

Invertebrata u bionici

Plavetić, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:414961>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Marko Plavetić
Invertebrata u bionici
Završni rad

Zagreb, 2021.

Ovaj rad je izrađen na zoologijskom zavodu Prirodoslovno matematičkog fakulteta u Zagrebu, pod voditeljstvom prof. dr. sc. Marie Špoljar.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. Invertebrata.....	1
1.2. Bionika i biomimikrija.....	1
2. BIOMATERIJALI.....	2
2.1. Hitosan: sustav za primjenu lijekova i antimikrobni materijal.....	3
2.2. Hitin: plazmonski materijal za SERS bioanalitiku.....	7
2.3. Kompozitni materijali otporni na udarce.....	11
3. ARHITEKTURA	15
3.1. Eastgate Centre i termiti	15
4. ROBOTIKA	17
4.1. Kukci kao model za lokomotorni sustav robota.....	17
4.2. Robotske meduze.....	19
5. EKONOMSKI POTENCIJAL BIONIKE I BIOMIMIKRIJE.....	21
6. ZAKLJUČAK	23
7. LITERATURA.....	24
8. SAŽETAK	27
9. SUMMARY	28

1.UVOD

1.1. Invertebrata

Više od 90% opisanih vrsta u carstvu Animalia pripada invertebratima (beskralježnjacima – organizmima koji tijekom životnog ciklusa ne razvijaju kralježnicu niti svitak; Habdija i sur., 2011). Zbog velikog broja različitih vrsta i velike razlike u veličini i obliku tijela, invertebrata su odličan izvor modelnih organizama za područje bionike i biomimikrije.

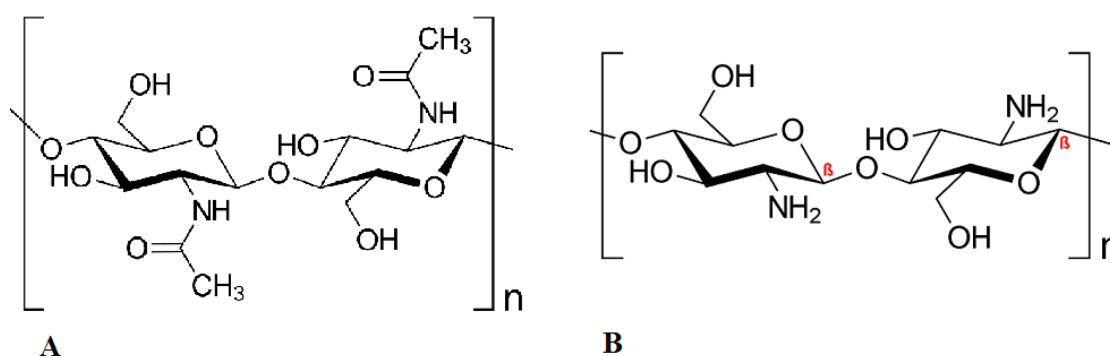
1.2. Bionika i biomimikrija

Bionika i biomimikrija su pojmovi koji se često koriste naizmjenično iako nemaju isto značenje. Jack Steele po prvi put uvodi pojam bionika na simpoziju američkog zrakoplovstva 1960. godine, a može se definirati kao interdisciplinarna znanost koja se bavi razvojem sustava ili funkcija koje su utemeljene na sličnom organizmu u prirodi. Janine Benyus u svojoj knjizi *Biomimicry- Innovation Inspired by Nature* (1997) biomimikriju definira kao pojam koji je iznad bionike, te definira prirodu kao model, mjeru i učiteljicu. Prema Benyus, čovjek koristi prirodu kao model kada rješenje problema traži u postojećim prirodnim rješenjima, prirodu kao mjeru kada se pazi na ekološki učinak inovacija, kada se postojeće ljudsko rješenje problema pronalazi u prirodnim rješenjima (Cohen i Reich, 2016; Ivanić i sur., 2015).

Cilj ovog rada je prikazati primjere u kojima su invertebrata poslužili kao modelni organizmi za inovacije u području biomaterijala, arhitekture i robotike te ukratko prikazati ekonomski potencijal bionike i biomimikrije.

2. BIOMATERIJALI

Pojam biomaterijali označava skupinu materijala koji potječu kao produkti ili su dio tijela živog organizma (bibusne niti školjaka, egzoskelet člankonožaca itd.). Industrija materijala uzima za inspiraciju prirodno postojeće strukture organizacije materijala za izradu umjetnih ekvivalenata (Meyers i sur., 2008). Druga definicija biomaterijala koja je češća u medicini, jest da su biomaterijali svi materijali koji su biokompatibilni s tkivima organizma u koje se materijal ugrađuje (Ratner i Bryant, 2004). U ovom radu ću koristiti prvu definiciju, jer je šireg konteksta u odnosu na drugu, koja je prvenstveno vezana uz područje zdravstva. Najčešći biomaterijali koji se koriste u istraživanjima u bionici su hitin i hitosan (Meyers i sur., 2008; Zargar i sur., 2015).



Slika 1 Strukturne formule hitina (A) i hitosana (B). Preuzeto iz: ChemSpider.com

Hitin, prirodni strukturni polisaharid građen od N-acetilglukoamina, glavni je građevni materijal stanične stijenke gljiva, egzoskeleta rakova i kukaca te radule mekušaca (Slika 1A). Zbog svoje biokompatibilnosti, zanemarive toksičnosti i biorazgradivosti, primjenjuje se u prehrambenoj industriji, farmaceutici, poljoprivredi, kozmetičkoj industriji, medicini (zavoji i mrežice u kirurgiji i traumatološkoj medicini) i biotehnologiji. Hitin se primarno koristi u praškastom obliku u komercijalnoj proizvodnji, no u posljednje vrijeme se u biotehnologiji nova istraživanja fokusiraju na ekstrakciju prirodno postojećih hitinskih struktura, poput mikrostruktura krila leptira za difrakciju svjetlosti u optici (Meyer i sur., 2008; Zargar i sur., 2015).

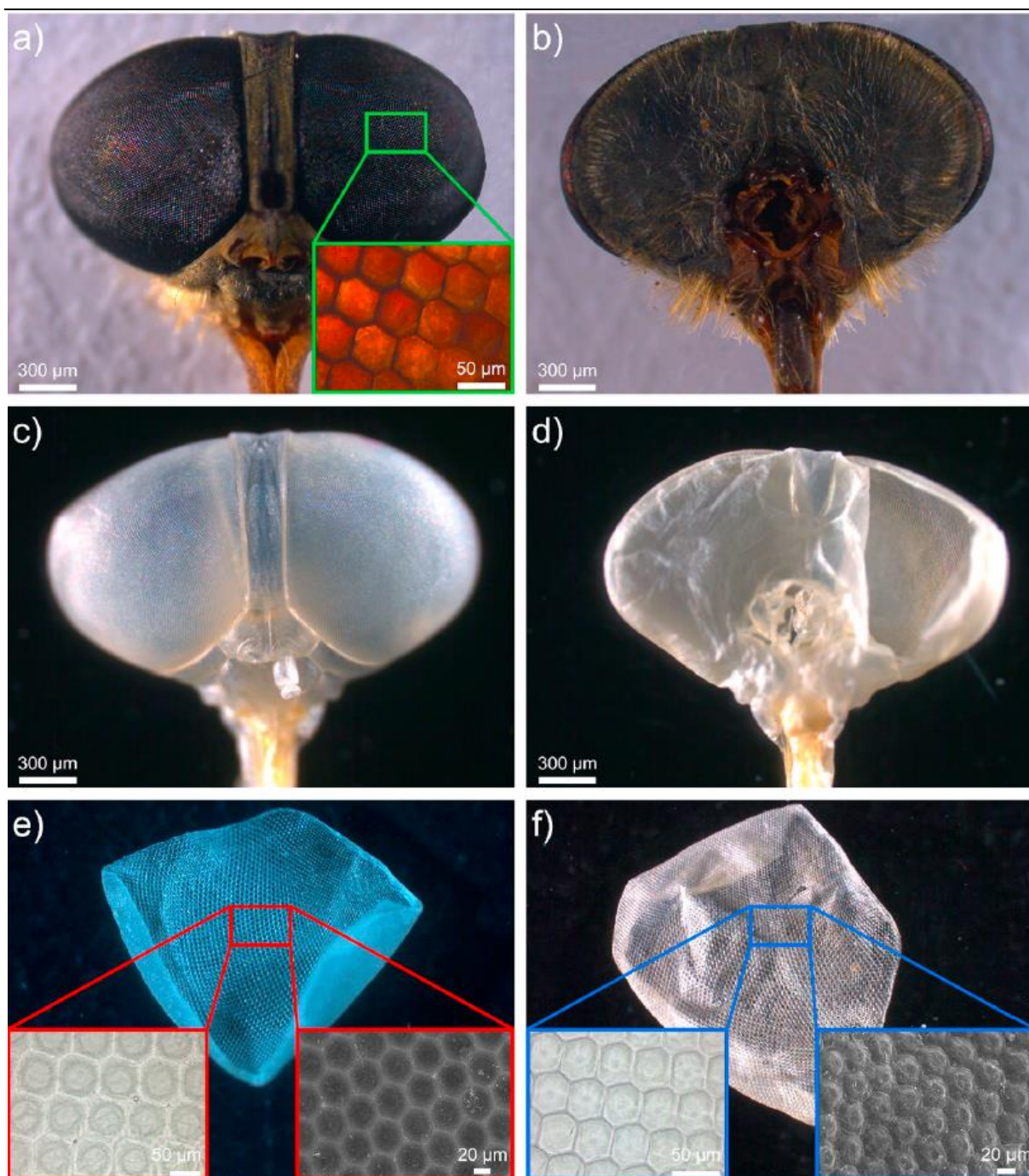
Hitosan se komercijalno proizvodi deacetilacijom hitina, a po kemijskoj građi to je linearni polisaharid sastavljen od strukturno nepravilno povezanih β -(1 \rightarrow 4)- D-glukoamina i N-acetil-D-glukoamina (Slika 1B). Primjenjuje se kao pesticid, fungicid i kao biomaterijal u

medicini (umjetna koža, kirurški konac, kontaktne leće, membrane u uređajima za dijalizu) (Meyer i sur., 2008; Zargar i sur., 2015).

2.1. Hitosan: sustav za primjenu lijekova i antimikrobni materijal

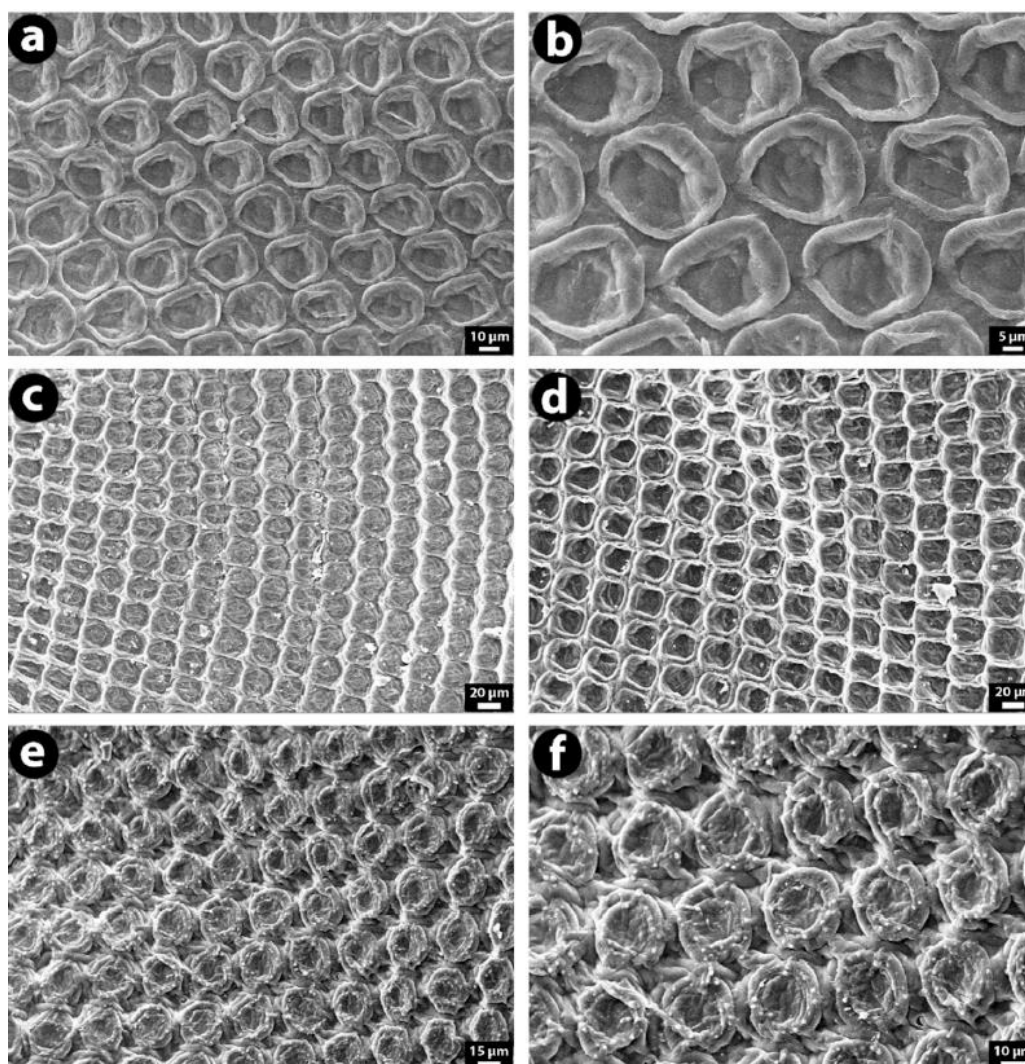
Za tretiranje upalnih procesa, İlk i sur. (2020) koriste prirodno postojeću hitinsku strukturu koji se nalazi u lećama obada (*Tabanus bovinus* L., 1758) kao materijal za primjenu lijeka kvercetina. Hitosan se već koristio u proizvodnji lijekova, zbog svojih odličnih svojstava poput biorazgradivosti, zanemarive toksičnosti, biokompatibilnosti i dobre permeabilnosti membrana pod tržišnim imenom Ciclopoli® (Bernkop-Schnürch i Dünnhaupt, 2012). Za razliku od dosadašnjih radova, İlk i sur. (2020) koriste prirodno postojeću 3D strukturu koja se nalazi u lećama obada (*T. bovinus*) dok su prijašnji radovi (Hao i sur., 2017; Cirilo i sur., 2019) koristili hitosan samo kao materijal za izradu gelova nosioca farmakološkog materijala. Autori su prikupljene leće obada kemijski tretirali kako bi izdvojili hitinsku strukturu iz leća (demineralizacija HCl-om, deproteinizacija otopinom NaOH, ispiranje rezidualnih pigmenata otopinom kloroforma, destilirane vode i etilnog alkohola). Izolirana hitinska struktura je pretvorena u hitosanski oblik dugotrajnim izlaganjem u vrućoj otopini NaOH.

Morfologija izoliranih hitosanskih membrana analizirana je stereomikroskopom i skenirajućom elektronskom mikroskopijom (eng. *Scanning Electron Microscopy*, SEM). Na slici 2 prikazan je izgled i struktura izoliranih leća, dok je na SEM-u vidljiva razlika u strukturi hitinskog filma; ventralna strana prikazuje papilarnu strukturu, a dorzalna strana strukturu ponavljajućih šesterokuta, prisutna zbog odsutnosti minerala i struktura pojedinih omatida složenog oka obada. Dorzalna strana filma također ima udubljenja u svojoj strukturi, što je primijenjeno za adsorpciju kvercetina na hitosanski film. Kvercetin, spoj koji pripada skupini flavonoida u posljednjem desetljeću je predmet istraživanja farmaceuta i nutricionista zbog jakog antioksidativnog učinka. Antioksidansi pomažu organizmu u borbi protiv oksidativnog stresa, na način da smanjuju nastanak slobodnih radikala i reaktivnih kisikovih skupina (eng. *Reactive Oxygen Species*, ROS). Kvercetin je u kliničkim istraživanjima *in-vitro* imao protuupalno djelovanje, usporavanje rasta kancerogenih stanica i smanjenu stopu mutacije zdravih stanica. U istraživanjima *in-vivo* imao je antioksidativni i protuupalni učinak (Boots i sur., 2008). İlk i sur. (2020), smatraju da ugradnja kvercetina u hitosanske membrane pomaže u aktivnosti kvercetina *in-vivo*, zbog postupnog ispuštanja aktivne tvari u organizam.



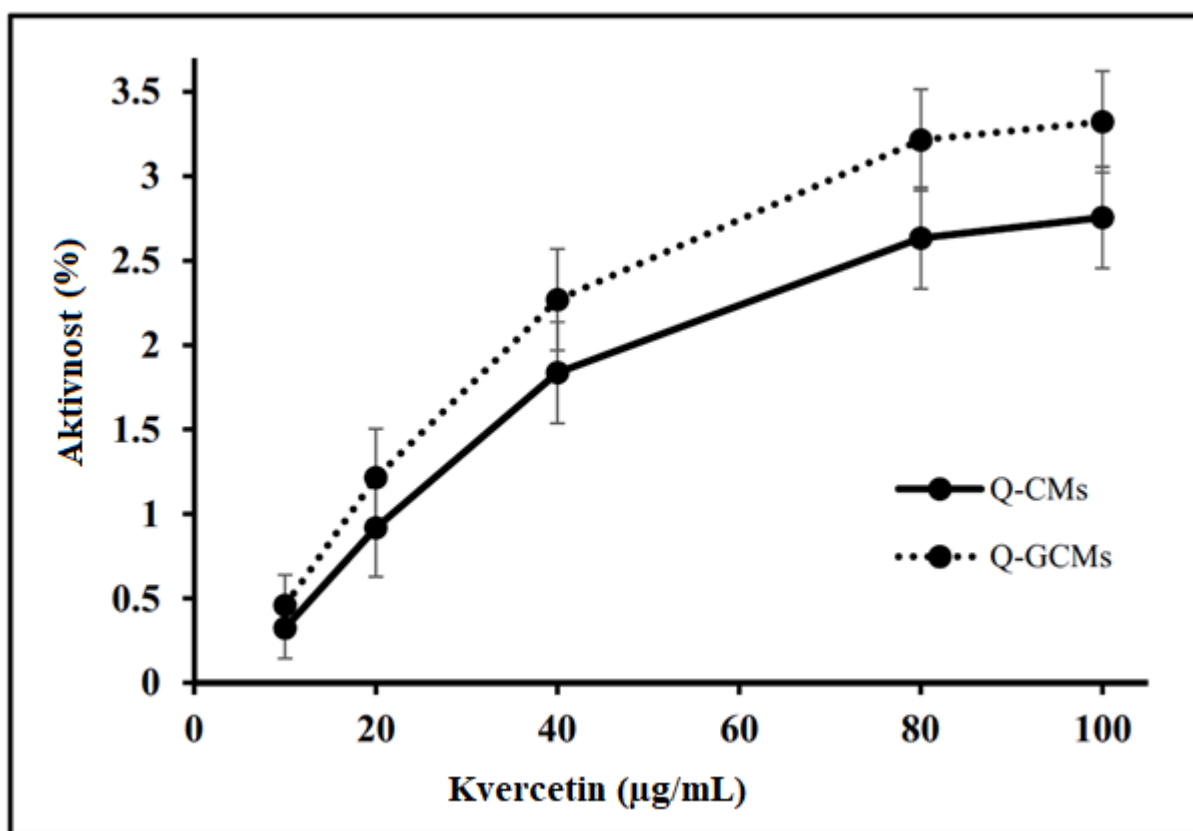
Slika 2 Izgled i struktura izoliranih leća obada (*T. bovinus*) snimljenih pod stereomikroskopom, s dorzalne (a,c,f) i ventralne (b,d,e) strane. Mikrosnimke prikazuju strukture omatida snimljene SEM-om na kojem je vidljiva papilarna i heksagonalna (f) struktura. Preuzeto iz: Ālk i sur., 2020.

Na slici 3 vidljiva je struktura dorzalne strane hitinskog filma na SEM mikrosnimkama. Membrane tretirane glutaminom imaju degenerativne promjene na pojedinim omatidama zbog međusobne interakcije kvercetina i membrane. Autori su tijekom istraživanja tretirali hitosanske membrane glutaminom, jer su istraživanja Pal i sur. (2013) pokazala kako su drugi flavonoidi imali bolju bioaktivnost ukoliko su bili u prisustvu glutamina. Maksimalna koncentracija kvercetina bez utjecaja na strukturni integritet hitosanske membrane jest 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$.



Slika 3 SEM mikrosnimke praznih hitosanskih membrana omatida obada (*T. bovinus*) Mikrosnimke a i b prikazuju strukturu praznih omatida hitosanskih mebrana, c i d prikazuju omatide ispunjene kvercetinom, dok mikrosnimke e i f prikazuju omatide tretirane glutaminom koji je povećao nosivost membrana, ali smanjio uniformnost strukture membrana (vidljiva je degenerativna promjena u rubovima ćelija). Preuzeto iz: Ālk i sur., 2020.

Hitosanske membrane su testirane raznim koncentracijama kvercetina te je utvrđeno da je koncentracija od 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ najprikladnija za njegovu primjenu u farmaceutici, jer je za tu koncentraciju u organizmu dostupna najveća količina aktivne tvari za apsorpciju, bez degenerativnih promjena na membrani stanica nosioca (Slika 4). Membrane ispunjene kvercetinom imale su antibakterijska svojstva, slične učinkovitosti s komercijalno dostupnim antibiotikom gentamicinom. Efektivnost je bila bolja u djelovanju na gram negativne (*Escherichia coli*, Migula, 1895) u odnosu na gram pozitivne bakterije (*Staphylococcus aureus*, Rosenbach, 1884) (Ālk i sur., 2020).



Slika 4 Bioaktivnost kvercetina pri različitim koncentracijama. Kratice: Q-CMs- hitosanske membrane ispunjene kvercetinom; Q-GCMs- hitosanske membrane tretirane glutaminom i ispunjene kvercetinom. Preuzeto i prilagođeno iz: Ālk i sur., 2020.

2.2. Hitin: plazmonski materijal za SERS bioanalitiku

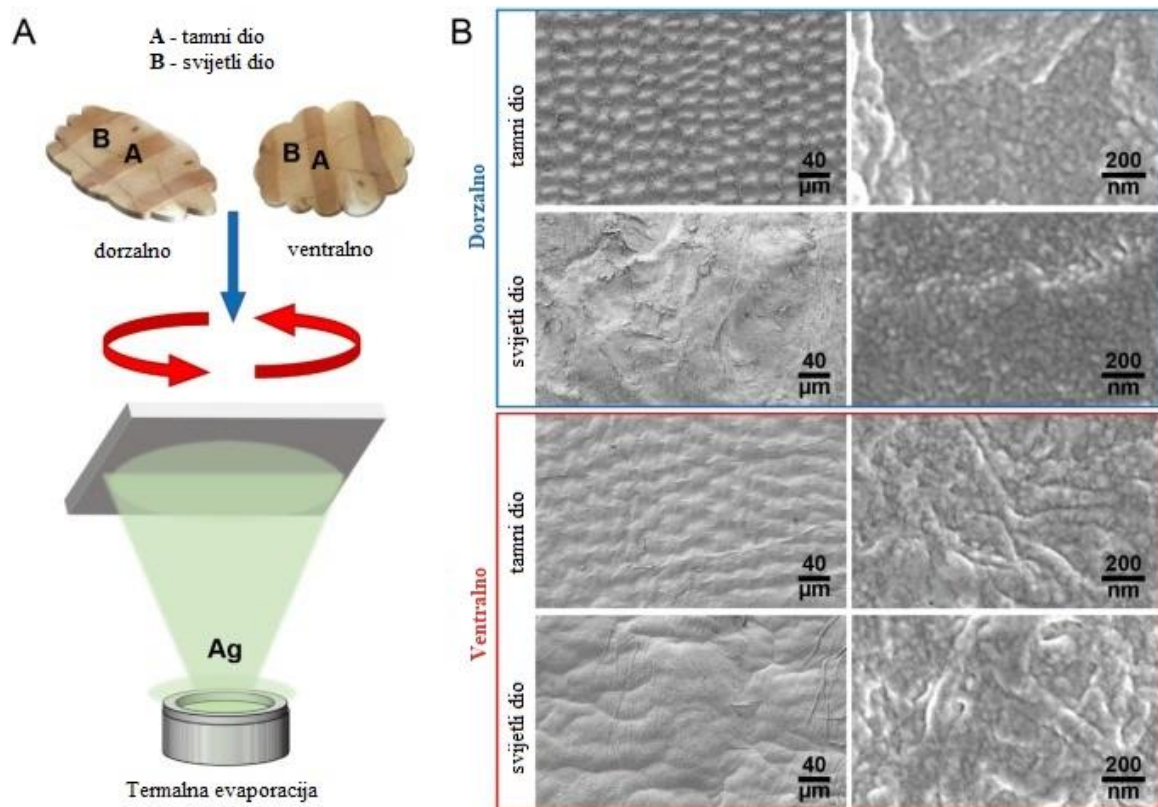
Plazmonika je novo područje u analitici koje proučava interakcije svjetlosti i metalnih nanostrukture. Površinski-pojačano ramansko raspršivanje (eng. *Surface-enhanced Raman Scattering*, SERS) jest izvrsna analitička tehnika koja koristi plazmoniku za detaljnu kemijsku analizu molekula vezanih ili adsorbiranih na metalne nanostrukture (Kahraman i sur., 2016). SERS metoda se oslanja na činjenicu da elektronski oblaci molekule koju želimo analizirati, u svojoj međusobnoj interakciji s površinom metalnih nanostrukture dovodi do amplifikacije elektronskog oblaka za detekciju. U odnosu na klasičnu Ramanovu spektroskopiju, SERS je puno osjetljiviji na vrlo niske koncentracije ispitivane tvari (Kahraman i sur., 2016).

Chen i sur. (2021) su uspješno izolirali hitinsku mikrostrukturu iz kukuljica leptira japanskog divovskog svilca (*Caligula japonica* Moore, 1872) te prikazali mogućnosti za primjenu izolirane strukture u SERS bioanalitici. Autori su prikupljene kukuljice kemijski obradili kako bi izdvojili hitinsku strukturu iz kukuljica leptira (demineralizacija HCl-om, deproteinizacija otopinom NaOH, ispiranje rezidualnih pigmenata 70% otopinom etilnog alkohola) (Slika 5).



Slika 5 Metode obrade kukuljice leptira japanskog divovskog svilca (*C. japonica* Moore, 1872). Preuzeto i prilagođeno iz: Chen i sur., 2021.

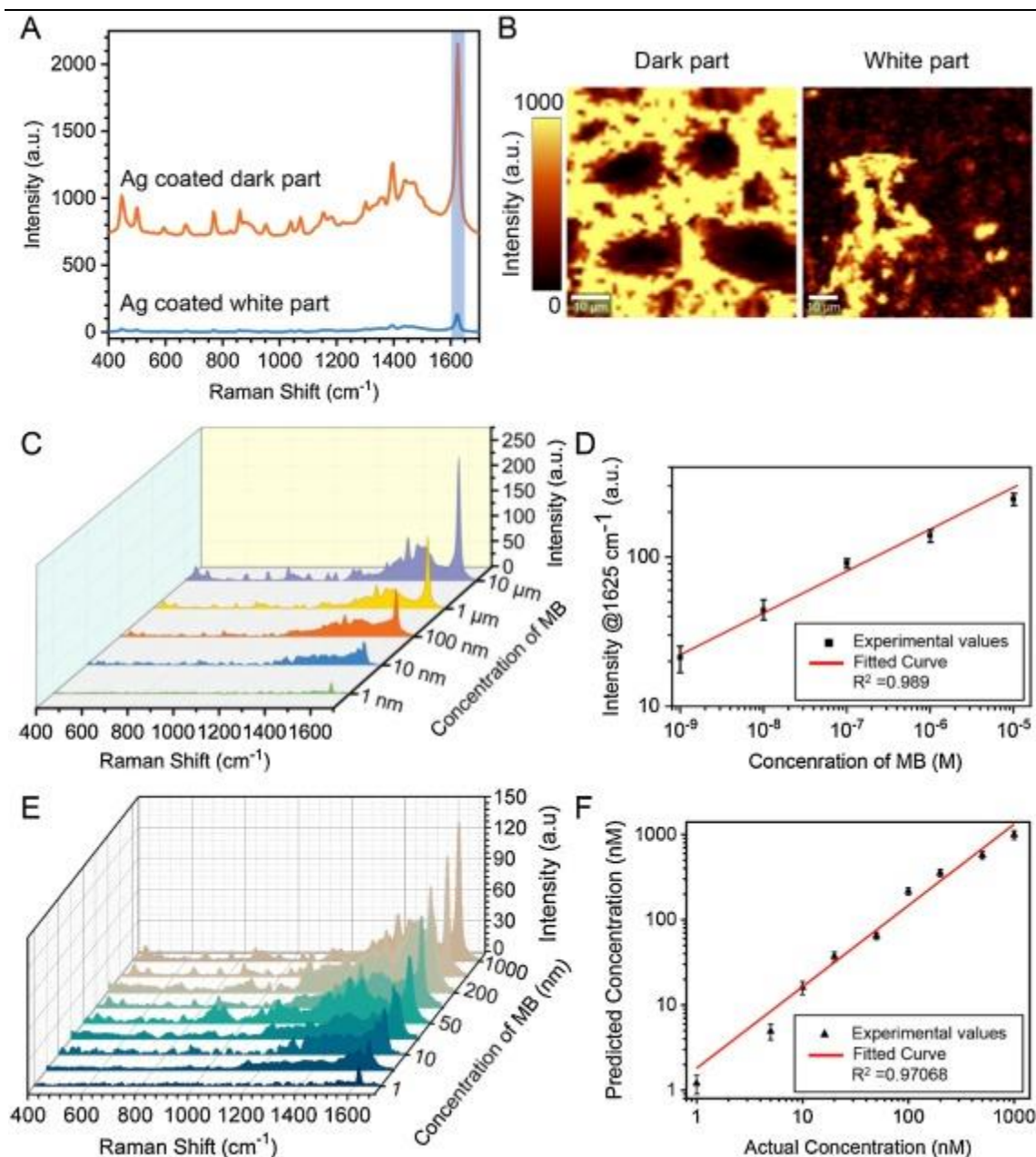
Nakon sušenja hitinske membrane, opaženi su tamniji i svjetliji dijelovi kukuljice, vidljivi zbog interakcije vidljivog svjetla i mikrostrukture površine: Naime na mikrostrukтури dolazi do difrakcije svjetlosti i time nastaju svijetle i tamne pruge. Metodom skenirajuće elektronske mikroskopije elektronskog polja (eng. *Field-Electron Scanning Electron Microscopy*, FE-SEM) opažena je nova morfologija hitinske površine. Izolirani hitinski film pokazuje značajnu razliku u strukturi između tamnih i svijetlih dijelova te autori smatraju kako bi to obilježje bilo korisno istražiti u SERS analitici. Na hitinski film nanesen je tanki sloj srebra metodom termalne evaporacije (Slika 6). Termalna evaporacija nanosi metal na površinu kukuljice, polaganim taloženjem metala iz plinske faze na površinu. Metoda omogućuje polagano i ravnomjerno nanošenje materijala, tj. srebra, u vrlo tankim slojevima.



Slika 6 Izrada i opis srebro-hitinskog filma. A) Shematski prikaz nanošenja srebra na hitinski film metodom termalne evaporacije; B) FE-SEM mikrosnimke srebro-hitinskog filma dorzalne i ventralne strane kukuljice pri raznim povećanjima. Tamni dijelovi imaju papilarnu strukturu, dok svjetliji dijelovi nemaju pravilnu mikrostrukturu.

Preuzeto i prilagođeno iz: Chen i sur., 2021.

Tamni dijelovi kukuljice imaju strukturu izgrađenu od ponavljajućih poligona oštih rubova. Oštri rubovi su potrebni za amplifikaciju elektronskog oblaka molekule koju želimo analizirati. Navedena struktura je novo otkriće u prirodnim hitinskim polimerima te je dobila ime mikropapilarna struktura hitina. Aktivnost materijala za primjenu u SERS analitici, testirana je metilenskim plavilom, koji je nanesen na svijetle i tamne dijelove srebrom obloženim hitinskim filmom. Na slici 6A vidljiv je karakteristični maksimum metilenskog plavila pri 1625 cm^{-1} što je dokaz da srebrom obloženi hitinski film ukazuje na amplifikaciju signala potrebnu za SERS analitiku. Signal tamnog dijela filma bio je 10 puta jačeg intenziteta od svijetlog dijela. Film je pokazao odličnu uniformnost površine (7,5 % relativne standardne devijacije), što je bolje od supstrata pripremljenih od koloidnih nanočestica. Iako obje strane pokazuju odličnu uniformnost površine, samo tamna strana posjeduje strukturu ponavljajućih poligona oštih rubova, koji su potrebni za stvaranje SERS aktivne površine pa je stoga i tolika razlika u spektralnoj aktivnosti metilenskog plavila. Za testiranje točnosti mikrofilma, pripremljene su koncentracije metilenskog plavila te su izmjerene vrijednosti vrlo dobro odgovarale stvarnim koncentracijama metilenskog plavila ($R^2=0,97$) (Slika 7). S obzirom na točnost mjerenja koncentracija metilenskog plavila, hitinski mikrofilm i njegova struktura imaju potencijal za daljnje primjene u SERS analitici i drugim plazmanskim metodama u analitičkoj kemiji (Chen i sur., 2021).



Slika 7 SERS aktivnost srebro-hitinskog filma; A) SERS spektar metilenskog plavila; B) Slike ramanskog mapiranja površine, koristeći Ramanski pomak od 1625 cm^{-1} ; C) SERS spektar metilenskog plavila koncentracija 1-1000 nM; D) Korelacija koncentracije metilenskog plavila i SERS inteziteta pri 1625 cm^{-1} ; E) SERS mjerenja koncentracija od 1-1000 nM u usporedbi sa stvarnim koncentracijama uzoraka metilenskog plavila.

Preuzeto iz: Chen i sur., 2021

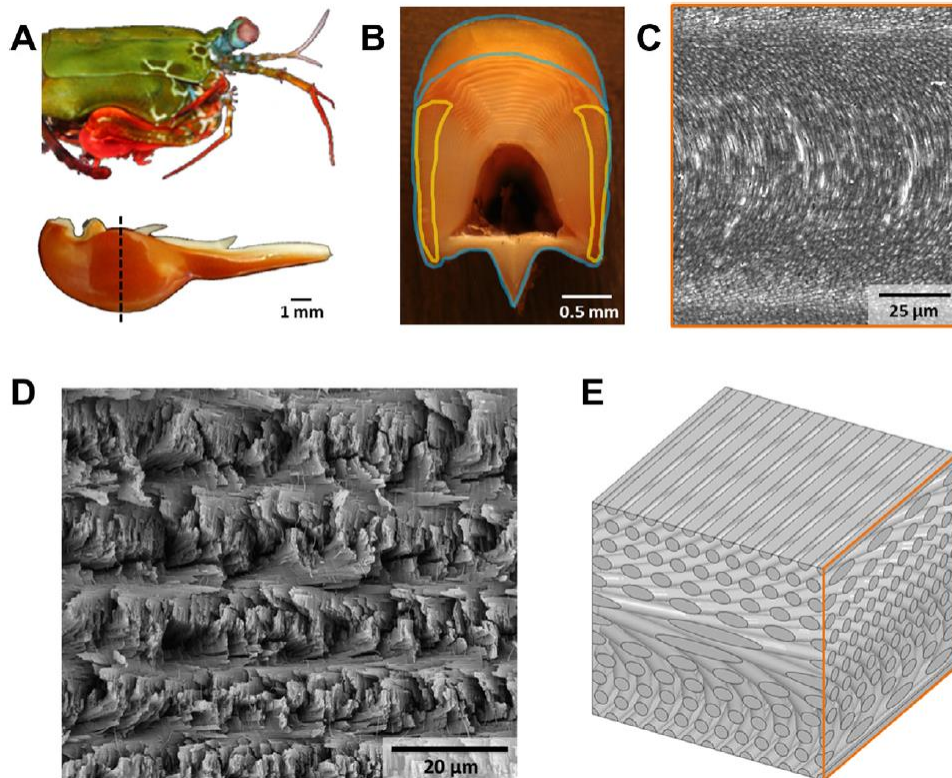
2.3. Kompozitni materijali otporni na udarce

Prirodni materijali su poznati po svojoj efikasnosti u korištenju dostupnih tvari, jer organizmi su evolucijskim razvojem optimizirali sintezu biomaterijala. Po građi, to su često mineralizirani kompozitni materijali, sastavljeni od organske jezgre koja služi kao baza za rast minerala (Meyer i sur., 2008).

Kompozitni materijali otporni na udarce su od velike koristi za vojnu industriju, pa su nakon otkrića kevlar (para-aramidnog umjetnog vlakna, otpornog na toplinu), daljnja istraživanja uključivala i prirodne kompozitne materijale. Ustonošci (Stomatopoda) su red grabežljivih morskih rakova, poznati po načinu lova, koji uključuje vrlo jake udarce svojim kliještima (Brusca, 2017). Kliješta vrste *Odontodactylus scyllarus*, L., 1758, izgledom sličice palicama, a jedinke te vrste mogu postići udarce akceleracije do 104 ms^{-2} i brzine do 23 ms^{-1} što ih čini među najjačima u prirodi (Patek i Caldwell, 2005). Materijal od kojeg je izgrađen egzoskelet kliješta mora biti jak i čvrst kako bi prenio udarni moment na plijen, no mora biti i tvrd i rezistentan kako bi preživio mnogobrojne udarce o plijen. Struktura koja omogućuje ustonošcima takvu rezistentnost na udarce je tzv. Bouligand struktura, koja je definirana kao ponavljajuća struktura helikoidalnih slojeva vlakana α -hitina. Grunenfelder i sur. (2014), koriste Bouligand strukturu kao model za izradu umjetnih materijala velike čvrstoće, pritom koristeći strukturu koja je prirodno prisutna u ustonošca *O. scyllarus*. Na slici 8E vidljiva je helikoidalna struktura vlakana koja zbog svoje spiralne strukture daje ravnomjerno raspoređivanje vanjske sile kod udaraca, jer se sila može širiti uzduž pojedinih vlakana te zbog zavojitosti mora proći dulji put, što pomaže u amortizaciji udarne sile. U transverzalnom presjeku egzokutikule vidljiva je struktura isprepletenih lukova vlakana, kod kojih je kut luka proporcionalan unutarnjoj snazi strukture (Grunenfelder i sur., 2014) (Slika 8). Autori su nakon analize kliješta ustonošca, izabrali ugljična vlakna kao materijal za izradu biokompozita (HexTow®IM7, Hexcel, SAD). Pripremljene su tri kompozitne pločice s različitim kutovima između pojedinih ugljičnih vlakana Bouligand strukture ($7,8^\circ$, $16,3^\circ$ i $25,7^\circ$) i dvije kontrolne skupine od kojih jedna ima paralelni raspored vlakana, dok druga okomiti. Pločice su termički tretirane zbog boljih mehaničkih karakteristika ugljičnih vlakana jer se ista skupe tokom termičke obrade.

Sve su pločice nakon toplinskog očvršćivanja testirane višestrukim udarcima utega poznate mase. Analiza unutarnjeg oštećenja provedena je ultrazvukom. Kontrolna skupina materijala je pretrpjela najveća oštećenja te je jedina skupina gdje su vidljive frakture na površini

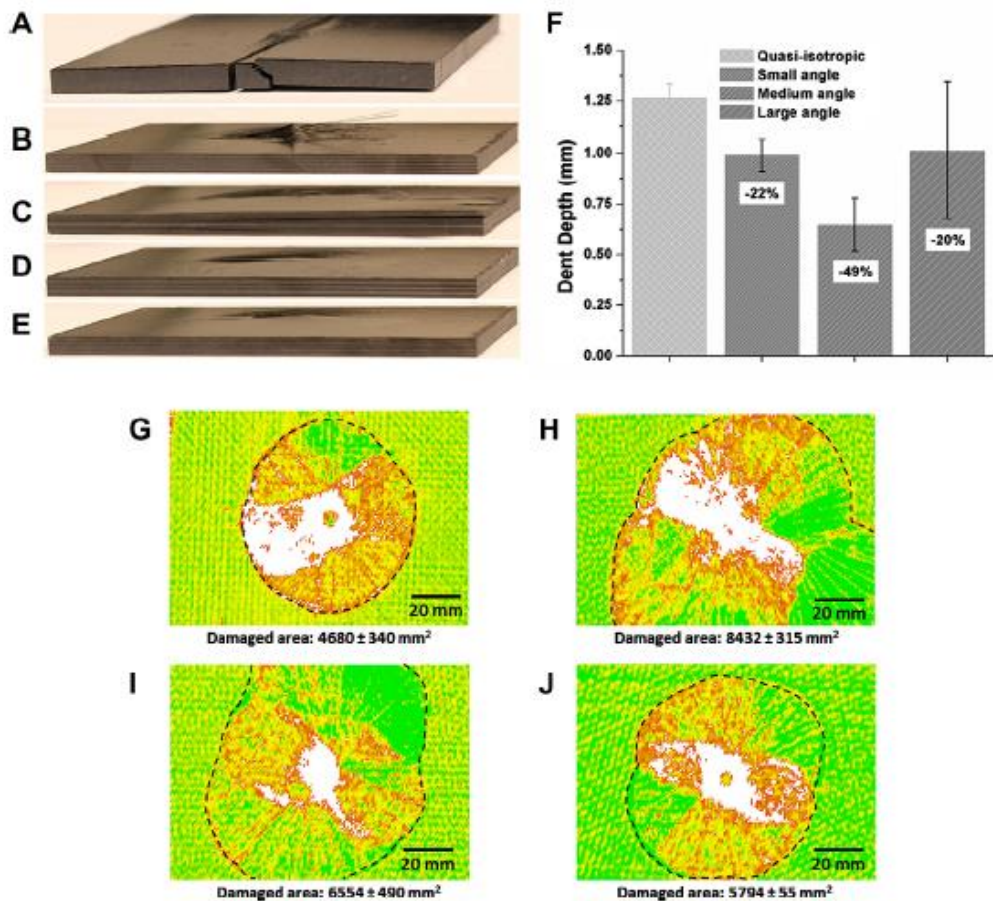
materijala. Materijali helikoidalne organizacije vlakana nisu imali nikakve frakture na površini, već samo blaga udubljenja površine koja je bila izložena udarcu i blago razdvajanje vlakana na suprotnoj strani površine.



Slika 8 Prikaz modelnog organizma za izradu biokompozita i prikaz prirodne strukture hitina u egzoskeletu. A) Fotografija ustonošca *O. scyllarus*, ilustracija kliješta s iscrtanom linijom koja označava mjesto presjeka za analizu biomaterijala; B) Stereomikroskopska fotografija transverznog presjeka kliješta, na kojoj je vidljiva egzokotikula (označeno plavom bojom), strijatizirani (usporedni) dio kliješta (označen žutom bojom) i dio ponavljajućeg dijela polimera (ostatak kliješta); C) SEM mikrosnimka jednog poliranog presjeka, na kojem je vidljiva karakteristična struktura isprepletenih lukova vlakana; D) SEM mikrosnimka više slojeva površine kliješta, na kojoj je vidljiva helikoidalna struktura vlakana; E) Shematski prikaz Bouligandove geometrije, gdje je jasnije strukturu isprepletnih lukova kao posljedicu helikoidalne organizacije vlakana α -hitina Preuzeto iz: Grunenfelder i sur., 2014.

Na ultrazvučnim snimkama vidljivo je oštećenje unutarnjih slojeva kliješta, što je bolja refleksija ultrazvuka nekog materijala, to je postojanija njegova unutarnja struktura. Zelena boja označava dobru refleksiju signala (> 90 %), žuta 50%, crvena 10%, dok bijela boja

označava prazne piksele tj. Na tom području ne postoji refleksija signala što indicira totalnu štetu materijala (ne postoji organizirana struktura) (Slika 9). Helikoidalna struktura za razliku od paralelnog ili okomitog rasporeda, omogućuje bolji prijenos energije udarca na okolna vlakna i time smanjuje unutarnji stres materijala. S obzirom na to da su sve pločice pripravljene istom tehnikom izrade, razlika u rezultatima se može pripisati samo unutarnjoj strukturi materijala (Grunenfelder i sur., 2014). Daljnji napredak u ovom području bi se mogao nastaviti ukoliko bi se realizirala tehnika varijabilne izrade biomaterijala koja bi bolje oponašala prirodnu strukturu koja postoji u ustonošca *O. scyllarus*. Naime prirodna struktura za razliku od umjetne ima varijabilnost u postotku mineraliziranog hitina, što omogućuje jaču rezistentnost na udarce u području kliješta, a unutarnji slojevi imaju manji postotak mineraliziranog hitina što omogućuje veću elastičnost materijala i time bolju apsorpciju energije udarca bez unutarnjih fraktura materijala (Weaver i sur., 2012).



Slika 9 Prikaz oštećenja nastalih udarcima utega poznate mase. A) paralelni raspored vlakana; B) okomiti raspored vlakana; C) helikoidalni raspored vlakana malog kuta; D) helikodalni raspored vlakana srednjeg kuta; E) helikoidalni raspored vlakana velikog kuta; F) prikazuje dubinu udubljenja nastalog udarcem. Ultrazvučni snimci oštećene unutarnje strukture kompozita. G) okomiti raspored vlakana; H) helikoidalni raspored malog kuta; I) helikoidalni raspored srednjeg kuta; J) helikoidalni raspored velikog kuta. Iscrтана linija prikazuje opseg oštećenog materijala. Preuzeto iz Grunenfelder i sur., 2014.

3. ARHITEKTURA

Arhitekti su tijekom povijesti često inspiraciju za građevine tražili u prirodi. Koristeći se prirodnim omjerima poput zlatnog reza, stvarali su strukture koje su i dalje bile osnovane na prirodnim konceptima. Također, prirodno postojeće strukture u biljaka i životinja su korištene za izradu dijelova građevina (npr. struktura lista za raspodjelu tereta krovista, spiralni navoj puževe kućice u izradi stubišta).

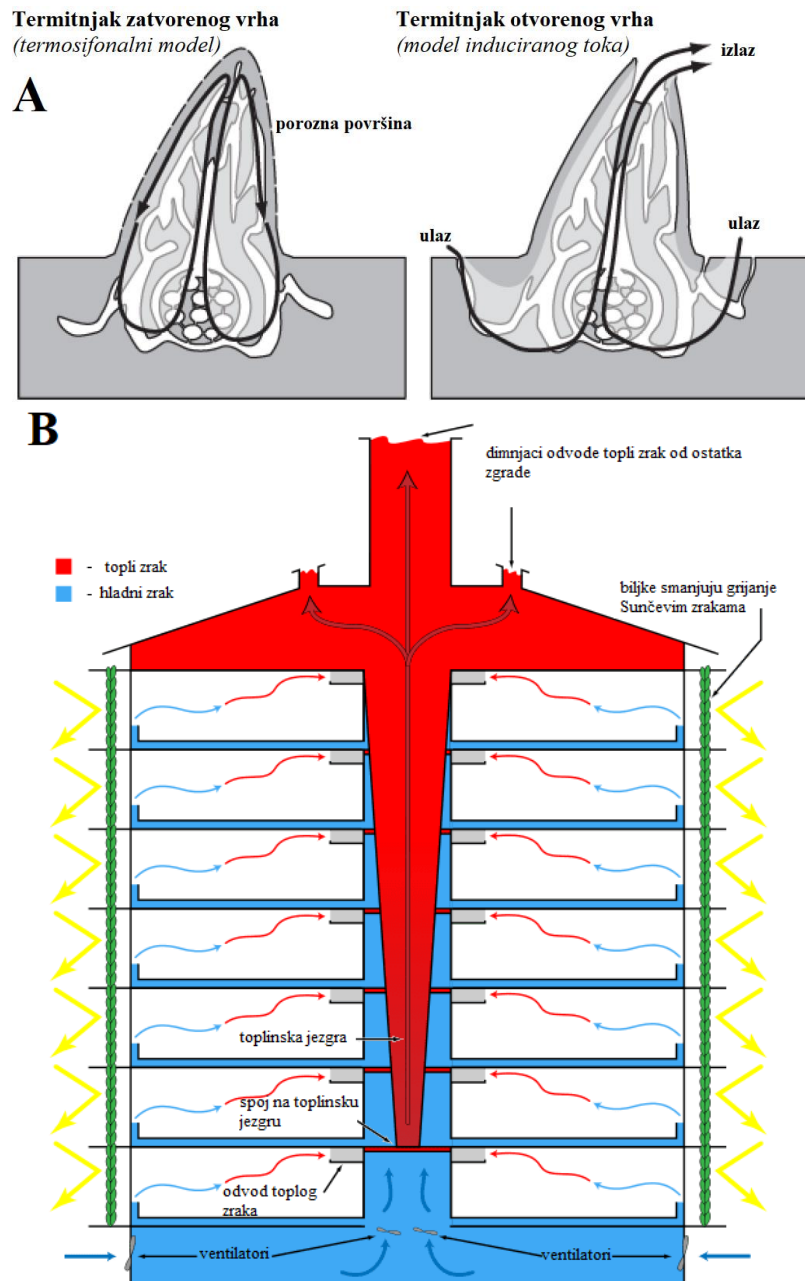
3.1. Eastgate Centre i termiti

Eastgate Centre je trgovački centar i uredski blok u središnjem Harareu, Zimbabve (izgrađen 1996. godine), kojeg je dizajnirao američki arhitekt Mick Pearce. Kao inspiracija za izradu termalnog dizajna zgrade, poslužili su humci kukaca termita, vrsta *Macrotermes michaelseni*, Sjöstedt, 1914 i *Macrotermes subhyalinus*, Rambur (Pawlyn, 2016), koji za regulaciju temperature svojih humaka koriste kombinaciju stalne temperature tla i aktivne cirkulacije zraka vjetrom.

U prirodi postoje dvije vrste termitnjaka: termitnjaci otvorenog vrha te termitnjaci zatvorenog vrha. Za termitnjake zatvorenog vrha, razvijen je tzv. Termosifonalni model koji opisuje kretanje zraka u termitnjaku. Toplina koju proizvodi kolonija termita, dovoljna je da zagrije zrak prisutan u termitnjaku, koji za posljedicu ima manju gustoću te se diže na vrh termitnjaka. Porozna površina termitnjaka omogućuje hladnom zraku nadomjestak volumena toplog zraka i na taj način održava ventilaciju unutar termitnjaka. Za opisivanje ventilacije termitnjaka otvorenog vrha, razvijen je model inducirano gibanje. Zbog otvorenog vrha, viši dijelovi termitnjaka su izloženi većim brzinama vjetra nego niži dijelovi. Razlika u brzini strujanja zraka za posljedicu ima stvaranje podtlaka unutar termitnjaka, pa se razvija strujanje koje uvlači hladni zrak iz nižih dijelova u termitnjak, prolazi kroz termitnjak i na kraju izlazi pri vrhu termitnjaka (Slika 10A; Turner, 2008).

Eastgate Centre u svojem dizajnu implementira oba rješenja; koristi inducirani tok za dovod hladnog zraka unutar zgrade, dok toplinu nastalu od korisnika zgrade i uređaja odvodi termosifonalno (Slika 10B; Pawlyn, 2016). Pearce je korištenjem postojećeg termalnog dizajna iz prirode uspio smanjiti troškove izgradnje za 10%, jer za održavanje ugodne

temperature unutar zgrade nije bilo potrebno ugraditi klimatizacijski sustav. Troškovi života za vlasnike trgovina i ureda bitno su niži od okolnih zgrada, zbog niže potrošnje električne energije (Pawlyn, 2016; Turner, 2008).



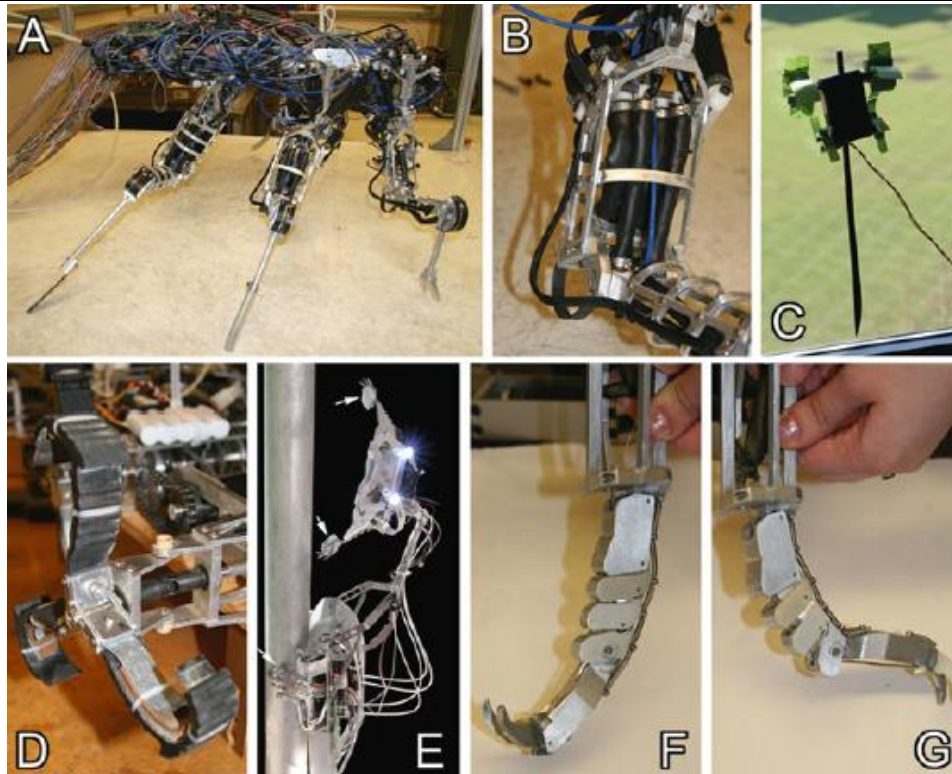
Slika 10 Bokocrt Eastgate centra (Harare, Zimbabve). A) Shematski prikaz termalnog toka unutar termitnjaka. Strelice označavaju smjer kretanja zraka unutar termitnjaka (preuzeto i prilagođeno iz Turner, 2008). B) Shematski prikaz termalnog dizajna zgrade Eastgate Centre, na kojem je vidljiva implementacija oba modela termalnog toka (preuzeto i prilagođeno iz: <https://asknature.org/innovation/passively-cooled-building-inspired-by-termite-mounds>)

4. ROBOTIKA

Robotika je perspektivno interdisciplinarno područje, koje uključuje računalne znanosti i elektroniku. Inženjeri zbog lakše izrade prototipova, često koriste modelne organizme zasnovane na morfologiji i funkcioniranju životinja, a zbog lake dostupnosti jedinki, invertebrata su postali popularan izbor u nalaženju rješenja i inovacija.

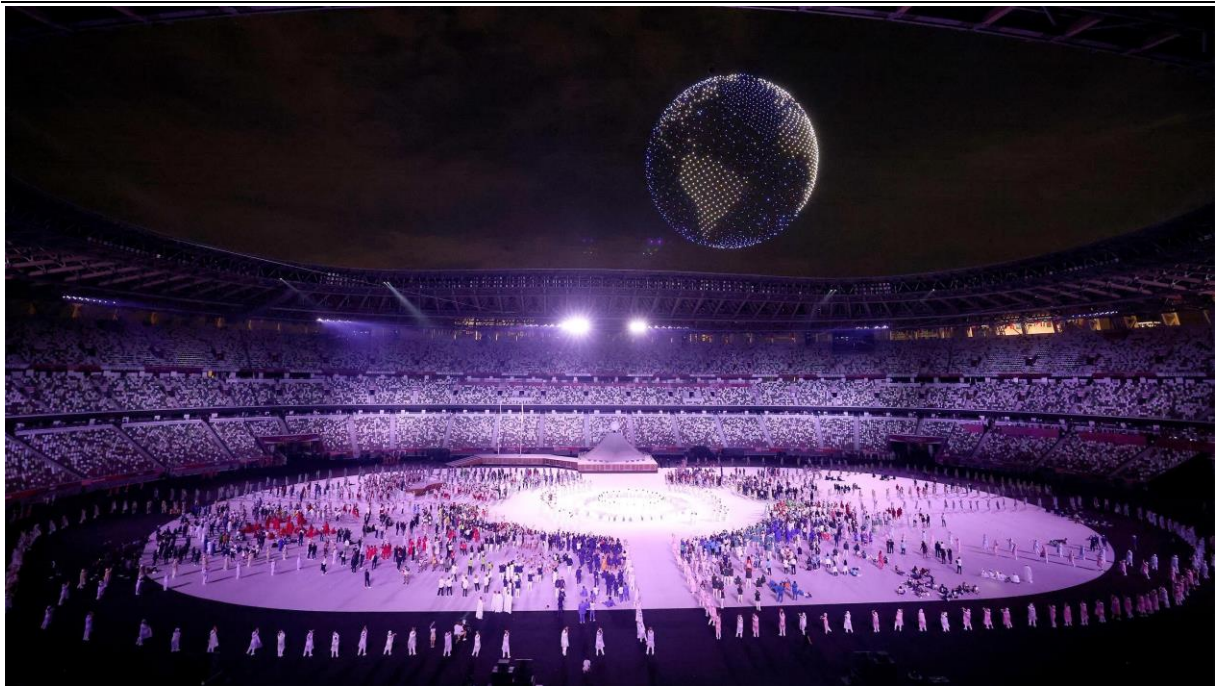
4.1. Kukci kao model za lokomotorni sustav robota

Kukci su najbrojniji razred člankonožaca (Arthropoda), koji obuhvaća oko milijun vrsta (Brusca, 2017; Habdija i sur., 2011). Različiti oblici nogu i krila, koji su nastajali tijekom evolucijskog razvoja omogućuju velik izvor inspiracije inženjerima robotike kao modelni organizmi za izradu robota. Dizajn robotskih nogu je inspiriran kukcima, s time da takvi roboti imaju puno veću pokretljivost na zahtjevnim podlogama u odnosu na tradicionalne robote koji koriste kotače ili gusjenice. Robotske noge, za razliku od nogu kukaca, imaju puno veći broj stupnjeva slobode za pojedinu nogu, što im omogućuje puno veći raspon različitih pokreta (Slika 11). Noge robota uglavnom se pokreću preciznim *steper* motorima ili hidrauličkim prijenosom. U usporedbi s kvadripedalnim robotima, roboti inspirirani kukcima posjeduju puno bolju dinamičku stabilnost (Vilcinskas, 2011).



Slika 11 Prikaz robotskih nogu inspiriranih kukcima. Slike A i B prikazuju raspored nogu koji odgovara općem planu građe kukaca, dok slike C, D, E, F i G prikazuju različiti raspored zglobova koji omogućuje velik raspon pokreta pojedine noge. Preuzeto iz: Vilcinskis, 2011

Osim oblika nogu i krila, obilježja ponašanja zadruženih kukaca izvor su inspiracije u rojnoj robotici (eng. *Swarm robotics*). Rojna robotika jest područje robotike koje za rješavanje nekog problema koristi velik broj manjih robota radilica, koji zajedno tvore jednu inteligentnu strukturu, koja može međusobno komunicirati i surađivati u rješavanju problema (Şahin, 2005). Trenutna implementacija rojne robotike jest većinom u vojnom sektoru, dok je u civilnom sektoru pronašla primjenu u industriji zabave, što se moglo vidjeti i na ljetnim Olimpijskim igrama u Tokiju 2021., gdje je na ceremoniji otvaranja 1800 dronova kreiralo globus (Slika 12).



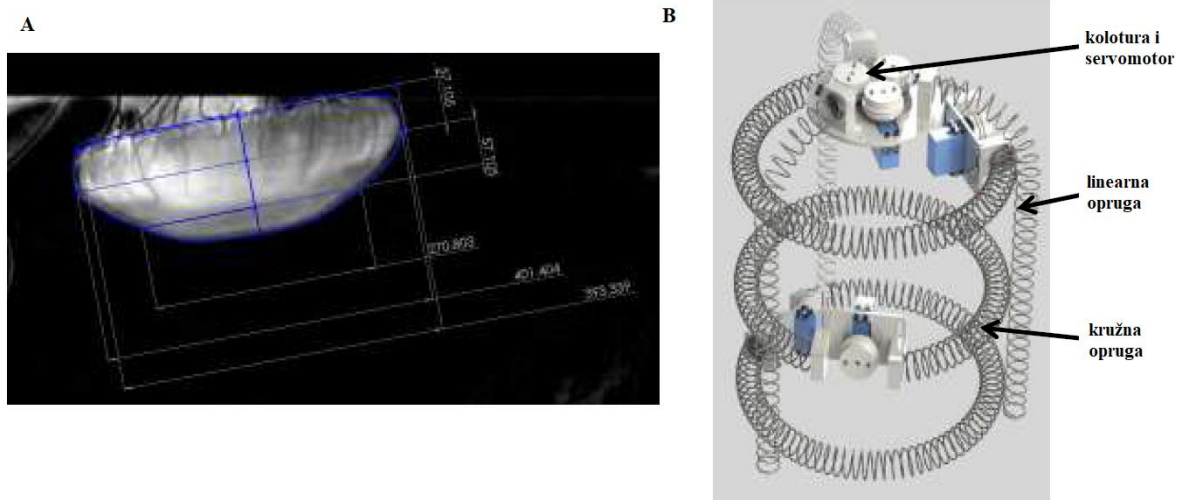
Slika 12 Primjer rojne robotike na otvaranju XXXII. ljetnih Olimpijskih igara u Tokiju (srpanj, 2021), globus je formiran od 1800 individualnih robota radilica koji zajedno čine jednu dinamičnu strukturu. Preuzeto iz: olympics.com.

4.2. Robotske meduze

Robotske meduze predstavljaju novi način pokretanja robota unutar fluida, jer za razliku od tradicionalnih robota, nemaju čvrste spojeve i zglobove. Nepostojanje čvrstih struktura omogućuje takvim robotima bolju pokretljivost u zagušenom okolišu (Nir i sur., 2012). Meduze se kreću naizmjeničnim sinkroniziranim kontrakcijama i relaksacijama zvona, koje potiskuje mlaz vode (Habdija i sur., 2011). Kretanje mlazom vode, smatra se jednim od najjednostavnijih i najefikasnijih načina za kretanje kroz fluid (Dickinson i sur., 2000).

Nir i sur. (2012), za modelni organizam prilikom dizajniranja robota, koristili su meduzu *Chrysaora quinquecirrha*, Desor, 1848 (Scyphozoa - režnjaci). Autori su snimali jedinku meduze tijekom kretanja u akvariju i koristeći softverski paket MATLAB za obradu snimki te izolirali funkciju kretanja zvona meduze (Slika 13A). Nakon što su izolirali funkciju kretanja, snimke su obrađene u softverskom paketu SOLIDWORKS, koji im je omogućio precizno mjerenje dimenzija i volumena mlaza prilikom svake kontrakcije i relaksacije zvona. Na

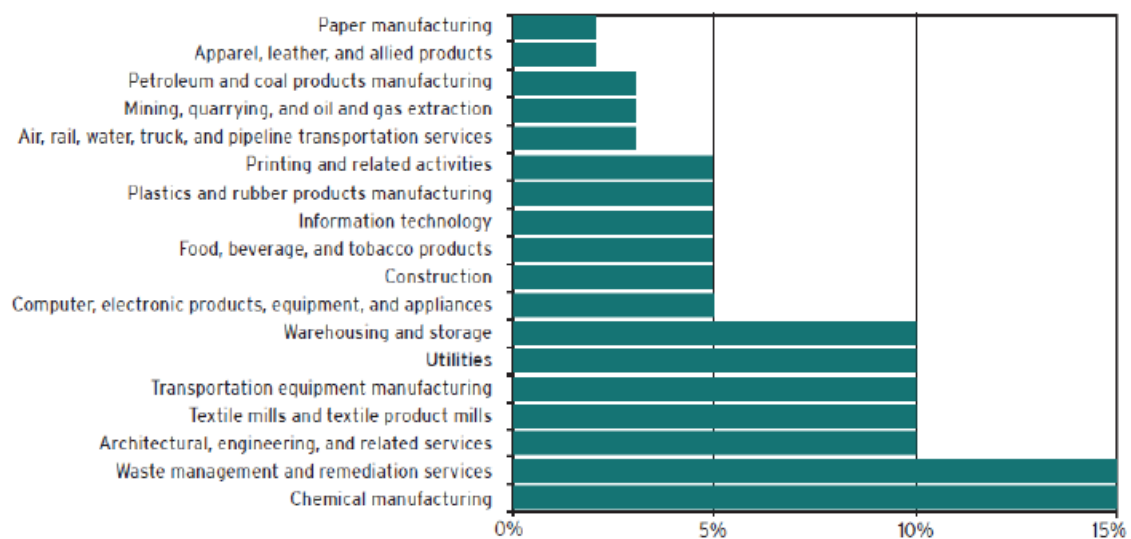
temelju dobivenih podataka, autori su dizajnirali robotsku meduzu (Slika 13B). Robot se sastoji od tri vertikalno postavljene kružne opruge, povezanih linearnom oprugom (Slika 13B). Napetost pojedine opruge može se mijenjati zasebno, što rezultira promjenom duljine opruge. Mijenjanjem duljine opruge, mijenja se i oblik zvona, što omogućuje kretanje robota na istovjetan način kao i žive jedinice meduza. Asimetričnim stezanjem opruga može se mijenjati smjer kretanja robota u fluidu. Unutarnji mehanizam robotske meduze presvučen je pokrovom izrađenom od lateksa koji služi kao umjetno zvono robotskoj meduzi. Lateks je izabran zbog svoje velike rastezljivosti i čvrstoće. Moguće primjene robotskih meduza uključuju razne poslove za koje je potrebna dugotrajna autonomija robota. Efikasnost u načinu kretanja robotskih meduza, može se povećati ukoliko se individualni roboti udružuju u jata i na taj način smanjuju otpor potreban za kretanje kroz fluid. Jedan od poslova koji bi jata robotskih meduza mogle obavljati jest sanacija naftnih mrlja, posao koji je zahtjevan za ljude dok bi jata meduza obloženih apsorpcijskim materijalom mogla dugotrajno na sebe vezati sirovu naftu i kasnije bi ih bilo potrebno samo sakupiti u spremnik za daljnje procesuiranje.



Slika 13 A) Prikaz analize snimke meduze (*C. quinquecirrha*) u softverskom paketu MATLAB; B) Unutarnji dizajn robotske meduze Preuzeto i prilagođeno iz: Nir i sur., 2012.

5. EKONOMSKI POTENCIJAL BIONIKE I BIOMIMIKRIJE

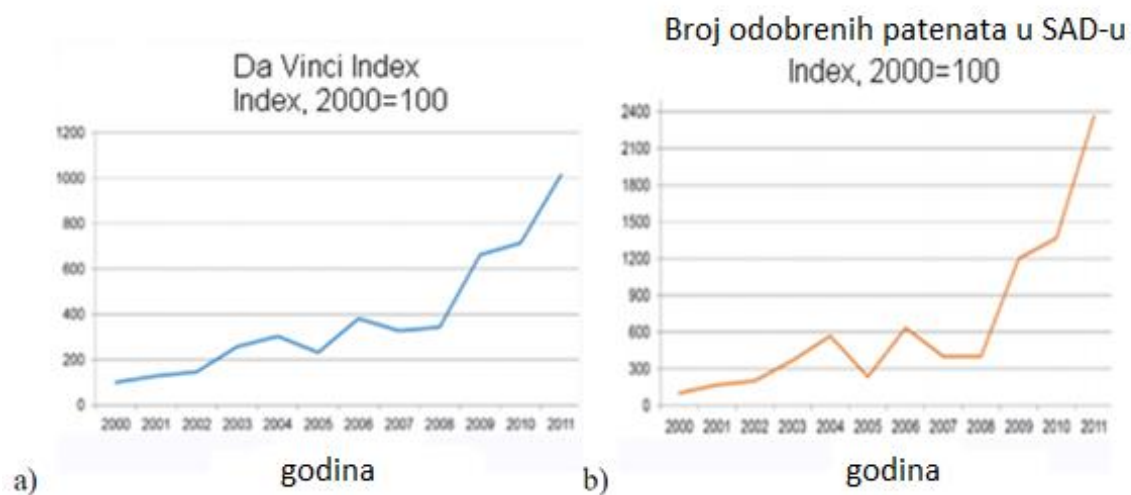
Bionika i biomimikrija postaju sve više zastupljene na globalnoj ekonomskoj skali. Tvrtke koje proizvode i prodaju proizvode koji u sebi implementiraju bionička rješenja problema, u velikom broju slučajeva su udvostručile svoje prihode svake godine u počecima bioničke revolucije. Procjena utjecaja biomimikrije na određene grane industrije do 2025. godine, prikazan je na slici 14.



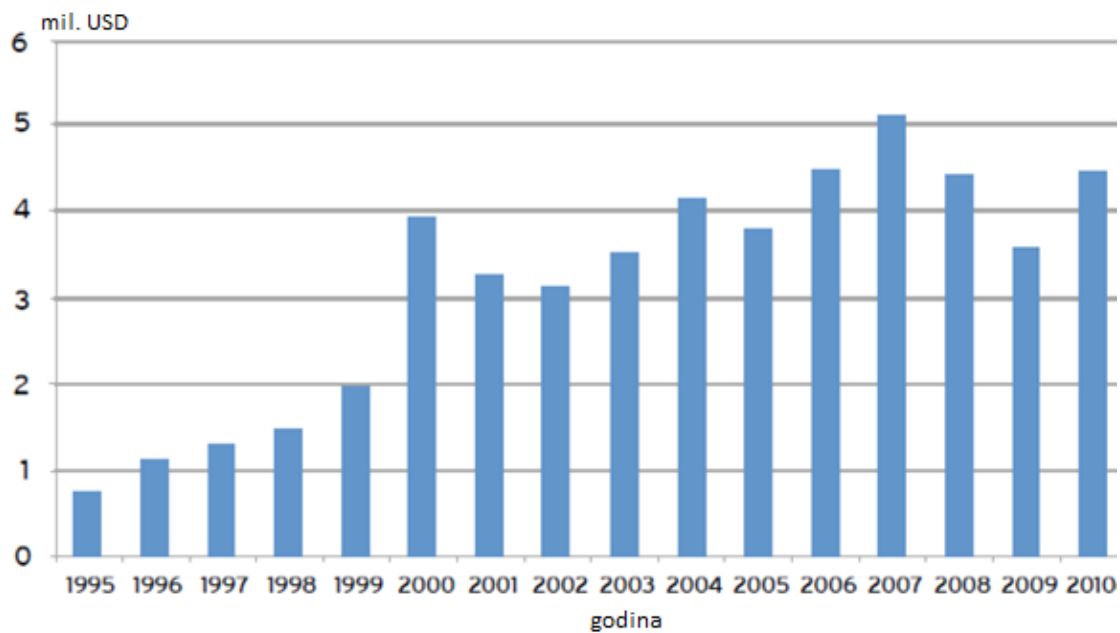
Slika 14 Procjena utjecaja bionike i biomimikrije na globalno tržište 2025. godine. Preuzeto iz: Ivanić i sur., 2015.

Zbog velikog potencijala biomimikrije, 2000. godine uvodi se termin Da Vinci Indeks, koji mjeri aktivnost u znanostima vezanima uz područja bionike i biomimikrije, a izvodi se na temelju četiri izvora podataka: broja publiciranih znanstvenih članka, broja patenata, broja odobrenih sredstava za znanstvena istraživanja te vrijednosti odobrenih sredstava za znanstvena istraživanja (Slika 15).

S obzirom na to da globalna legislativa teži ka što više ekološki osvještenom načinu upravljanja proizvodnjom i smanjivanju zagađenja, evidentno je da će se inspiracija i dalje tražiti u prirodi za rješenja problema, što je vidljivo i u porastu ulaganja u područje biotehnologije (Slika 16) (Ivanić i sur., 2015).



Slika 15 Na slici je prikazan rast Da Vinci indeksa u proteklom desetljeću(a) i rast odobrenih patenata u SAD-u iz područja bionike i biomimikrije(b). Preuzeto iz: Ivanić i sur., 2015.



Slika 16 Grafički prikaz rasta ulaganja u biotehnologiju u SAD-u u razdoblju 1995-2010. Preuzeto iz: Ivanić i sur., 2015

6. ZAKLJUČAK

Invertebrata (beskralježnjaci) zbog dugotrajnog boravka na Zemlji, tijekom svojeg evolucijskog razvoja bili su izloženi mnogim promjenama okolišnih uvjeta koji su tražili razne načine prilagodbe. Takvi uvjeti su rezultirali raznim tjelesnim oblicima i materijalima koji se danas mogu uz relativno malo ulaganja analizirati i replicirati. Invertebrata imaju velik broj vrsta s različitim strukturama biomaterijala, nastambi i načina ponašanja koji mogu poslužiti kao modelni organizmi za daljnja bionička rješenja. U ovom radu prikazana su recentna postignuća iz područja biomaterijala, arhitekture i robotike, u kojima su invertebrata poslužili kao modelni organizmi za izradu novih rješenja koristeći njihove prirodno postojeće strukture. Inspiracija za izradu umjetnih materijala bile su prirodno postojeće organizacije materijala, nastambe kukaca za arhitektonska rješenja te načini ponašanja za rješenja iz područja robotike. Velika ulaganja u područje biotehnologije i znanosti vezane uz bioniku i biomikriju te globalni pomak prema zelenoj ekonomiji, vrlo vjerojatno će omogućiti još brži i lakši razvoj proizvoda inspiriranih prirodom.

7. LITERATURA

Bernkop-Schnürch, A. i Dünnhaupt, S. (2012): “Chitosan-based drug delivery systems,” *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 81(3), pp. 463–469. doi: 10.1016/j.ejpb.2012.04.007.

Boots, A. W., Haenen, G. R. M. M. i Bast, A. (2008): “Health effects of quercetin: From antioxidant to nutraceutical,” *European Journal of Pharmacology*, 585(2–3), pp. 325–337. doi: 10.1016/j.ejphar.2008.03.008.

Brusca, R. C. (2017): “Invertebrates”. 3rd ed. New York, NY: Oxford University Press

Chen, Y.-M., Pekdemir, S., Bilican, I., Koc-Bilican, B., Cakmak, B., Ali, A., Zang, L.-S., Onses, M. S. i Kaya, M. (2021): “Production of natural chitin film from pupal shell of moth: Fabrication of plasmonic surfaces for SERS-based sensing applications,” *Carbohydrate Polymers*, 262, p. 117909. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.117909.

Cohen, Y. H., i Reich, Y. (2016): “Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability”. S.l. : Springer

Dickinson, M. H., Farley C. T., Full, R. J., Koehl, M. A. R., Kram, R. i Lehman, S. (2000): “How Animals Move: An Integrative View,” *Science*, 288(5463), pp. 100–106. doi: 10.1126/science.288.5463.100.

Grunenfelder, L. K., Suksangpanya, N., Salinas, C., Milliron, G., Yaraghi, N., Herrera, S., Evans-Lutterodt, K., Nutt, S. R., Zavattieri, P. i Kisailus, D. (2014): “Bio-inspired impact-resistant composites,” *Acta Biomaterialia*, 10(9), pp. 3997–4008. doi: 10.1016/j.actbio.2014.03.022..

Habdija, I., Primc Habdija, B., Radanović, I., Špoljar, M., Matoničkin Kepčija, R., Vujčić Karlo, S., Miliša, M., Ostojić, A. i Sertić Perić, M. (2011): “Protista-Protozoa i Metazoa-Invertebrata : Strukture i funkcije”. Zagreb. Alfa d.d..

İlk, S., Ramanauskaitė, A., Koç Bilican, B., Mulerčikas, P., Çam, D., Onses, M. S., Torun, I., Kazlauskaitė, S., Baublys, V., Aydın, Ö., Zang, L.-S. i Kaya, M. (2020): “Usage of natural chitosan membrane obtained from insect corneal lenses as a drug carrier and its potential for point of care tests,” *Materials Science and Engineering: C*, 112, p. 110897. doi: 10.1016/j.msec.2020.110897.

Ivanić, K., Tadić, Z. i Omazić, M.A. (2015): “BIOMIMICRY – AN OVERVIEW”, *The holistic approach to environment*, 5(1), p. 19-36

Kahraman, M., Mullen, E. R., Korkmaz, A. i Wachsmann-Hogiu, S. (2017): “Fundamentals and applications of SERS-based bioanalytical sensing,” *Nanophotonics*, 6(5), pp. 831–852. doi: 10.1515/nanoph-2016-0174.

Meyers, M. A., Chen, P.-Y., Lin, A. Y.-M. i Seki, Y. (2008): “Biological materials: Structure and mechanical properties,” *Progress in Materials Science*, 53(1), pp. 1–206. doi: 10.1016/j.pmatsci.2007.05.002.

Nir, S., Ruchaevski, I., Shraga, S., Shteinberg, T. i Ben Moshe, B. (2012): “A jellyfish-like robot for mimicking jet propulsion,” in *2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. 2012 IEEE 27th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI 2012)*, IEEE. doi: 10.1109/eeei.2012.6377056.

Patek, S. N. i Caldwell, R. L. (2005): “Extreme impact and cavitation forces of a biological hammer: strike forces of the peacock mantis shrimp *Odontodactylus scyllarus*,” *Journal of Experimental Biology*, 208(19), pp. 3655–3664. doi: 10.1242/jeb.01831.

Pawlyn, M. (2016): “Biomimicry in Architecture.” 2nd ed. London, England: RIBA Publishing., p. 100-102

Ratner, B. D. i Bryant, S. J. (2004): “Biomaterials: Where We Have Been and Where We Are Going,” *Annual Review of Biomedical Engineering*, 6(1), pp. 41–75. doi: 10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140027.

Şahin, E. (2005): “Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application,” in *Swarm Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 10–20. doi: 10.1007/978-3-540-30552-1_2.

Vilcinskas, A. (ed.) (2011) “*Insect Biotechnology.*” Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-90-481-9641-8.

Weaver, J. C., Milliron, G. W., Miserez, A., Evans-Lutterodt, K., Herrera, S., Gallana, I., Mershon, W. J., Swanson, B., Zavattieri, P., DiMasi, E. i Kisailus, D. (2012): “The Stomatopod Dactyl Club: A Formidable Damage-Tolerant Biological Hammer,” *Science*, 336(6086), pp. 1275–1280. doi: 10.1126/science.1218764.

Turner, S. (2008): “Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building.” *Proceedings of 1st International Conference on Industrialized, Intelligent Construction*.

Zargar, V., Asghari, M. i Dashti, A. (2015): “A review on chitin and chitosan polymers: structure, chemistry, solubility, derivatives, and applications.” *ChemBioEng Reviews*, 2(3),p. 204-226

8. SAŽETAK

Više od 90% opisanih vrsta u carstvu Animalia pripada invertebratima (beskralježnjacima). Dugotrajni evolucijski razvoj doveo je do raznolike morfologije tijela i uporabe biomaterijala kao odgovor na promjene raznih okolišnih uvjeta kojima su bili izloženi. Velik broj vrsta i kozmopolitska rasprostranjenost invertebrata potencijalno omogućuje znanstvenicima dobar izvor za daljnje inovacije iz područja bionike i biomimikrije. U ovom radu prikazana su recentna postignuća iz područja biomaterijala, arhitekture i robotike, u kojima su invertebrata poslužili kao modelni organizmi za izradu novih rješenja koristeći njihove prirodno postojeće strukture. Za izradu umjetnih materijala koriste se prirodno postojeće organizacije materijala, njihove nastambe i načini ponašanja za rješenja iz područja arhitekture i robotike. Velika ulaganja u područje biotehnologije i znanosti vezane uz bioniku i biomimikriju te globalni pomak prema zelenoj ekonomiji, vrlo vjerojatno će omogućiti još brži i lakši razvoj proizvoda inspiriranih prirodom.

Ključne riječi: biomimikrija, hitin/kvercetin, kukci-meduze-robotika, termiti-arhitektura

9. SUMMARY

More than 90% of species that have been described in the kingdom of Animalia belong to the invertebrates. Long evolutionary development has led to a diverse body morphology and function of biomaterials as result of adaptive response to the environmental conditions. A great number of invertebrate species and their cosmopolitan distribution, offer a great potential for innovative design solutions in the field of bionics and biomimicry. In this paper, an overview is given of recent works in the field of biomaterials, architecture and robotics, in which invertebrates served as model organisms for creating new solutions using their naturally existing structures, inspiration for making artificial materials using naturally existing material organizations, using enclosures in architecture and their behaviors for robotics solutions. Investments in the fields of bionics and biomimicry have been increasing due to the global shift towards green economy, which will probably lead to a faster and easier development of nature inspired products.

Key words: biomimicry, chitin/quercetin, insects-jellyfish-robotics, termites-architecture