

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2013/274



ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	J1-2209
Naslov projekta	Molekularni motorji
Vodja projekta	21609 Andrej 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 1.02.07 Biofizika
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

Biološki molekularni motorji so proteinske molekule, ki pretvarjajo kemijsko energijo, običajno pridobljeno s hidrolizo molekul ATP, v mehansko delo.

V prvem delu projekta smo z mezoskopskimi modeli proučevali **kolektivno dinamiko sklopljenih molekularnih motorjev**. Pri tem smo posebno pozornost posvetili sučnemu

gibanju filamentov, ki jih poganjajo motorni proteini. Čeprav je bilo sukanje opaženo pri različnih vrstah motorjev (procesivni in neprocesivni miozini na aktinskih filamentih, kinezini na mikrotubulih), smo pokazali, da so njegovi vzroki lahko različni. Za aktinske motorje smo pojav razložili na osnovi vijačne strukture aktinskih filamentov, medtem ko je pri tubulinskih motorjih (kinezinih) sukanje posledica lastnosti samega motorja.

Za motorni protein **dinein** pa smo razvili model, ki razloži korakanje dimeričnega motorje. Molekula dineina je bistveno večja od večine drugih motorjev, zanimiva pa je tudi zaradi tega, ker sta katalitično mesto, kjer poteka hidroliza ATP, ter vezavno mesto na mikrotubul, od seboj oddaljeni okoli 15 nanometrov. Pomembna vprašanja o delovanju dineina se tako nanašajo na alosterično komunikacijo med tema mestoma, ter na to, kaj določa smer korakanja motorja, zakaj kljub svoji precej večji velikosti koraka z dolžino 8nm ter v kakšni meri sta kemijska cikla v glavicah motorja med seboj koordinirana. Mehanizem alosterične komunikacije smo raziskali z molekularnim modelom, za ostala vprašanja pa smo postavili fenomenološki mehansko-kemični model.

Raziskali smo tudi delovanje **bičkov in migetalk**, ki jih poganjajo dineinski motorji, služijo pa med drugim plavanju enoceličnih organizmov. Pri tem smo se osredotočili na vprašanje energijskega izkoristka migetalk. Čeprav je na prvi pogled plavanje mikroorganizmov neučinkovito, saj izkoristek redko preseže 1%, smo pokazali, da je delovanje bičkov vendar zelo blizu teoretičnemu optimumu. V ta namen smo najprej uvedli nov kriterij za izkoristek posamične migetalk ali skupine migetalk, nato pa numerično poiskali hipotetične oblike zamahov, pri katerih je ta izkoristek optimalen.

Princip delovanja bioloških migetalk smo uporabili tudi za izdelavo **umetnih migetalk**, sestavljenih iz superparamagnetnih delcev, ki se v zunanem polju samouredijo v verige. Z ustreznim gibanjem magnetnega polja po plašču nagnjenega stožca, kateremu je sledila smer migetalk, smo nato dosegli zamah s podobnimi zlomljenimi simetrijami, kot jih najdemo pri naravnih migetalkah.

ANG

Biomolecular motors are protein molecules that convert chemical energy, usually from ATP hydrolysis, to mechanical work.

In the first part of the project we used mesoscopic models to study the **collective dynamics of coupled molecular motors**. We paid particular attention to the twirling motion of filaments, driven by motor proteins. Although the helical motion of filaments has been observed in various kinds of motors (processive and non-processive myosins on actin filaments, kinesins on microtubules), we could show that their mechanism can be fundamentally different. For actin based motors we explained the phenomenon on the basis of the helical structure of actin. In microtubular motors (kinesins) the helicity is caused by the properties of the motor itself.

For the motor protein **dynein** we developed a model that explains the stepping of the dimeric motor. The dynein molecule is significantly larger than the majority of other motors and it is also highly interesting because the catalytic site where ATP hydrolysis takes place and the microtubule binding site are some 15 nm apart. Important questions regarding dynein therefore include the mechanism of this allosteric communication, the reason why the motor takes regular 8nm steps while the molecule itself is much bigger, and to what extent the chemical cycles in the two heads are coordinated. We applied a molecular model to investigate the allosteric communication and developed a phenomenological mechano-chemical model to address other questions.

We have also investigated the action of **cilia and flagella**, which are driven by dynein motors and among other functions serve the swimming of microorganisms. We concentrated on the question of energetic efficiency of cilia. Although the latter is rather inefficient at first sight - the efficiency rarely exceeds 1% - we have shown that cilia operate remarkably close to the theoretically optimal way. For this purpose we first introduced a novel efficiency measure at the level of a single cilium or a large ciliated surface and then numerically determined the hypothetical stroke shapes for which this efficiency is maximal.

We finally applied the principles underlying the fluid pumping by biological cilia to fabricate **artificial biomimetic cilia** comprised of superparamagnetic particles that self-assemble into chains in the presence of a magnetic field. With the appropriate motion sequence of the magnetic describing the mantle of a tilted cone, which was followed by the direction of the

cilium, we could design a beating pattern with similar broken symmetries as are found in natural cilia.

4. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu³

V prvem sklopu smo proučevali delovanje bioloških **molekularnih motorjev**. Pri tem smo se osredotočili na razlago opažanega sučnega gibanja filamentov (aktinskih ali mikrotubulov). Ključno vprašanje je bilo, v kakšni meri je perioda sukanja določena z lastnostmi filamenta oziroma motorja. Poleg tega smo hoteli ugotoviti, katere lastnosti motorjev lahko določimo z meritvami periode. Za odgovor na ta vprašanja smo postavili fenomenološki model za motorne proteine, ki njihovo molekulo opiše z majhnim številom kemijskih stanj, pri čemer ima vsako določeno mehansko konformacijo. Novost modela je bila v tridimenzionalnem pristopu ob hkratnem upoštevanju strukture filamenta, na katerega se veže motor.

Čeprav je bilo sukanje opaženo pri različnih vrstah motorjev (procesivni in neprocesivni miozini na aktinskih filamentih, kinezini na mikrotubulih), smo pokazali, da so njegovi vzroki lahko različni. Za aktinske motorje smo pojav razložili na osnovi vijačne strukture aktinskih filamentov, čeprav je v podrobnosti mehanizem kompleksnejši. To vidimo že po tem, da so aktinski filamenti desnosučni, medtem ko jih miozini sučejo v levo. Naša razlaga temelji na spremembah hitrosti vezave s pozicijo kadar se motor giblje ob vijačni tirnici.

Na prvi pogled podobno sučno gibanje najdemo tudi pri mikrotubulih, ki jih poganjajo neprocesivni kinezini (konkretno kinezin-14, imenovan tudi Ncd). Vendar smo pokazali, da je mehanizem sučnega gibanja v primeru kinezina bistveno drugačen, saj izvira iz konformacijskih sprememb v samem motorju in je neodvisen od strukture mikrotubulov. Eksperimentalne podatke na omenjenem sistemu smo pridobili v sodelovanju s skupino prof. Stefana Dieza iz Dresdna, ki je razvila lastno metodo za detekcijo teh rotacij.

Prvič smo pokazali, da tovrstni model lahko razloži precej presenetljive izmerjene odvisnosti hitrosti gibanja ter periode sukanja od koncentracij prisotnih nukleotidov (ATP in ADP). Hitrost kot funkcija koncentracije ATP kaže približno sigmoidno odvisnost, kot funkcijo ADP pa celo nemonotono. Perioda se z dvigom koncentracije ATP podaljša, vendar z drugačno funkcijsko odvisnostjo kot hitrost. S prilagajanjem parametrov smo lahko tudi določili velikosti posameznih konformacijskih sprememb, zlasti pa smo pokazali, da do glavnega zamaha ročice pride po vezavi molekule ATP. Pri vprašanju vrstnega reda vezave ATP in premika ročice, ki je precej osnovnega pomena za razumevanje pretvorbe energije v motorju, namreč še ni prišlo do soglasja med raziskovalci. Naša študija je edinstvena tudi zato, ker smo uspeli izključno z merjenjem kolektivnih (makroskopskih) lastnosti motorjev karakterizirati konformacijske spremembe v posamezni molekuli, ki doslej niso bile direktno merljive.

Razvili smo tudi mehanski model za delovanje **citoplazemskega dineina**. Molekula dineina je bistveno večja od večine drugih motorjev, zanimiva pa je tudi zaradi tega, ker sta katalitično mesto, kjer poteka hidroliza ATP, ter vezavno mesto na mikrotubul, od seboj oddaljeni okoli 15 nanometrov. Kljub temu je hidroliza ATP trdno sklopljena z vezavo na mikrotubul. Pomembna vprašanja o delovanju dineina se tako nanašajo na alosterično komunikacijo med tema mestoma, ter na to, kaj določa smer korakanja motorja, zakaj kljub svoji precej večji velikosti koraka z dolžino 8nm ter v kakšni meri sta kemijska cikla v glavicah motorja med seboj koordinirana. Mehanizem alosterične komunikacije smo raziskali z molekularnim modelom, za ostala vprašanja pa smo postavili fenomenološki mehansko-kemični model.

V sodelovanju z Dr. Francijem Merzelom (KI) smo raziskali mehanizem te alosterične sklopitve, ki poteka preko drsenja dveh alfa vijačnic druge proti drugi. V ta namen smo izvedli simulacije dela molekule z molekularno dinamiko. Pokazali smo, da premik vijačnic dejansko povzroči konformacijsko spremembo v vezavni domeni in z njo afiniteto do mikrotubula. Vendar pa lahko do vseh teh sprememb pride šele po vezavi na mikrotubul.

Za razlago mehanizma korakanja dineina pa smo v sodelovanju z Dr. Andrejo Šarlah (FMF, UL) razvili model, osnovan na majhnem številu elastičnih elementov, s katerimi opišemo molekulo. Model je dobro razložil izmerjene dolžine korakov, pa tudi izvor usmerjenega gibanja. Pravilno namreč pokaže, da motorji, pri katerih je glavica zasukana za 180 stopinj še zmeraj korakajo v isti smeri glede na mikrotubul. Delo je potekalo v okvirju mednarodnega projekta HFSP v sodelovanju s skupinami iz Leedsa (S. Burgess), Osake (T. Kon) in Tokia (H. Higuchi).

V drugem sklopu (**bički in migetalk**) smo proučili vprašanja energetskega izkoristka pri delovanju migetalk. Čeprav je na prvi pogled plavanje mikroorganizmov neučinkovito, saj izkoristek redko preseže 1%, smo raziskali hipotezo, da je delovanje bičkov vendar blizu optimalnega. V začetni fazi projekta smo na novo vpeljali koeficient energetske učinkovitosti migetalk pri črpanju viskozne tekočine, ter numerično določili obliko zamaha migetalk z optimalnim izkoristkom. Nato smo merilo za izkoristek posplošili še za skupine migetalk, enakomerno razporejenih po površini. Pri eni sami migetalki je optimalen zamah sicer podoben biološkemu, vendar se v podrobnostih tudi znatno razlikuje. Pri kolektivni optimizaciji pa najprej opazimo, da fazni valovi (imenovani tudi metahroni valovi) v vsakem primeru privedejo do višjega izkoristka kot jo ima sinhrono gibanje. Sam zamah migetalk pa potem postane presenetljivo podoben tistemu, ki ga opazujemo pri raznih enoceličarjih. Sestoji iz kratkega delovnega zamaha, med katerim je migetalka iztegnjena, ter povratnega zamaha, pri katerem se ukrivljena zvije nazaj v izhodišče tesno ob površini. Izkoristek je odvisen tudi od površinske gostote migetalk. Višja gostota izkoristek izboljša, vendar le do določene meje, nad katero migetalk postanejo pregoste in izkoristek spet pade. Maksimum je dosežen pri gostoti, ki je primerljiva z gostoto migetalk v parameciji. Celoten izkoristek plavalca, ki ga lahko izračunamo na podlagi izkoristka samih migetalk, pa doseže maksimalno vrednost okoli 1.6%. Dejanski izkoristek pri parameciji je bil ocenjen na polovico te vrednosti, kar pomeni, da njegove migetalk dejansko delujejo precej blizu teoretično možnemu idealnemu zamahu. S tem smo ovrgli precej razširjeno mnenje, da je izkoristek plavajočih mikroorganizmov sicer nizek, vendar nepomemben za naravno selekcijo. Rezultate smo septembra 2011 objavili v ugledni reviji *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

V nadaljevanju smo raziskali tudi odvisnost izkoristka od oblike samega plavalca. Poiskali smo torej oblike plavalcev ter porazdelitev hitrosti tekočine ob njih na način, da bodo z minimalno disipacijo dosegli določeno hitrost plavanja pri danem volumnu. Rezultat je presenetljiv, saj odvisno od ukrivljenosti površine, ki jo dovolimo, optimalna oblika plavalca vključuje izrastke vzdolž simetrijske osi. Izračunane oblike optimalnih plavalcev pa kažejo tudi precejšnjo podobnost z različnimi oblikami mikroorganizmov, ki jih najdemo v naravi.

Projekt je vseboval tudi izdelavo umetnih **biomimetskih migetalk**. Eksperimentalno delo je potekalo v laboratoriju za eksperimentalno fiziko mehke snovi na FMF UL, v okviru tega projekta pa smo izvedli numerično simulacijo sistema umetnih migetalk, ki je bila bistvenega pomena tako pri načrtovanju eksperimenta, kot tudi pri interpretaciji izmerjenih tokov tekočine. Umetne migetalk smo izdelali kot samourejene verige superparamagnetnih delcev v zunanjem magnetnem polju. Če magnetno polje vrtimo tako, da njegova smer opisuje plašč nagnjenega stožca, temu sledijo tudi migetalk in tako dobimo asimetričen zamah, ki ima podobne simetrijske lastnosti kot zamah bioloških migetalk. Zato tudi povzroča usmerjeno črpanje tekočine, ki se odlično ujema z modelskim izračunom. Kljub temu, da je že več skupin pred nami poskušalo izdelati umetne migetalk z različnimi načini pogona, smo bili prvi, ki nam je uspelo dokazati in izmeriti njihovo delovanje (črpanje tekočine). Rezultate smo objavili v reviji *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)*, o njih pa je poročala tudi revija *Nature Physics*. V nadaljevanju smo podrobneje izmerili tudi prostorsko porazdelitev tokov, ki jih povzroča ena sama migetalk, začeli pa smo z raziskavo interakcij med aktivnimi (ki jih poganja magnetno polje) in pasivnimi migetalkami (ki sledijo toku tekočine). Tako smo pokazali, da lahko umetne migetalk uporabimo tudi kot modelski sistem za študij interakcij med biološkimi migetalkami, ki privedejo do njihove sinhronizacije. Rezultati se dobro ujemajo z napovedjo numerične simulacije.

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

V prvem sklopu (mezoskopski modeli za molekularne motorje) smo v celoti uresničili razlago sučnega gibanja pri aktinskih filamentih, ki jih poganja miozin, in rezultate objavili v *Biophysical Journal* leta 2009. Delo na modelu za sučno gibanje pri kinezinu-14 je tudi zaključeno, članek pa bo predvidoma objavljen letos.

Delo na citoplazmičnem dineinu je v sklepni fazi in 2 publikaciji v pripravi.

Na področju delovanja bičkov in migetalk smo uresničili zastavljene cilje (poiskati optimalne oblike zamahov migetalk) in jih objavili v reviji *PNAS* leta 2011, poleg tega pa smo poiskali tudi optimalno obliko samega plavalca (PRL, 2012).

Na področju umetnih migetalk smo realizirali zastavljene cilje (izdelavo in karakterizacijo

umetnih migetalk iz superparamagnetnih koloidnih kroglic) ter prve rezultate objavili v članku v PNAS leta 2010, nato pa podrobnejše meritve in teorijo še v Biomicrofluidics (2011) ter v poglavju za knjigo u umetnih migetalkah (v tisku, RSC publishing).

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

Projekt smo uresničili v zastavljeni obliki in večjih odstopanj ni bilo.

7. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁶

Znanstveni dosežek			
1.	COBISS ID	22803751	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Raziskava sučnega gibanja molekularnih motorjev
		ANG	Twirling motion of actin filaments in gliding assays with nonprocessive myosin motors
	Opis	SLO	Odkritje, da molekularni motorji filamentov ne poganjajo samo v vzdolžni smeri, ampak jih v veliko primerih tudi sučejo, je že precej staro, vendar so različni eksperimentalni rezultati navidezno konfliktni kar se tiče smeri sukanja, manjkala pa je tudi razlaga mehanizma, ki privede do sučnega gibanja. Naš model kvalitativno in kvantitativno razloži nastanek levosučnega gibanja, ker pa je njegova perioda močno odvisna od koncentracije ATP, napove tudi možnost spremembe kiralnosti, kar razloži rezultate, ki so se doslej zdeli protislovn.
		ANG	The discovery that motor proteins not only translate their filaments, but in many cases also rotate them, is rather old, but so far the experimental results were in apparent contradiction with regard to the twirling handedness and an explanation of the twirling mechanism of was lacking. Our model qualitatively and quantitatively explains the emergence of left-handed twirling. As the pitch depends strongly on the ATP concentration, the model also predicts the possibility of a cross-over from left- to right-handed motion, thus providing a reconciliation of previously contradicting results.
	Objavljeno v	Published for the Biophysical Society by the Rockefeller University Press.; Biophysical journal; 2009; Vol. 97; str. 1130-1137; Impact Factor: 4.390; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 3.318; A': 1; WoS: DA; Avtorji / Authors: Vilfan Andrej	
Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek		
2.	COBISS ID	23251239	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Izdelava samourejenih umetnih migetalk na magnetni pogon
		ANG	Self-assembled artificial cilia
	Opis	SLO	Kljub temu, da je bilo objavljenih že več konceptov za izdelavo umetnih migetalk, smo kot prvi uspeli predstaviti delujoč prototip, pri katerem smo dokazali in izmerili črpanje tekočine. Izmerjen tok se odlično ujema z napovedjo numeričnega modela. Umetne migetalke imajo velik potencial za uporabo v mikrofluidičnih aplikacijah, kjer lahko služijo kot črpalke, ali pa kot mešalci tekočine. Rezultate smo objavili v ugledni reviji PNAS, o njih pa je poročala tudi revija Nature Physics. Poleg tega smo na temo magnetnih plavalcev objavili komentar v reviji Physical Review Letters.
		ANG	Despite several previously published proposals for artificial cilia, we were the first to successfully produce a working prototype and to prove and measure the pumping of fluid. The measured flow shows a very good agreement with the prediction of the numerical model. We have published the results in the renowned journal PNAS. Nature Physics reported about them in an editorial (news&views). Besides that, we have published a

		comment on the subject of magnetic swimmers in Physical Review Letters.
	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
3.	COBISS ID	25073447 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Določitev oblike zamaha migetalk z optimalnim izkoristkom ANG Finding the ciliary beating pattern with optimal efficiency
	Opis	SLO Veliko bioloških sistemov deluje z zelo visoko energetsko učinkovitostjo, vendar to na prvi pogled ne velja za pogon migetalkarjev, ki dosega komaj okoli 1%. Problem smo proučili na nivoju posamezne migetalk ali skupine migetalk. Numerično smo določili optimalno obliko zamaha in pokazali, da je pri skupinah migetalk le ta nenavadno podobna opažanjem v mikroorganizmih. Pokazali smo, da pri parameciju hidrodinamska učinkovitost dosega okoli 50% teoretično možnega maksimuma. ANG Many biological processes work with an extremely high energetic efficiency, but at first glance this does not hold for ciliary propulsion, reaching about 1%. We have re-examined the problem at the level of a single cilium and an infinite ciliated surface. We numerically determined the optimal shape of the ciliary beating pattern and showed that the optimal collective stroke is remarkably similar to what is observed in microorganisms. For Paramecium we showed that the experimentally measured hydrodynamic efficiency reaches about 50% of the theoretically possible optimum.
	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
4.	COBISS ID	26105639 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Optimalne oblike mikroskopskih plavalcev s površinskim pogonom ANG Optimal shapes of surface slip driven self-propelled microswimmers
	Opis	SLO Raziskali smo izkoristek plavalcev, ki se poganjajo z ustvarjanjem tekočinskega toka ob površini in ki delujejo pri nizkem Reynoldsovem številu. Primer takih plavalcev so enoceličarji, ki jih poganjajo migetalk, pa tudi umetni mikroskopski kemoforetski plavalci. Izkaže se, da je energijski strošek površinskega pogona proporcionalen kvadratu hitrosti ob površini, integriranem po celotni površini plavalca. Poiskali smo torej oblike plavalcev ter porazdelitev hitrosti tekočine ob njih na način, da bodo z minimalno disipacijo dosegli določeno hitrost plavanja pri danem volumnu. Rezultat je presenetljiv, saj odvisno od ukrivljenosti površine, ki jo dovolimo, optimalna oblika plavalca vključuje izrastke vzdolž simetrijske osi. Izračunane oblike optimalnih plavalcev pa kažejo tudi precejšnjo podobnost z različnimi oblikami mikroorganizmov, ki jih najdemo v naravi. ANG Raziskali smo izkoristek plavalcev, ki se poganjajo z ustvarjanjem tekočinskega toka ob površini in ki delujejo pri nizkem Reynoldsovem številu. Primer takih plavalcev so enoceličarji, ki jih poganjajo migetalk, pa tudi umetni mikroskopski kemoforetski plavalci. Izkaže se, da je energijski strošek površinskega pogona proporcionalen kvadratu hitrosti ob površini, integriranem po celotni površini plavalca. Poiskali smo torej oblike plavalcev ter porazdelitev hitrosti tekočine ob njih na način, da bodo z minimalno

		disipacijo dosegli določeno hitrost plavanja pri danem volumnu. Rezultat je presenetljiv, saj odvisno od ukrivljenosti površine, ki jo dovolimo, optimalna oblika plavalca vključuje izrastke vzdolž simetrijske osi. Izračunane oblike optimalnih plavalcev pa kažejo tudi precejšnjo podobnost z različnimi oblikami mikroorganizmov, ki jih najdemo v naravi.
	Objavljeno v	American Physical Society.; Physical review letters; 2012; Vol. 109, no. 12; str. 128105-1-128105-5; Impact Factor: 7.370;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.404; A'': 1;A': 1; WoS: UI; Avtorji / Authors: Vilfan Andrej
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
5.	COBISS ID	26016551 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Splošna oblika tokov, ki jih povzroči gibajoča migetalka <i>ANG</i> Generic flow profiles induced by a beating cilium
	Opis	<i>SLO</i> V tem članku opišemo multipolni razvoj hitrostnega polja tekočine okoli delujoče migetalka, pri čemer iz simetrijskih razlogov pogosto zadošča že majhno število členov. Oblika tokov v približku daljnega polja tako potane neodvisna od podrobnosti gibanja migetalka. Formalizem, ki ga predstavimo, je primeren tako za opis delovanja naravnih migetalk, kakor tudi umetnih (biomimetskih). <i>ANG</i> In this article we describe a multipole expansion of the fluid velocity field around a beating cilium. For reasons of symmetry, a small number of terms is often sufficient. The shape of the velocity field therefore becomes independent of the details of the ciliary beating pattern in the far-field approximation. The formalism developed in this publication is applicable to natural, as well as artificial (biomimetic) cilia.
	Objavljeno v	EDP Sciences; The European physical journal; 2012; Vol. 35, no. 8; str. 72-1-72-11; Impact Factor: 1.944;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.27; Avtorji / Authors: Vilfan Andrej
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek

8. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine⁷

	Družbeno-ekonomski dosežek	
1.	COBISS ID	23527719 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Vpetost v pedagoški proces <i>ANG</i> Teaching activities
	Opis	<i>SLO</i> Raziskave, ki potekajo v okviru tega projekta, so močno vpete tudi v pedagoški proces. Nosilec projekta je (so)mentor dvema mladima raziskovalcema, snov projekta pa je vključena mdr. v program pouka biofizike na Biotehniški Fakulteti. Poleg tega je bil nosilec povabljen k sodelovanju pri podiplomskem usposabljanju na Univerzi v Leipzigu ter kot član komisije za zagovor doktorata kandidata na Univerzi v Montpellieru (II) in zagovor licenciata na KTH Stockholm. <i>ANG</i> The described research is tightly connected to the teaching process. I am (co-)adviser to two graduate students and lecture biophysics for the Master programme in Molecular Biology at the Faculty of Biotechnology. I also co-authored a textbook for the course. Besides that I was invited to serve as examiner for a PhD at Université Montpellier II and a licentiate at KTH Stockholm.
	Šifra	B.05 Gostujoči profesor na inštitutu/univerzi
	Objavljeno v	Graduate School, Leipzig School of Natural Sciences; 2010; Avtorji /

		Authors: Vilfan Andrej
	Tipologija	3.14 Predavanja na tuji univerzi
2.	COBISS ID	25647911 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Vabljeno predavanje na Biophysical Society Annual Meeting
		<i>ANG</i> Invited talk at Biophysical Society Annual Meeting
	Opis	<i>SLO</i> Rezultate raziskav smo v zadnjih 5 letih predstavili v okviru 6 vabljenih predavanj na mednarodnih konferencah. Te so vključevale Biophysical Society Annual Meeting (San Diego, 2012), 2x Gordon Research Conference on Muscle and Molecular Motors (2008 in 2011) ter ACS National Meeting (Philadelphia, 2008). Poslušalstvo na teh konferencah predstavlja večino vodilnih raziskovalcev s področja molekularnih motorjev in sorodnih področij. Predavanja so naletela na veliko zanimanja in tako poleg objave rezultatov v uglednih revijah pripomorejo tudi k mednarodnemu ugledu slovenske znanosti.
		<i>ANG</i> We have presented our research on motor proteins in 6 invited conference talks within the last 5 years. These included the Biophysical Society Annual Meeting (San Diego, 2012), two Gordon Research Conferences on Muscle and Molecular Motors (2008 and 2011) and the ACS National Meeting (Philadelphia, 2008), which represent an audience of world's leading reserachers in the field of molecular motors and broader. The talks have been received with a lot of interest and therefore, along with publication in high-ranking journals, contribute to the international reputation of the research carried out in Slovenia.
	Šifra	B.04 Vabljeno predavanje
	Objavljeno v	2012; Avtorji / Authors: Vilfan Andrej
	Tipologija	3.16 Vabljeno predavanje na konferenci brez natisa
3.	COBISS ID	26113575 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Vabljen komentar v reviji APS Physics
		<i>ANG</i> Invited "Viewpoint" article, APS Physics
	Opis	<i>SLO</i> Na vabilo uredništva je vodja napisal komentar za spletno revijo Physics, ki jo izdaja American Physical Society (APS), njen namen pa je predstavitev najpomembnejših člankov iz drugih revij APS v širšem kontekstu in za širšo publiko. Prispevek opisuje rezultate članka o sinhronizaciji bičkov pri zeleni algi Chlamydomonas. V njem sta avtorja s preprostim modelom pokazala, da sinhronizacija ni direktna posledica hidrodinamske sklopitve med bičkoma, temveč sučnega gibanja celice. Pojav ima tako precej skupnega s sinhronizacijo dveh ur na nihalo, ki ga je že v 17. stoletju opazoval Christiaan Huygens.
		<i>ANG</i> Upon invitation by the editors the PI wrote a Viewpoint article for the on-line journal Physics, published by the American Physical Society (APS). Its aim is to put the most important articles from other APS journals in a broader context and present them to more general audience. The present contribution highlights the results of an article explaining the flagellar synchronization in the green alga Chlamydomonas. Its authors used a simple model to show that synchronization is not a direct consequence of hydrodynamic coupling between the flagella, but rather of the rocking motion of the cell. In this respect the phenomenon shows a lot of similarity with the synchronization of pendulum clocks, already observed in the 17th century by Christiaan Huygens.
	Šifra	D.11 Drugo
	Objavljeno v	American Physical Society; Physics; 2012; Vol. 5; str. 107-1-107-3; Avtorji / Authors: Vilfan Andrej
		1.01

Tipologija		Izvirni znanstveni članek	
4.	COBISS ID	23273511	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Projekt HFSP
		ANG	HFSP programme grant
	Opis	SLO	Vpeljali smo sodelovanje z britansko (Dr. Burgess, Leeds) in dvema japonskima skupinama (Dr. Kon, Osaka in Prof. Higuchi, Tokyo), da bomo raziskali citoplazemski dinein (vrsta motornega proteina). Projekt je pri ocenjevanju dosegel najvišjo uvrstitev med skupno okoli 700 prijavami na prestižnem in izredno konkurenčnem mednarodnem razpisu Human Frontier Science Program (HFSP) za leto 2008. To je bil šele drugi tovrstni projekt, pri katerem je bila izbrana skupina iz Slovenije. Delo poteka v sodelovanju z Dr. Andrejo Šarlah (FMF) in je že privedlo do razvoja modela za dimerno molekulo dineina.
		ANG	We have established a collaboration with one british (Dr Burgess, Leeds) and two japanese groups (Dr Kon and Prof Higuchi, Tokyo) to investigate the motor protein dynein. The proposal was ranked first among about 700 applications at the prestigious and highly competitive Human Frontier Science Program (HFSP) programme grant selection (2008). This is only the second time that such a grant was awarded to a group in Slovenia. The work is carried out in collaboration with Dr Andreja Šarlah (FMF) and Dr Franci Merzel (KI) and has already resulted in the development of a model for the dimeric dynein molecule.
	Šifra	D.01 Vodenje/koordiniranje (mednarodnih in domačih) projektov	
	Objavljeno v	s. n.]; Dynein; 2009; Avtorji / Authors: Vilfan Andrej	
	Tipologija	1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci	
5.	COBISS ID	23251239	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Izdelava prototipa umetnih migetalk na magnetni pogon
		ANG	Fabrication of a functioning prototype of magnetically driven self-assembled artificial cilia
	Opis	SLO	Izdelali smo sistem umetnih migetalk, ki omogoča kontrolirano črpanje tekočine v mikrofluidičnih aplikacijah. Kljub precejšnji konkurenci na tem področju smo bili prvi, ki jim je uspelo izdelati delujoč prototip sistema umetnih migetalk. Tovrstne migetalke imajo velik potencial za uporabo v laboratorijih na čipu, kjer omogočajo črpanje tekočine brez zunanjih priključkov. Poleg objave v reviji PNAS je o odkritju poročala tudi revija Nature Physics, za širšo javnost pa je bilo predstavljeno v časopisu Delo.
		ANG	We fabricated a prototype system of artificial cilia that allows controlled fluid pumping in microfluidic applications. Amid strong competition in the field we were the first to successfully produce a working prototype. Such cilia have a high potential for lab-on-a-chip applications where they allow fluid pumping without external connections. Besides publication in PNAS, the results were also reported about in Nature Physics (news & views) and they were presented to a broader audience in the daily newspaper Delo.
	Šifra	F.08 Razvoj in izdelava prototipa	
	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	

9. Drugi pomembni rezultati projektne skupine⁸

10. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁹

10.1. Pomen za razvoj znanosti¹⁰

SLO

Raziskave molekularnih motorjev in bioloških migetalk so bazične narave, izdelava biomimetskih migetalk pa tudi aplikativne.

Z raziskavo sučnega gibanja aktinskih filamentov, ki jih poganja miozin, smo našli razlago za eksperimentalne rezultate, ki so pred tem izgledali protislovni, saj so izmerili tako levo- kot desnosučno gibanje. Naš model pokaže, da sta možni obe smeri in da je ročnost lahko odvisna od koncentracije ATP, pri kateri so bile meritve izvedene. Tovrstno sučno gibanje je tudi možen kandidat za izvor kiralnosti v embrionalnem razvoju (pri žuželkah). S postavitvijo modela za sučno gibanje pri kinezinu-14 pa smo prvič pokazali, da je mogoče z meritvami kolektivnih lastnosti velikega števila motorjev določiti precej podrobnosti o delovanju samega motorja.

Ker je dinein bistveno kompleksnejši od večine predhodno raziskanih motornih proteinov, razumevanje njegovega delovanja brez postavitve mehansko-kemičnega modela ni mogoče. S slednjim smo razložili bistvene lastnosti korakanja dineina in s tem pretvorbe kemične energije v mehansko delo. Rezultati so zanimivi tudi v bolj splošnem kontekstu pretvorbe energije in alosterične komunikacije v proteinih, relevantni pa so tudi pri izdelavi umetnih (sintetičnih) molekularnih motorjev.

Pri raziskavi delovanja bičkov in migetalk smo postavili novo merilo za učinkovitost črpanja tekočine in rešili optimizacijski problem, ki je bistveno kompleksnejši od vseh dotedaj znanih rešitev v hidrodinamiki pri nizkem Reynoldsovem številu. Poleg rešitve fundamentalnega hidrodinamskega problema so rezultati zelo zanimivi tudi z biološkega stališča, saj optimalne rešitve kažejo veliko skupnih lastnosti z dejansko opaženim gibanjem migetalk. Tudi izkoristek pri plavanju migetalkarjev je precej blizu (okoli polovice) teoretično optimalnega, s čimer smo ovrgli pogosto izraženo mnenje, da energijska učinkovitost plavanja v evoluciji ni igrala bistvene vloge.

Kljub nekaterim predhodnim poskusom izdelave umetnih migetalk smo kot prvi dejansko pokazali in izmerili tok črpane tekočine. Umetne migetalke so zanimive kot črpalke ali mešalci za uporabo v mikrofluidiki. Poleg tega so lahko koristne tudi v mikrereologiji, npr. za proučevanje viskoelastičnih lastnosti sluzi pod podobnimi pogoji, pri katerih se nahaja v dihalnih poteh.

ANG

Motor proteins and biological cilia represent basic research. The fabrication of biomimetic cilia also has potential for application.

With the study on twirling motion of actin filaments, driven by myosin, we found an explanation for experimental results that appeared contradictory beforehand, as they reported left-, as well as right-handed rotation. Our model shows that both directions are possible and that the chirality can depend on the ATP concentration. Such rotational motion is also a possible candidate for the origin of chirality in embryonic development (in insects). By setting up the model for rotational motion of microtubules driven by kinesin-14 we showed for the first time that collective measurements on a large ensemble of motors can reveal the properties of an individual motor in unprecedented detail.

Because dynein is much more complex than the majority of previously investigated motor proteins, developing a chemo-mechanical model is crucial for its understanding. With the latter we could explain the essential properties of dynein's stepping and therefore the conversion of chemical energy into mechanical work. The results are also interesting in a wider context of energy transduction and allosteric communication in proteins, and they are relevant for the

design of artificial (synthetic) molecular motors.

In the scope of studying cilia and flagella we introduced a novel criterion for the efficiency of fluid pumping and solved an optimization problem that is far more complex than any previously known optimal solutions in low Reynolds number hydrodynamics. Besides solving a fundamental hydrodynamic problem, the results are also interesting from the biological perspective, because the optimal solutions show a high level of similarity with the actual ciliary beating patterns. The overall swimming efficiency in ciliates is also remarkably close (about 50%) of the theoretical optimum, which refutes the frequently expressed opinion that energetic efficiency of swimming played no significant role in evolution.

Despite several previous attempts to build artificial cilia we were the first to actually demonstrate and measure directed fluid pumping. Artificial cilia have the potential of application as microfluidic pumps and mixers. Besides that they can be useful in microrheology, for example for studying the viscoelastic properties of mucous under similar conditions as they are found in airways.

10.2. Pomen za razvoj Slovenije¹¹

SLO

Raziskave v tem projektu pripomorejo k premostitvi razpoke med osnovno znanostjo, ki jo žene radovednost, ter uporabno fiziko, posebej mikrofluidiko. Projekt bo tudi dodatno utrjeval pozicijo, ki jo imata Institut Jožef Stefan ter FMF na obeh področjih. Opazne publikacije ter vabljeni predavanja na konferencah pa navsezadnje prispevata tudi k ugledu slovenske znanosti na splošno. Rezultati so tudi odlična promocija za proizvode sodelujočega spin-off podjetja ter srednje velikega podjetja, ki sta tesno sodelovali pri izdelavi umetnih migtalk. Ker so njihovi izdelki namenjeni predvsem raziskovalni uporabi, so prestižne objave, predavanja na konferencah (skupaj z razstavo izdelkov) najboljši reklamni kanal. Del projekta je bil sofinanciran s strani prestižne in kompetitivne organizacije HFSP (delež sprejetih projektov na njihovih razpisih znaša okoli 3%), uspešna izvedba tega projekta pa bo v prihodnosti pozitivno vplivala na naše možnosti, da uspešno konkuriramo za evropske in mednarodne projekte. Nenazadnje so raziskave tudi tesno vpete v pedagoški proces, tako na dodiplomskem kot na drugostopenjskem študiju, kakor tudi pri mentorstvih MR.

ANG

The research carried out in this project helps to bridge the gap between basic, curiosity driven research and applied physics, especially microfluidics. The project additionally strengthens the position of the J. Stefan institute and the Faculty of Mathematics and Physics in both fields. Visible publications and invited conference talks also contribute to the general reputation of Slovene science. The results are an excellent promotion for the products of a spin-off company and an SME that participated in the fabrication of artificial cilia. Because their products are mainly targeted at research use, prestigious publications and conference talks (along with exhibits) are the best advertising channel for them. Part of the project was co-funded by the prestigious and highly competitive HFSP grant (with acceptance rates around 3%) and successful completion will strengthen our possibilities to compete for further European or international grants. Finally, this project is tightly linked to the teaching process at undergraduate and graduate level, as well as supervision of PhD students.

11. Samo za aplikativne projekte in doktorske 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 upravljaljskih 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 upravljaljskih 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 in javne uprave	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
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="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete					
	Varovanje okolja in trajnostni					

G.06.	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**

Raziskali smo izkoristek plavalcev, ki se poganjajo z ustvarjanjem tekočinskega toka ob površini in ki delujejo pri nizkem Reynoldsovem številu. Primer takih plavalcev so enoceličarji, ki jih poganjajo migetalke, pa tudi umetni mikroskopski kemoforetski plavalci. Izkaže se, da je energijski strošek površinskega pogona proporcionalen kvadratu hitrosti ob površini, integriranem po celotni površini plavalca. Poiskali smo torej oblike plavalcev ter porazdelitev hitrosti tekočine ob njih na način, da bodo z minimalno disipacijo dosegli določeno hitrost plavanja pri danem volumnu. Rezultat je presenetljiv, saj odvisno od ukrivljenosti površine, ki jo dovolimo, optimalna oblika plavalca vključuje izrastke vzdolž simetrijske osi. Izračunane oblike optimalnih plavalcev pa kažejo tudi precejšnjo podobnost z različnimi oblikami mikroorganizmov, ki jih najdemo v naravi.

14.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

--

Na vabilo uredništva je vodja projekta napisal komentar za spletno revijo Physics, ki jo izdaja American Physical Society (APS), njen namen pa je predstavitev najpomembnejših člankov iz drugih revij APS v širšem kontekstu in za širšo publiko. Prispevek opisuje rezultate članka o sinhronizaciji bičkov pri zeleni algi Chlamydomonas. V njem sta avtorja s preprostim modelom pokazala, da sinhronizacija ni direktna posledica hidrodinamske sklopitve med bičkoma, temveč sučnega gibanja celice. Pojav ima tako precej skupnega s sinhronizacijo dveh ur na nihalo, ki ga je že v 17. stoletju opazoval Christiaan Huygens.

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"

Andrej Vilfan

ŽIG

Kraj in datum:

Ljubljana

18.3.2013

Oznaka prijave: ARRS-RPROJ-ZP-2013/274

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](#)

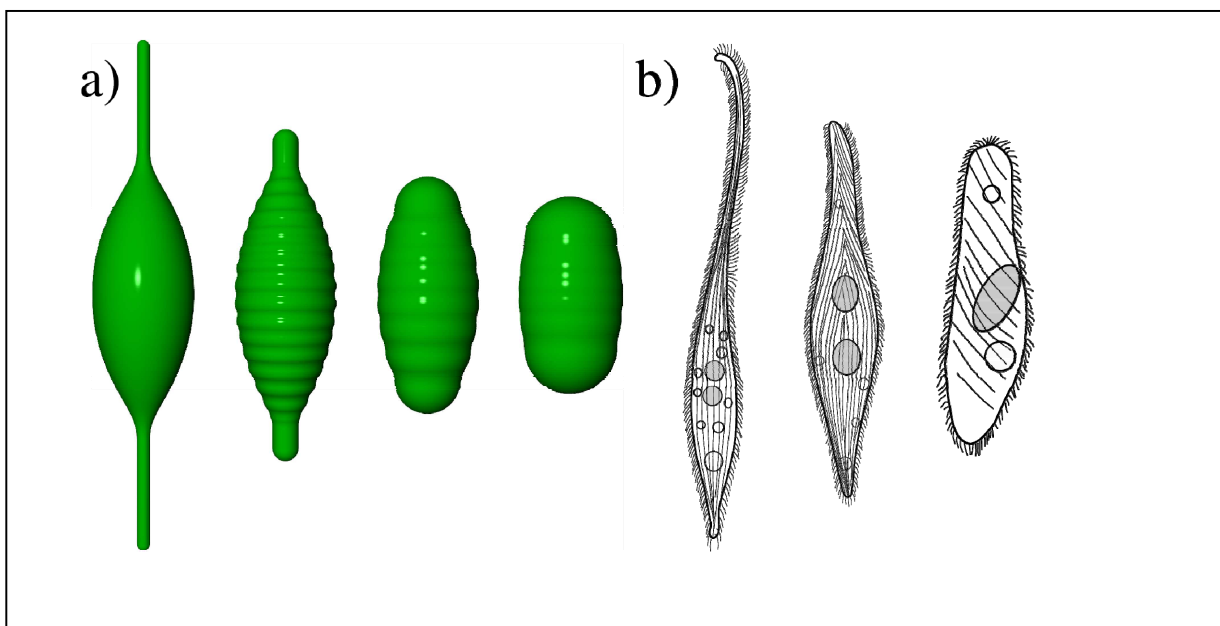
¹³ Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2012 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot prilonko/-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

D4-AB-EC-39-9E-42-F9-C9-D0-A4-D6-78-AE-FC-5B-00-6D-83-46-20

Naravoslovne vede
Področje: 1.03 Fizika

Dosežek 1: _____, Vir:



Opis dosežka oziroma učinka

Raziskali smo izkoristek plavalcev, ki se poganjajo z ustvarjanjem tekočinskega toka ob površini in ki delujejo pri nizkem Reynoldsovem številu. Primer takih plavalcev so enoceličarji, ki jih poganjajo migetalke, pa tudi umetni mikroskopski kemoforetski plavalci. Izkaže se, da je energijski strošek površinskega pogona proporcionalen kvadratu hitrosti ob površini, integriranem po celotni površini plavalca. Poiskali smo torej oblike plavalcev ter porazdelitev hitrosti tekočine ob njih na način, da bodo z minimalno disipacijo dosegli določeno hitrost plavanja pri danem volumnu. Rezultat je presenetljiv, saj odvisno od ukrivljenosti površine, ki jo dovolimo, optimalna oblika plavalca vključuje izrastke vzdolž simetrijske osi (a). Izračunane oblike optimalnih plavalcev pa kažejo tudi precejšnjo podobnost z različnimi oblikami mikroorganizmov, ki jih najdemo v naravi (b).