determined the range of the interaction. We have shown that the hydrodynamic interactions between cilia indeed play a very important role in the appearance of coordinated beating of the cilia, which is required for efficient pumping or locomotion.

The theoretical approach was used not only to study fluid flow around beating cilia but also to determine the most energy-efficient beating pattern. We have found the optimal beating pattern for one cilium, and expanded the model to a densely covered surface. Our model has proven how important the metachronal waves are for high efficiency of pumping.

We also studied other biomimetic systems, such as artificial membranes and artificial swimmers, and have shown their suitability for microfluidic applications. Such models mimic real biological systems, which are known to operate very efficiently even at low Reynolds numbers. This approach on one hand introduces novel solutions to technological applications, and on the other hand gives insight into biological models, since the biomimetic experiments are more controlled and reproducible.

4. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu³

Mikrofluidika je veda, ki proučuje pretakanje tekočin na mikrometrski skali. Na tako majhnih skalah je obnašanje tekočin fundamentalno drugačno od obnašanja, ki smo ga vajeni v makroskopskem svetu. Reynoldsovo število, ki določa, ali so tekočinski tokovi laminarni ali turbulentni, je namreč zaradi majhnih dimenzij sistema zelo majhno. Govorimo o režimu majhnih Reynoldsovih števil („Low Reynolds Number“ ali LRN režim). V takem režimu so tokovi laminarni, turbulence odsotne in ker viskozne sile prevladajo nad inercialnimi, postane časovno odvisen člen v Navier-Stokesovi

enačbi zanemarljiv in sistem praktično obrnljiv v času. V mikrofluidičnih napravah se tekočine torej ne zmešajo (razen kolikor prispeva difuzija) in za uspešno mešanje moramo v sistem uvesti posebne mešalce. Poleg tega so v režimu majhnih Reynoldsovih števil za usmerjeno premikanje ali črpanje tekočine potrebni povsem drugačni mehanizmi, saj se ponavljajoče simetrično gibanje izpovpreči.

Možen pristop k reševanju navedenih problemov v mikrofluidiki je posnemanje podobnih že obstoječih sistemov v naravi, za katera vemo, da delujejo zelo učinkovito. Tak biomimetični pristop izkoristi prednosti bioloških sistemov, saj se osredotoči na njihovo specifično nalogo, nima pa njihovih slabosti, saj omogoča kontrolirano izdelavo, natančno krmiljenje ter zagotavlja ponovljivost poskusov. Čeprav je v naravi veliko različnih mehanizmov, ki uspešno rešujejo problem hidrodinamike pri majhnih Reynoldsovih številih, smo se v okviru tega projekta omejili predvsem na migetalke. Te z usklajenim – a z izrazito asimetričnim – gibanjem na celični površini služijo enoceličarjem za premikanje, pri mnogoceličarjih pa vpete v tkivo ustvarjajo tekočinski tok.

V našem laboratoriju smo izdelali umetne migetalke, jih sestavili in krmilili z zunanjim magnetnim poljem ter s primerno izbiro parametrov dosegli črpanje tekočine v izbrani smeri. Umetne migetalke smo sestavili iz superparamagnetnih mikrometrskih kroglic, katerih značilnost je, da se v njih v zunanjem magnetnem polju inducira magnetni dipolni moment, v odsotnosti polja pa med njimi ni magnetnih interakcij. Kroglice smo združili v dolge verige, jih na eni strani preko nikljevih feromagnetnih otočkov pripeli na stekleno površino in tako posnemali obliko migetalk. Zunanje magnetno polje, ki je bilo potrebno za sestavljanje kroglic v verige, njihovo sidranje ob površino in za njihovo premikanje, smo ustvarili s tremi ortogonalnimi pari tuljav. Električni tok skozi pare tuljav smo lahko neodvisno krmilili in tako ustvarjali časovno spremenljivo magnetno polje poljubne smeri in nastavljive jakosti. Kroglice smo sestavili v migetalke na dva načina: s fotolitografsko pripravljenimi kanalčki, v katerega so se kroglice usedle in v zunanjem polju torej same sestavile; in z optično pinceto. Mi smo uporabljali drug način, saj so bile na ta način migetalke bolj homogene, enako dolge in razporejene na točno določenih mestih. Tako sestavljene migetalke smo premikali po najpreprostejšem možnem načinu, pri katerem smo še pričakovali rezultate: migetalka je opisovala plašč obrnjenega stožca. Z našim sistemom smo natančno nadzirali vse spremenljivke gibanja, kot na primer frekvenco vrtenja, kot nagiba stožca in vrhnji kot stožca. V primeru, da je bila os stožca pravokotna na površino, simetrija ni bila zlomljena, gibanje je bilo recipročno in do črpanja tekočine ni prišlo. Če pa smo stožec nagnili, smo s tem zlomili simetrijo v sistemu in zaznali smo črpanje tekočine v določeni smeri. V ta namen smo v vzorec dodali sledilne kroglice, ki smo jih uporabljali za sledenje gibanja tekočine. Kroglice so bile manjše, da smo zmanjšali vpliv sedimentacije, in nemagnetne, da so se nemoteno gibale po magnetnem polju. Za določene eksperimente smo uporabljali tudi fluorescenčne kroglice, katerih gibanje smo lahko sledili z večjo prostorsko ločljivostjo.

Eksperimenti so pokazali, da naš sistem umetnih migetalk uspešno črpa tekočino. Dosegli smo hitrost črpanja tekočine okoli 5 mikrometrov na sekundo tik nad plastjo migetalk in izmerili profil hitrosti črpanja v odvisnosti od oddaljenosti od površine. Pokazali smo, da hitrost z oddaljenostjo od površine pojema, na razdalji približno 100 mikronov nad migetalkami pa tekočinskega toka ni več zaznati. Potrdili smo tudi teoretično napoved odvisnosti hitrosti črpanja od kota nagiba stožca. Vse meritve smo v sodelovanju s teoretično skupino tudi podprli s hidrodinamskim numeričnim modelom in ujemanje je bilo odlično. Članek je v začetku leta 2010 izšel v reviji *Proceedings of the National Academy of Sciences PNAS* 107, 1844 (2010). Bil je tudi izpostavljen in predstavljen med novicami v reviji *Nature Physics*.

V nadaljevanju smo z opazovanjem večjega števila sledilnih delcev analizirali širše območje okoli ene migetalke in zrisali karto tekočinskih tokov v odvisnosti od parametrov gibanja, kjer se nazorno vidi prehod iz vrtinčastega območja v območje črpanja tekočine. Vse meritve smo v sodelovanju s teoretično skupino Odseka za fiziko trdne snovi Instituta „Jožef Stefan“ podprli s hidrodinamskim numeričnim modelom, ki je pokazal odlično ujemanje. Rezultate smo objavili v dveh člankih *Biomicrofluidics* 5, 034103 (2011) in *Beilstein J. Nanotechnol.* 3, 163 (2012) ter v poglavju v knjigi, ki bo v kratkem izšla pri založbi RSC Publishing (2013).

V zadnjem času smo se osredotočili na proučevanje hidrodinamske sklopitve med posameznimi migetalkami, ki domnevno vodi do nastanka metahronih valov na celični površini. Taki valovi bolj učinkovito črpajo tekočino oz. poganjajo plavajoče enocelične organizme. Izmerili smo koeficiente sklopitve med dvema sosednjima migetalkama v odvisnosti od kota črpanja tekočine ter od razdalje med migetalkama. Ugotovili smo, da transverzalni koeficient sklopitve pojema bistveno hitreje kot longitudinalni. Rezultati so bili predstavljeni na vabljenem predavanju na konferenci v Londonu, članek pa je v pripravi.

Poleg eksperimentalne izvedbe smo biološke in biomimetične migetalke (ter podobne mikroskopske sisteme z majhnim Reynoldsovim številom) obravnavali tudi teoretično, v Stokesovi hidrodinamiki. Ta pristop nam je po eni strani omogočil hitro interpretacijo eksperimentalnih rezultatov, po drugi strani pa je natančna modelska obravnava sistemov vodila k njihovi optimizaciji. V sodelovanju s teoretično skupino Odseka za fiziko trdne snovi Inštituta „Jožef Stefan“ razvili teoretični model za optimizacijo oblike gibanja migetalk na podlagi energetske učinkovitosti. Z modelom smo poiskali najučinkovitejši zamah posamezne migetalke in rezultate dopolnili s študijem gibanja goste množice migetalk, pritrjenih na površino. Pokazali smo velik pomen pojava metahronih valov za visoko učinkovitost črpanja. Z raziskavo smo dokazali, da mikroorganizmi plavajo z visoko energetsko učinkovitostjo, kar je ravno nasprotno od dosedanjega prepričanja. Rezultate raziskav smo objavili v članku v ugledni reviji *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS) 108, 15727 (2011).

Druge biomimetične strukture, ki smo jih eksperimentalno ustvarili v našem laboratoriju in proučevali v okviru projekta, so umetne membrane. Prav tako kot umetne migetalke smo tudi membrane sestavili iz superparamagnetnih kroglic v zunanem magnetnem polju. S posebno izbiro magnetnega polja smo dosegli izotropno parsko interakcijo med delci ter proučevali sestavljanje kroglic v različne urejene strukture. Kot prvi smo opazili vrsto različnih struktur in določili pogoje, pod katerimi nastanejo. Rezultati raziskav so bili objavljeni v *Physical Review Letters* 103, 228301 (2009).

Poleg ustvarjanja umetnih mikrometrskih migetalk in plavalcev smo preučevali tudi obnašanje večjih sistemov, tkiv, in dosega vpliva zunanje motnje. Tako smo razvili 3D Monte Carlo algoritem, s katerim realistično simuliramo razširjanje svetlobe po tkivih. Namesto običajno uporabljenih robnih pogojev, kakršna sta zrcalni robni pogoj in ubežni robni pogoj, smo v naš algoritem vključili robni pogoj, ki upošteva plasti tkiv tudi zunaj opazovanega volumna. Pokazali smo, da je ta pristop natančnejši od predhodnih pristopov. Razvili smo tudi model toplotnega transporta po tkivih po obsevanju s svetlobo. Rezultati Monte Carlo algoritma so služili kot izvor toplote v modelu toplotnega transporta. Toplotni model je vseboval tudi dinamično odvisnost lastnosti snovi od temperature (specifična toplotna kapaciteta, toplotna prevodnost, transformacije molekul). Na podlagi rezultatov toplotnega transporta smo z uporabo Arrheniusovega modela ocenili stopnjo denaturacije tkiv po obsevanju. Razvite modele smo uporabili za numerično optimizacijo terapevtskih protokolov za zdravljenje žilnih vzbrsti v koži. V primeru ognjenih znamenj (prirojene žilne malformacije) smo pokazali, da bi bil protokol, ki vsebuje sekvenčno hlajenje s kriogenskim sprejem in laserskim osvetljevanjem, mnogo uspešnejši pri koagulaciji žili kot standardno uporabljani enosunkovni način. Velika prednost predlaganega protokola je predvsem v primeru srednje in temno obarvane polti, kjer uveljavljen standardni pristop ne da zadovoljivih uspehov. Rezultati raziskav so bili objavljeni v več člankih, med drugim dvakrat v *Journal of Biomedical Optics* 14, 064024 (2009) in 16, 128002 (2011).

5. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev⁴

Ocenjujemo, da smo cilje, ki smo si jih zastavili ob prijavi projekta, dosegli in v celoti izpolnili.

Uspeli smo sestaviti umetne migetalke in jih nadzorovano krmiliti z zunanjim magnetnim poljem. Uspešno smo izmerili hitrostni profil črpane tekočine in proučili vpliv parametrov gibanja migetalke na hitrost črpane tekočine. Z uspešno izdelavo pasivne migetalke, pri čemer je kombinacija aktivnih in pasivnih migetalk v enem vzorcu eksperimentalno zelo zahtevna, smo izmerili sklopitvene koeficiente med dvema sosednjima migetalkama v odvisnosti od medsebojne razdalje.

Z numeričnim modelom smo potrdili eksperimentalne rezultate in ujemanje med dobljenimi vrednostmi je bilo odlično. Pri tem ni šlo za prilagajanje numeričnih vrednosti, temveč za neodvisen model z enakimi parametri kot v eksperimentu, ki je dal enake rezultate. Dodatno smo z modelom poiskali najbolj energetsko učinkovit zamah migetalke in rezultate uporabili na večjem polju migetalk. Tako smo pokazali pomembnost sklopitve za učinkovito črpanje.

Uspešno smo naredili tudi nekaj drugih biomimetičnih sistemov, med drugim umetne membrane. Prav tako kot migetalke smo tudi membrane sestavili iz superparamagnetnih delcev in z izbranim magnetnim poljem dosegli meddelčno interakcijo, ki je podobna van der Waalsovi interakciji med atomi.

Rezultati so bili predstavljeni v več uglednih objavah, med drugim dvakrat v zelo ugledni reviji *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, ter predstavljeni na več mednarodnih srečanjih, tudi kot vabljeni predavanja.

6. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁵

Do bistvenih sprememb in odstopanj od programa raziskovalnega projekta ni prišlo.

V zadnjem letu izvajanja projekta je prišlo do manjše spremembe pri sestavi projektne skupine. Zaradi zmanjšanja obsega eksperimentalnih priprav v sklepnem delu projekta na projektu ni bila več zaposlena tehničarka.

7. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁶

Znanstveni dosežek																				
1.	<table border="1"> <tr> <td>COBISS ID</td> <td>23251239</td> <td>Vir: COBISS.SI</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Naslov</td> <td>SLO</td> <td>Samo-sestavljene umetne migetalke</td> </tr> <tr> <td>ANG</td> <td>Self-assembled artificial cilia</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Opis</td> <td>SLO</td> <td>Izdelali smo umetne migetalke in kot prvi pokazali, da jih lahko uporabimo za črpanje tekočine v mikrofluidični napravi. Sestavili smo jih iz superparamagnetnih mikronskih kroglic, ki so se v vnaprej pripravljenih kalupih oblikovale v verige. Privlačno medsebojno interakcijo smo dosegli z zunanjim magnetnim poljem, ki smo ga izkoristili tudi za krmiljenje migetalk. Vsiljevali smo periodično, vendar neregularno gibanje in s tem dosegli opazen tekočinski tok nad poljem migetalk. Izmerili smo hitrost črpanja tekočine in določili hitrostni profil v odvisnosti od parametrov vrtenja.</td> </tr> <tr> <td>ANG</td> <td>We created artificial cilia and demonstrated that such cilia successfully pump fluid in a microfluidic device. The cilia were assembled from micron-sized superparamagnetic beads and pre-manufactured trenches in a photoresist layer were used to assist the beads to form long chains. The beads were held together by an external magnetic field that was also used to drive the cilia in a periodic but nonreciprocal manner. We observed generated fluid flow above the ciliated surface, measured the fluid flow velocity and determined the velocity profile as a function of beating parameters.</td> </tr> <tr> <td>Objavljeno v</td> <td colspan="2">National Academy of Sciences; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; 2010; Vol. 107, no. 5; str. 1844-1847; Impact Factor: 9.771; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.124; A": 1; A': 1; WoS: RO; Avtorji / Authors: Vilfan Mojca, Potočnik Anton, Kavčič Blaž, Osterman Natan, Poberaj Igor, Vilfan Andrej, Babič Dušan</td> </tr> <tr> <td>Tipologija</td> <td colspan="2">1.01 Izvirni znanstveni članek</td> </tr> </table>	COBISS ID	23251239	Vir: COBISS.SI	Naslov	SLO	Samo-sestavljene umetne migetalke	ANG	Self-assembled artificial cilia	Opis	SLO	Izdelali smo umetne migetalke in kot prvi pokazali, da jih lahko uporabimo za črpanje tekočine v mikrofluidični napravi. Sestavili smo jih iz superparamagnetnih mikronskih kroglic, ki so se v vnaprej pripravljenih kalupih oblikovale v verige. Privlačno medsebojno interakcijo smo dosegli z zunanjim magnetnim poljem, ki smo ga izkoristili tudi za krmiljenje migetalk. Vsiljevali smo periodično, vendar neregularno gibanje in s tem dosegli opazen tekočinski tok nad poljem migetalk. Izmerili smo hitrost črpanja tekočine in določili hitrostni profil v odvisnosti od parametrov vrtenja.	ANG	We created artificial cilia and demonstrated that such cilia successfully pump fluid in a microfluidic device. The cilia were assembled from micron-sized superparamagnetic beads and pre-manufactured trenches in a photoresist layer were used to assist the beads to form long chains. The beads were held together by an external magnetic field that was also used to drive the cilia in a periodic but nonreciprocal manner. We observed generated fluid flow above the ciliated surface, measured the fluid flow velocity and determined the velocity profile as a function of beating parameters.	Objavljeno v	National Academy of Sciences; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; 2010; Vol. 107, no. 5; str. 1844-1847; Impact Factor: 9.771; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.124; A": 1; A': 1; WoS: RO; Avtorji / Authors: Vilfan Mojca, Potočnik Anton, Kavčič Blaž, Osterman Natan, Poberaj Igor, Vilfan Andrej, Babič Dušan		Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
COBISS ID	23251239	Vir: COBISS.SI																		
Naslov	SLO	Samo-sestavljene umetne migetalke																		
	ANG	Self-assembled artificial cilia																		
Opis	SLO	Izdelali smo umetne migetalke in kot prvi pokazali, da jih lahko uporabimo za črpanje tekočine v mikrofluidični napravi. Sestavili smo jih iz superparamagnetnih mikronskih kroglic, ki so se v vnaprej pripravljenih kalupih oblikovale v verige. Privlačno medsebojno interakcijo smo dosegli z zunanjim magnetnim poljem, ki smo ga izkoristili tudi za krmiljenje migetalk. Vsiljevali smo periodično, vendar neregularno gibanje in s tem dosegli opazen tekočinski tok nad poljem migetalk. Izmerili smo hitrost črpanja tekočine in določili hitrostni profil v odvisnosti od parametrov vrtenja.																		
	ANG	We created artificial cilia and demonstrated that such cilia successfully pump fluid in a microfluidic device. The cilia were assembled from micron-sized superparamagnetic beads and pre-manufactured trenches in a photoresist layer were used to assist the beads to form long chains. The beads were held together by an external magnetic field that was also used to drive the cilia in a periodic but nonreciprocal manner. We observed generated fluid flow above the ciliated surface, measured the fluid flow velocity and determined the velocity profile as a function of beating parameters.																		
Objavljeno v	National Academy of Sciences; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; 2010; Vol. 107, no. 5; str. 1844-1847; Impact Factor: 9.771; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.124; A": 1; A': 1; WoS: RO; Avtorji / Authors: Vilfan Mojca, Potočnik Anton, Kavčič Blaž, Osterman Natan, Poberaj Igor, Vilfan Andrej, Babič Dušan																			
Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek																			
2.	<table border="1"> <tr> <td>COBISS ID</td> <td>25073447</td> <td>Vir: COBISS.SI</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Naslov</td> <td>SLO</td> <td>Iskanje zamaha bioloških migetalk z optimalnim izkoristkom</td> </tr> <tr> <td>ANG</td> <td>Finding the ciliary beating pattern with optimal efficiency</td> </tr> <tr> <td>Opis</td> <td>SLO</td> <td>Z numerično simulacijo smo poiskali optimalne vzorce utripanja bioloških migetalk po kriteriju energetske učinkovitosti. Pokazali smo, da maksimizacija učinkovitosti posamezne migetalke vodi do valovitih, pogosto simetričnih in nekoliko kontraintuitivnih vzorcev. Optimalni vzorci utripanja goste mreže migetalk na površini so izredno podobni temu, kar opazimo pri mikroorganizmih, kakršen je na primer paramecij. Pokazali smo, da je metahrona koordinacija bistvena za učinkovito črpanje, največja</td> </tr> </table>	COBISS ID	25073447	Vir: COBISS.SI	Naslov	SLO	Iskanje zamaha bioloških migetalk z optimalnim izkoristkom	ANG	Finding the ciliary beating pattern with optimal efficiency	Opis	SLO	Z numerično simulacijo smo poiskali optimalne vzorce utripanja bioloških migetalk po kriteriju energetske učinkovitosti. Pokazali smo, da maksimizacija učinkovitosti posamezne migetalke vodi do valovitih, pogosto simetričnih in nekoliko kontraintuitivnih vzorcev. Optimalni vzorci utripanja goste mreže migetalk na površini so izredno podobni temu, kar opazimo pri mikroorganizmih, kakršen je na primer paramecij. Pokazali smo, da je metahrona koordinacija bistvena za učinkovito črpanje, največja								
COBISS ID	25073447	Vir: COBISS.SI																		
Naslov	SLO	Iskanje zamaha bioloških migetalk z optimalnim izkoristkom																		
	ANG	Finding the ciliary beating pattern with optimal efficiency																		
Opis	SLO	Z numerično simulacijo smo poiskali optimalne vzorce utripanja bioloških migetalk po kriteriju energetske učinkovitosti. Pokazali smo, da maksimizacija učinkovitosti posamezne migetalke vodi do valovitih, pogosto simetričnih in nekoliko kontraintuitivnih vzorcev. Optimalni vzorci utripanja goste mreže migetalk na površini so izredno podobni temu, kar opazimo pri mikroorganizmih, kakršen je na primer paramecij. Pokazali smo, da je metahrona koordinacija bistvena za učinkovito črpanje, največja																		

		učinkovitost pa je dosežena z antiplektičnimi valovi.
	ANG	We numerically determined the optimal beating patterns of cilia according to their energetic efficiency. We showed that maximizing the efficiency of a single cilium leads to curly, often symmetric, and somewhat counter-intuitive patterns. When looking at a densely ciliated surface, the optimal patterns become remarkably similar to what is observed in microorganisms like Paramecium. We demonstrated that metachronal coordination is essential for efficient pumping and the highest efficiency is achieved with antiplectic waves.
Objavljeno v		National Academy of Sciences; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; 2011; Vol. 108, no. 38; str. 15727-15732; Impact Factor: 9.681; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.271; A'': 1; A': 1; WoS: RO; Avtorji / Authors: Osterman Natan, Vilfan Andrej
Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
3.	COBISS ID	2204516 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Izdelava koloidnih membran ANG Field-induced self-assembly of suspended colloidal membranes
	Opis	SLO Iz superparamagnetnih mikronskih delcev smo uspeli ustvariti umetno membrano. Prednost te membrane je, da se, ob morebitnem pretrganju zaradi privlačnih interakcij med sestavnimi deli membrane, 'sama zaceli'. Z uporabo tako imenovanega 'magičnega kota', pod katerim je precediralo zunanje magnetno polje, smo dosegli izotropno parsko interakcijo med kroglicami, ki je podobna Van der Waalsovi sili med atomi. Dodatno interakcije med več delci so poskrbele za zbiranje kroglic v urejene strukture – verige, mreže in nazadnje stabilne membrane. ANG By assembling superparamagnetic microspheres we created an artificial membrane. The main feature of such a membrane are its self-healing properties: if torn, the attractive interactions between the membrane building blocks result in 'healing' of the membrane. By using the magic angle precession of the external magnetic field, we obtained isotropic pair attraction similar to the van der Waals force between atoms. Many-body polarization interactions lead to formation of chains, networks and finally stable membranes.
	Objavljeno v	American Physical Society.; Physical review letters; 2009; Vol. 103; str. 228301-1-228301-4; Impact Factor: 7.328; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.572; A': 1; WoS: UI; Avtorji / Authors: Osterman Natan, Poberaj Igor, Dobnikar Jure, Frenkel Daan, Zihel Primož, Babič Dušan
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
4.	COBISS ID	24932135 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Izmera tekočinskega toka, ki ga ustvarijo umetne migetalke ANG Measurement of fluid flow generated by artificial cilia
	Opis	SLO Iz supeparamagnetnih kroglic smo izdelali umetne migetalke in jih krmilili z zunanjim magnetnim poljem, nato pa v vzorec dodali fluorescenčne sledilne delce, s katerimi smo lahko natančno določili smer in hitrost tekočinskega toka v vzorcu. Natančno smo proučili vpliv parametrov gibanja migetalke na tekočinski tok in opazili, da je gibanje tekočine sestavljeno iz treh prispevkov: dveh rotacijskih in enega translacijskega načina, ki doprinese k transportu tekočine. We used superparamagnetic particles to create artificial cilia and assembled and actuated them with an external magnetic field. Additional fluorescent tracer particles were introduced into the system that enabled observation

	ANG	and detection of velocity and direction of the flow. We studied the influence of cilium beating parameters on the flow patterns and observed that the motion is composed of three components: two rotational and one translational motion that contributes to net pumping of the fluid.
Objavljeno v		American Institute of Physics; Biomicrofluidics; 2011; Vol. 5, no. 3; str. 034103-1-034103-9; Impact Factor: 3.366; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.93; A': 1; WoS: DA, NS, UF; Avtorji / Authors: Kokot Gašper, Vilfan Mojca, Osterman Natan, Vilfan Andrej, Kavčič Blaž, Poberaj Igor, Babič Dušan
Tipologija	1.01	Izvirni znanstveni članek

8. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine²

Družbeno-ekonomski dosežek		
1.	COBISS ID	25297447
		Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Litografski sistem za izdelavo mikrofluidičnih vezij s sub-mikronsko ločljivostjo
	ANG	Rapid prototyping system with sub-micrometer resolution for microfluidic applications
Opis	SLO	Sodelovali smo pri razvoju novega izdelka: magneto-optične pincete. Kombinacija optične pincete in časovno modularnega magnetnega polja je primerna za celo vrsto novih poskusov v osnovnih raziskavah in uporabo v tehnološkem sektorju. Z uspešno združitvijo dveh metod se je možnost uporabe bistveno razširila, saj nam omogoča poleg eksperimentov in kvantitativnih meritev tudi izvedbo natančnih primerjalnih poskusov, ki so ključnega pomena za kontrolirano in sistematično preučevanje vzorcev. Tehnologijo optične pincete trži visokotehnološko podjetje Aresis, d.o.o. (www.aresis.com). Prav tako smo sodelovali pri razvoju sistema "Laser Direct Imaging" za mehko litografijo. Sistem omogoča direktno pisanje vzorcev v fotorezist s fokusiranim UV laserskim snopom. Sistem trži visokotehnološko podjetje LPKF Laserji & Elektronika, d.o.o (www.lpkf.si).
	ANG	Magneto-optical tweezers, a unique experimental setup that was developed in our laboratory, is a combination of optical tweezers and external homogeneous magnetic field. It has already been found very suitable for a variety of experiments in fundamental research and useful in technological applications. The successful combination of the two methods enables us precise measurements and consequently comparative experiments, which are crucial for controlled and systematic investigations of new materials. The optical tweezers setup is being commercialised by a high-tech company Aresis, d.o.o. (www.aresis.com). We also co-operated in the development of "Laser Direct Imaging" system that is used for soft-lithography. The system directly writes lithographic patterns into photoresist using a focused UV laser beam. The system is being commercialised by a high-tech company LPKF Lasers & Electronics, d.o.o (www.lpkf.si).
Šifra	F.06	Razvoj novega izdelka
Objavljeno v		Springer; Proceedings of the 2nd European Conference on Microfluidics Microfluidics 2010(MicroFlu'10), December 8-10, 2010, Toulouse, France; Microsystem technologies; 2012; Vol. 18, no. 2; str. 191-198; Impact Factor: 0.931; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.323; WoS: IQ, NS, PM, UB; Avtorji / Authors: Kavčič Blaž, Babič Dušan, Osterman Natan, Podobnik Boštjan, Poberaj Igor
Tipologija	1.01	Izvirni znanstveni članek

2.	COBISS ID	23912487	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> TweezPal - programska oprema za analizo in kalibracijo optične pincete	
		<i>ANG</i> TweezPal - optical tweezers analysis and calibration software	
	Opis	<i>SLO</i> Član projektne skupine je razvil računalniški program za analizo filmov, pridobljenih z videomikroskopijo. Program omogoča »pametno« detekcijo delcev in jim avtomatsko sledi skozi cel film. Rezultat analize so trajektorije delcev, ki so uporabne za določanje različnih lastnosti opazovanih sistemov, npr. difuzije, gibanja, reoloških lastnosti ... Program v Sloveniji uporabljajo v štirih raziskovalnih skupinah kot osnovni pripomoček pri analizi eksperimentov s področja koloidne fizike in fizike mehke snovi. Program je bil uporabljen pri vsaj desetih izvirnih znanstvenih člankih, od katerih jih je bilo pet objavljenih v Physical Review Letters. Dodatno je razvil tudi programsko opremo za kalibracijo optične pincete in za hitro karakterizacijo optičnih pasti s pomočjo sledenja delcu, ki je ujet v pasti.	
		<i>ANG</i> A member of the project group developed user-friendly software for analysis of videomicroscopy films. The main features of the program are "smart" detection of particles, which are followed through the whole film, and automatic extraction of trajectories from videos. The software is now being widely used – by four research groups in Slovenia only – as a tool to analyse colloidal physics and soft-matter experiments. The software has been used in experiments published in at least ten publications, including five in Physical Review Letters. Additionally, software for calibration of optical tweezers and quick characterization of optical traps based on trajectory of the trapped particle has also been developed.	
	Šifra	F.11	Razvoj nove storitve
	Objavljeno v	North-Holland; Computer physics communications; 2010; Vol. 181, no. 11; str. 1911-1916; Impact Factor: 2.300;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.29; A': 1; WoS: EV, UR; Avtorji / Authors: Osterman Natan	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
3.	COBISS ID	2184036	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Izdelava prototipa magnetno gnanih mikrorotorjev z individualno kontrolo hitrosti in smeri črpanja	
		<i>ANG</i> Magnetically actuated microrotors with individual pumping speed and direction control	
	Opis	<i>SLO</i> Izdelali smo prototip mikrorotorjev z individualnim nadzorom, kar je izrednega pomena za krmiljenje črpalk v mikrofluidičnih vezjih. Rotorji so sestavljeni iz mikronskih magnetnih kroglic, gnani pa z zunanjim magnetnim poljem. Mikrorotorji omogočajo črpanje tekočine, z elektrodami pa je možno individualno spreminjati hitrost njihovega vrtenja in smer črpanja tekočine.	
		<i>ANG</i> We manufactured a prototype of individually controlled microrotors that are used as pumps in microfluidic devices. The rotors are assembled from micrometer-sized superparamagnetic beads and driven by an external magnetic field. Microrotors pump the fluid, while patterned electrodes enable individual control of their rotation frequency and direction of pumping.	
	Šifra	F.08	Razvoj in izdelava prototipa
	Objavljeno v	American Institute of Physics.; Applied physics letters; 2009; Vol. 95; str. 023504-1-023504-3; Impact Factor: 3.554;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.216; A': 1; WoS: UB; Avtorji / Authors: Kavčič Blaž, Babič Dušan, Osterman Natan, Podobnik Boštjan, Poberaj Igor	

	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
4.	COBISS ID	23023143	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Zbornik povzetkov SLONANO 2009
		ANG	Book of abstracts SLONANO 2009
	Opis	SLO	Organizacija SloNano konference, ki je potekala v oktobru 2009 na Kemijskem Inštitutu v Ljubljani. Preko 120 mednarodnih udeležencev je predstavljalo rekordno udeležbo in imena vabljenih predavateljev so zgolj potrdila ugled, ki ga ta konferenca pridobiva na področju nanoznanosti in nanotehnologije. Poudarek tega srečanja je bil na dveh izredno aktualnih temah: na bionanotehnologiji ter na uporabi nanomaterialov za hranjenje in pretvorbo energije. Dodatne sekcije so bile posvečene nanomaterialom, novim materialom in biomimetiki.
		ANG	Organisation of the 8th conference in the series of SloNano meetings, which took place in October 2009 at the National Institute of Chemistry, Ljubljana. With over international 120 participants and several distinguished invited speakers, the conference is clearly gaining on its international importance on the field of nanoscience and nanotechnology. SloNano 2009 concentrated on two very current major topics: "Nanomaterials for Energy Storage and Conversion" and "BioNanotechnology". Additional sections included Nanomaterials, New Materials and Biomimetics.
	Šifra	B.01 Organizator znanstvenega srečanja	
	Objavljeno v	National Institute of Chemistry; 2009; 108 str.; Avtorji / Authors: Mihailović Dragan, Dominko Robert, Vilfan Mojca	
	Tipologija	2.25 Druge monografije in druga zaključena dela	
5.	COBISS ID		Vir: vpis v poročilo
	Naslov	SLO	Mentorska in pedagoška dejavnost
		ANG	Supervision and educational activities
	Opis	SLO	Vsi člani projektne skupine smo aktivno udeleženi v proces izobraževanja na Univerzi v Ljubljani. Tako smo med drugim vodili vaje pri predmetih Elektrooptika, Laserska fizika in Praktikum 4 za študente fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko (FMF); pri predmetu Fizika za študente grafičnih in interaktivnih komunikacij na Naravoslovnotehniški fakulteti; pri predmetu Medicinska fizika na FMF in pri predmetu Biofizika za študente mikrobiologije na Biotehnični fakulteti. Vodja skupine je raziskovalna mentorica mlademu raziskovalcu, ki je pričel usposabljanje v 2009 in ga uspešno zaključuje v marcu 2013, član skupine pa je bil v letu 2011 somentor pri diplomski nalogi.
		ANG	All project team members actively participate in educational activities at University of Ljubljana. We worked as teaching assistants for Electrooptics, Laser Physics and Physics Laboratory 4 for physicists at Faculty of Mathematics and Physics (FMF); for Physics for students of Graphic and Interactive Communication at Faculty for Natural Science and Engineering; for Medical Physics at FMF and for Biophysics for Microbiology students at Faculty of Biotechnology. The project team leader is the research supervisor of one young researcher, who started his PhD in 2009 and will successfully finish in March 2013, and one member of the group was co-advisor of one diploma thesis in 2011.
	Šifra	D.09 Mentorstvo doktorandom	
	Objavljeno v	Gašper Kokot, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, marec 2013.	

Tipologija	4.00	Sekundarno avtorstvo
------------	------	----------------------

9. Drugi pomembni rezultati projektne skupine⁸

10. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁹

10.1. Pomen za razvoj znanosti¹⁰

SLO

V zadnjem desetletju mikrofluidika postaja vse bolj uveljavljeno raziskovalno področje z vedno več tehnološkimi aplikacijami. Podobno kot je mikroelektronika povsem spremenila izdelavo elektronskih komponent in njihovo uporabnost, tako mikrofluidika odpira povsem nova področja raziskav in uporabe. Glavne prednosti mikrofluidike so opazne predvsem na področju analize snovi, saj take raziskave izvajamo na zelo majhnih količinah vzorca, kar ima za posledico hitro odzivnost, znižanje stroškov in zmanjšanje odpadnih materialov.

Zaradi svojih specifičnih lastnosti je mikrofluidika izredno zanimiva tudi za osnovne raziskave, saj je obnašanje tekočin pri tako majhnih dimenzijah (oziroma pri majhnih Reynoldsovih številih) precej drugačno od fizike makroskopskega sveta. Raziskave v okviru projekta so bile ene prvih, ki so sistematično preverile Purcellov teorem na biomimetičnem sistemu, to je umetnih migetalkah. Umetne migetanke smo uporabili tudi kot modelski sistem za razumevanje hidrodinamskih pojavov (medmigetalčne sklopitve, pojav metahronih valov ...) pravih migetalk. Kvantitativne nadzorovane meritve je namreč na pravih migetalkah zapleteno izvesti, zato so modelski sistemi idealni pristop k reševanju tega problema. Naš model migetalk se je izkazal kot zelo uporaben, saj smo z zunanjim magnetnim poljem zelo natančno spreminjali parametre gibanja in pri danih parametrih izmerili tekočinski tok. S kartiranjem tekočinskih tokov smo natančno proučili obliko tokov in jih primerjali z različnimi teoretičnimi modeli. Tako smo prispevali k oblikovanju boljših modelskih sistemov in razumevanju osnovnih pojavov na področju hidrodinamike majhnih Reynoldsovih števil.

Uspešna izvedba biomimetičnih sistemov je uporabna za mikrofluidične aplikacije, hkrati pa rezultati doprinesejo k boljšemu razumevanju bioloških sistemov. Naš inovativen pristop k mikrofluidičnim sistemom je pripomogel k splošnem napredku tega zanimivega področja in razširil možnost aplikacij. Naše raziskave so vodile do implementacij novih idej, podobni sistemi so že bili uporabljeni, na primer kot ogrodje za rast celic. Mikrofluidični sistemi so tako zanimivi ne samo za fizike, temveč tudi za biologe, kemike in druge inženirje.

ANG

In the past decade, microfluidics has become well-established discipline with a large variety of technological applications. Similar to the microelectronics that completely changed the production of electronic components and their usage, microfluidics opened new areas of research and implementation of hydrodynamics. The main advantages are most apparent in sample analysis: microfluidic experiments require very small quantities of material, leading to fast response, reduction of cost and reduction of waste materials.

Specific properties of microfluidics make it extremely interesting for fundamental research as the behaviour of fluids in small dimensions (and at low Reynolds numbers) is quite different from the physics in macroscopic world. The research within this project was one of the first to systematically validate Purcell's theorem on a biomimetic system of artificial cilia. We used the artificial cilia also as a model system for studying hydrodynamic phenomena (hydrodynamic coupling, appearance of metachronal waves ...) of the real cilia. As it is very difficult to perform controlled experiments on real cilia, the model systems are an ideal approach for addressing this issue. Our model turned out to be very useful as we were able to accurately control the magnetic field, which was used to actuate the cilia, and study the influence of beating parameters on the fluid flow. By mapping the fluid flow around one beating cilium we were able to study flow patterns and compare them to existing theoretical models. We contributed to

designing better model systems and to understanding fundamental phenomena on the field of hydrodynamics at low Reynolds numbers.

Our successful implementation of biomimetic systems can be used in microfluidic applications, but at the same time contributes to a better understanding of real biological systems. Our innovative approach contributed significantly to the interesting multidisciplinary field of microfluidics and broadened the application possibilities. Our research has already led to new ideas and similar systems have, for example, already been used as cell-growth scaffolds. Microfluidic systems are therefore interesting not only for physicists, but also for biologists, chemists and engineers.

10.2.Pomen za razvoj Slovenije¹¹

SLO

Raziskave, ki smo jih izvajali v okviru projekta, sodijo v področje izredno aktualnih mikrofluidičnih raziskav. Te vrste raziskav so v zadnjih nekaj letih, deloma tudi po zaslugi tega projekta, v Sloveniji doživele velik razmah. Pomagali smo pri postavitvi eksperimentalnih tehnik, ki omogočajo natančne priprave vzorcev ter izvedbo eksperimenta in razvili programsko opremo, ki nudi natančno analizo pridobljenih podatkov. Pri tem smo sodelovali z dvema visoko tehnološkima podjetjema, Aresis, d.o.o. in LPKF Lasers & Electronics, d.o.o.

Naša eksperimentalna postavitve optične pincete z magnetno komponento je edinstvena in laboratorij, ki je opremljen še s postavitvijo za izdelavo mikrofluidičnih celic, daje odlično izhodišče za vrhunske raziskave in izobraževanje perspektivnih raziskovalcev na visokem nivoju, med drugim enega mladega raziskovalca, ki je usporabljanje začel leta 2009, v marcu 2013 pa ga bo tudi uspešno zaključil. V okviru pedagoškega dela smo člani projektne skupine naše delo predstavili tudi mlajšim generacijam študentov in jim s tem predstavili raziskovalno delo, kar je pomembno tako s strokovnega stališča kot tudi za bodoče sodelovanje z zunanjimi industrijskimi partnerji.

Rezultate dela smo objavili v vrhunskih tujih revijah, jih predstavili na mednarodnih znanstvenih srečanjih, vključno z vabljenim predavanjem in bili povabljeni da napišemo poglavje za knjigo, ki bo v kratkem izšla pri RSC Publishing. Na ta način smo zagotovo pripomogli k prepoznavnosti Slovenije, po svetu promovirali produkte in prototipe modelov, ki so bili razviti in izdelani v Sloveniji, ter istočasno navezovali stike za bodoča sodelovanja z uglednimi inštitucijami in industrijskimi partnerji po svetu.

ANG

Research performed within this project belongs to a current and rapidly growing research field of microfluidics. In the past few years, we have witnessed a rapid growth of interest in microfluidics in Slovenia, also due to this project. We contributed to setting up new experimental techniques that enable precise sample preparation and accurate measurements, and developed software that enables rigorous analysis of obtained data. We collaborated with two high-tech companies, Aresis, d.o.o. and LPKF Lasers & Electronics, d.o.o.

Our experimental set-up of optical tweezers combined with the magnetic component is home made and unique. The laboratory is additionally equipped with apparatus for photolithographic production of microfluidic cells. This yields excellent working conditions for scientific research as well as training of promising candidates, including one young researcher, who joined the group in 2009 and will defend his thesis in March 2013. Within educational activities, the members of the project team presented the research to younger students, acquainted them with scientific work and helped them establish connections with the industrial partners.

The results of our work were published in renowned journals, presented at international scientific meetings (including an invited talk) and will appear as a chapter in a book by RSC Publishing. We undoubtedly contributed to a better recognisability of Slovenia in the scientific community, promoted products and prototypes of models that were developed in Slovenia, and simultaneously established contacts for future collaborations with researchers from distinguished institutions and industrial partners.

11.Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj		
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	

	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>

	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	

	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

Komentar

12.Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!
Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
G.01	Razvoj visokošolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.03.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.07.	Večji delež izvoza	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.08.	Povečanje dobička	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.09.	Nova delovna mesta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.12.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.04.	Drugo: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

	in javne uprave					
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.06.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.09.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Komentar

--

13.Pomen raziskovanja za sofinancerje¹²

	Sofinancer	
1.	Naziv	
	Naslov	
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:	EUR
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:	%
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja	Šifra
	1.	
	2.	
	3.	
	4.	
	5.	
Komentar		
Ocena		

14.Izjemni dosežek v letu 2012¹³**14.1. Izjemni znanstveni dosežek**

--

14.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

--

C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba
raziskovalne organizacije:*

in

vodja raziskovalnega projekta:

Institut "Jožef Stefan"

Mojca Vilfan

ŽIG

Kraj in datum:

Ljubljana	13.3.2013
-----------	-----------

Oznaka prijave: ARRS-RPROJ-ZP-2013/69

¹ Opredelite raziskovalno področje po klasifikaciji FOS 2007 (Fields of Science). Prevajalna tabela med raziskovalnimi področji po klasifikaciji ARRS ter po klasifikaciji FOS 2007 (Fields of Science) s kategorijami WOS (Web of Science) kot podpodročji je dostopna na spletni strani agencije (<http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/preslik-vpp-fos-wos.asp>). [Nazaj](#)

² Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

³ Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega projekta in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

⁴ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

⁵ V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

⁶ Navedite znanstvene dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'. [Nazaj](#)

⁷ Navedite družbeno-ekonomske dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Družbeno-ekonomski rezultat iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'.

Družbeno-ekonomski dosežek je po svoji strukturi drugačen kot znanstveni dosežek. Povzetek znanstvenega dosežka je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek družbeno-ekonomskega dosežka praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

⁸ Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 7 in 8 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁹ Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹² Rubrike izpolnite / prepisite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

¹³ Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2012 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot priponko/-i k temu poročilu. Vzorec diapozitiva je objavljen na spletni strani ARRS <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/>, predstavitev dosežkov za pretekla leta pa so objavljena na spletni strani <http://www.arrs.gov.si/sl/analize/dosez/>. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2013 v1.00

12-66-1A-10-A4-1A-24-F3-36-E6-3A-A7-1B-32-B0-6A-D3-49-04-F1