

Fleksibilni materijali i njihova primjena u naprednoj tehnologiji

Znanstveni članak:

*Wearable and Stretchable Strain Sensors:
Materials, Sensing Mechanisms, and Applications*

H. Souri, H. Banerjee, A. Jusufi, N. Radacsi, A. A. Stokes, I. Park, M. Sitti, M. Amjadi, *Adv. Intell. Syst.* **2** (2020) 2000039–2000065

Kemijski seminar I

Student: Ozana Mišura

Smjer: Anorganska i strukturna kemija

Poslijediplomski sveučilišni (doktorski) studij Kemija

Akadska godina 2020./2021.

Datum izlaganja: 12. svibnja 2021.

SADRŽAJ

§ 1.	UVOD	1
§ 2.	SENZORI MEHANIČKIH PROMJENA	2
2.1.	KATEGORIZACIJA RASTEZLJIVIH SENZORA MEHANIČKIH PROMJENA	2
2.1.1.	<i>Rezistivni senzori</i>	2
2.1.2.	<i>Kapacitivni senzori.....</i>	3
2.1.3.	<i>Optički senzori</i>	4
2.1.4.	<i>Piezoelektrični i triboelektrični senzori</i>	4
2.2.	FLEKSIBILNI MATERIJALI U SENZORIMA MEHANIČKIH PROMJENA	5
2.2.1.	<i>Materijali od prirodnih vlakana i pripadni proizvodni postupci</i>	6
2.2.1.	<i>Sintetički materijali i odgovarajući proizvodni procesi</i>	8
2.3.	MEHANIZMI RADA SENZORA	10
2.4.	PARAMETRI DIZAJNA I FUNKCIONALNOSTI SENZORA	11
§ 3.	PRIMJENA FLEKSIBILNIH SENZORA U NAPREDNIM TEHNOLOGIJAMA.....	13
3.1.	ZDRAVSTVENI SUSTAVI I BIOMEDICINA	13
3.2.	PRAĆENJE SPORTSKIH PERFORMANSI	14
3.3.	DIGITALNE IGRE I VIRTUALNA STVARNOST	15
3.4.	MEKA ROBOTIKA I NEUROMEKANIKA.....	16
§ 4.	ZAKLJUČAK	17
§ 5.	LITERATURNI IZVORI.....	XVIII

§ 1. UVOD

Izrazito brz razvitak naprednih tehnologija potaknuo je pomicanje fokusa s krutih i lomljivih na rastezljive i deformabilne materijale, koji su od ključne važnosti za veliku skupinu uređaja na kojima se temelji korištenje naprednih tehnologija – senzore. Naime, u primjeni senzora je velika pozornost usmjerena na korištenje fleksibilnih materijala jer upravo mogućnost deformacije materijala bez pucanja omogućuje primjenu takvih senzora na različitim nepravilnim površinama kao što je primjerice ljudska koža. Ugađanjem fleksibilne komponente senzora mogu se mijenjati parametri senzora kao što su rastezljivost, osjetljivost, vrijeme odziva i slično, što također doprinosi sve većoj primjeni takvih materijala u različitim pametnim materijalima, mekoj robotici, zdravstvu, istraživanju biomehanike i mnogim drugim granama tehnologije i ljudskog djelovanja.¹

U fokusu ovog rada su senzori koji osim aktivnog senzorskog dijela sadrže i supstrat tj. podlogu na koju se nanosi aktivni senzorski dio, a koja dodatno pridonosi ključnim karakteristikama senzora: fleksibilnosti i otpornosti. Za razvoj takvih senzora i njihovu jednostavnu, jeftinu i proizvodnju ključno je poznavanje fleksibilnih materijala i njihovih svojstava kao što su način na koji se materijal deformira, interakcija s okolinom tijekom deformacije i slično.

§ 2. SENZORI MEHANIČKIH PROMJENA

Mehanički senzori su vrsta senzora koji prevode vanjski mehanički podražaj u električni signal. Istraživanje senzora koji očitavaju mehaničke promjene trenutno je od velikog interesa u razvoju takozvanih nosivih senzora jer svojstvo fleksibilnosti omogućava primjenu senzora na različitim površinama na koje se mogu nataknuti ili pričvrstiti.

Mehanički senzori uglavnom se sastoje od dva dijela: aktivnog dijela koji je odgovoran za očitavanje tj. sensoriku te potpornog dijela koji osigurava očuvanost senzora u različitim uvjetima te jednostavnu interakciju senzora s okolinom.^{3,4} Za senzore koji se najčešće koriste na zakrivljenim i neravnim površinama kao što je primjerice ljudska koža, važno je da potporni dio senzora bude fleksibilan. Shodno tome, u proizvodnji i sklapanju mehaničkih senzora, ključnu ulogu imaju fleksibilni materijali.

2.1. Kategorizacija rastezljivih senzora mehaničkih promjena

Do danas je razvijen značajan broj rastezljivih senzora mehaničkih promjena koji se mogu nositi, a razlikuju se prema sastavu materijala, proizvodnim postupcima te mehanizmima na kojima se temelji senzorsko očitavanje. Od svih vrsta senzora koji su rastezljivi tj. mogu detektirati vanjske mehaničke promjene, najistraženiji su rezistivni, kapacitivni i optički senzori te će se oni istaknuti u ovom pregledu. Uz prethodno navedene senzore, u značajnom opsegu također su istraženi piezoelektrični i triboelektrični senzori, međutim detaljan opis takvih senzora izostavljen je ovim pregledom jer nije u potpunosti razjašnjena mogućnost njihove primjene kao nosivih senzora.

2.1.1. Rezistivni senzori

Senzori otpora ili rezistivni senzori temelje se na mjerenju promjene električnog otpora za ciklus koji obuhvaća mehaničku promjenu senzora tijekom koje se senzor rastezne ili stisne i povratak senzora u prvobitan položaj (slika 1).

Za aktivne materijale rezistivnih senzora važno je da imaju svojstvo električne vodljivosti, a uglavnom su to tanki filmovi, kompozitni polimeri mikromaterijala i nanomaterijala te vodljive tkanine. Tijekom primjene vanjskog mehaničkog pritiska, mijenja se električni otpor

vodljivog materijala od kojeg je senzor načinjen, a uklanjanjem vanjskog izvora sile, električni otpor vraća se na prvotne vrijednosti što čini proces reverzibilnim te omogućuje bilježenje promjena električnog otpora deformiranog senzora. Promjena električnog otpora u rezistivnim sensorima uslijed mehaničkog naprežanja posljedica je nekoliko različitih doprinosa: geometrijskih promjena, intrinzične otpornosti aktivnog materijala, efekta tuneliranja i diskonekcijskog mehanizma.^{2,3,5}



Slika 1. Primjer istezanja rezistivnog senzora uslijed primjene vanjske mehaničke sile te povratka u prvobitno stanje nakon uklanjanja vanjskog opterećenja.

2.1.2. Kapacitivni senzori

Karakteristična izvedba kapacitivnih senzora je „oblik sendviča“ pri čemu se između dvije elektrode smješta dielektrični sloj (slika 2). Budući da naboji akumulirani na elektrodama ne mogu prolaziti kroz središnji izolacijski sloj, izvedba kapacitivnog senzora odgovara kondenzatoru paralelnih ploča početnog kapaciteta C_0 , što se može izraziti sljedećom jednadžbom:

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r G$$

pri čemu je ϵ_0 permitivnost zraka, ϵ_r dielektrična konstanta dielektričnog materijala, a G funkcija geometrije kondenzatora.



Slika 2. Kapacitivni senzor u „obliku sendviča“.

Geometrija kondenzatora može se izraziti kao količnik površine preklopljenih elektroda, A_c i debljine dielektričnog sloja, d . Budući da je promjena kapaciteta ovisna o geometrijskim parametrima kondenzatora, promjenom geometrije elektroda tijekom rastezanja mijenja se i kapacitet kondenzatora.^{2,6} Shodno tome, važno je da su elektrode načinjene od rastezljivog materijala.

2.1.3. Optički senzori

Optički senzori često se proizvode u obliku valjkaste jezgre oko koje je obložen omotač (engl. *core-cladding structure*). Valjkastu jezgru izgrađuje rastezljivi vlaknasti materijal, a omotač sadrži svjetlosni odašiljač i fotodetektor (slika 3).



Slika 3. Optički senzor u tipičnom *core-cladding* obliku: valjkasta jezgra od rastezljivog materijala obložena omotačem koji sadrži svjetlosni odašiljač i fotodetektor.

Glavni senzorni mehanizam optičkih senzora temelji se na promjeni transmisije do koje dolazi kada se vlaknasti materijal deformira te se posljedično generira razlika svjetlosne snage između izvora svjetlosti i fotodetektora.⁷

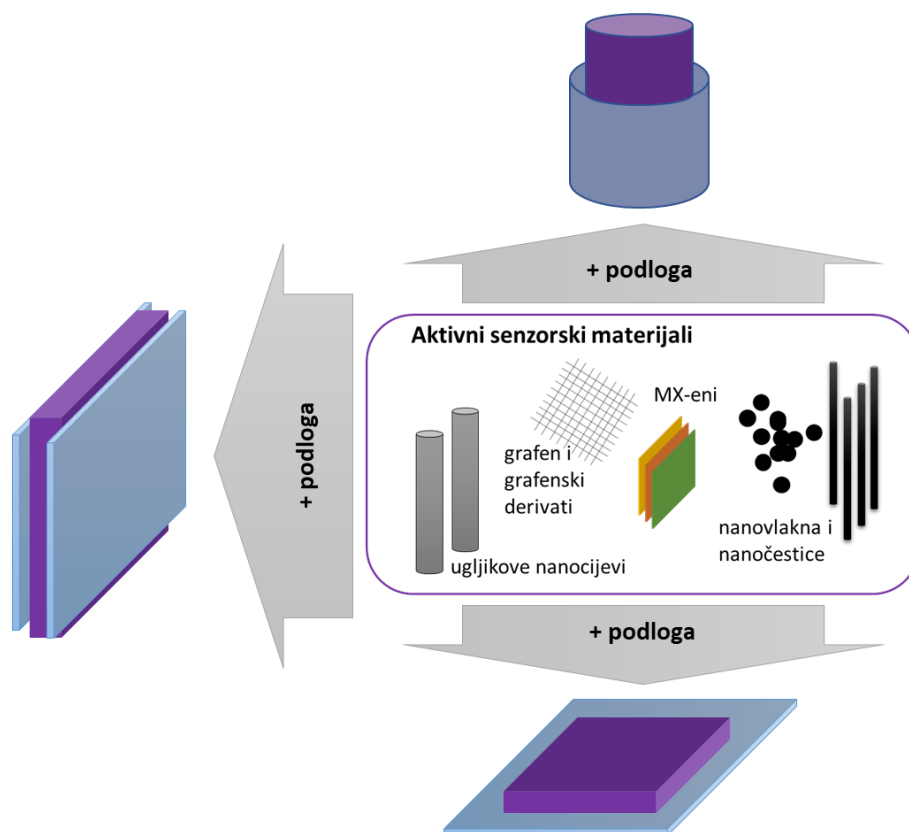
2.1.4. Piezoelektrični i triboelektrični senzori

Piezoelektrični i triboelektrični senzori također su razvijeni kao rastezljivi mehanički senzori. Mehanizam direktnog generiranja električnog napona uslijed vanjske mehaničke deformacije naziva se piezoelektričnost, a materijali koji pokazuju takav efekt nazivaju se piezoelektrični materijali.⁸ Za piezoelektrične senzore potrebni su aktivni materijali s visokim piezoelektričnim koeficijentom da bi mogli očitati mehaničke deformacije s visokom osjetljivošću i brzim vremenom odziva. Triboelektričnost obuhvaća dvije pojave koje uzrokuju pojavu električnog napona: triboelektrični efekt i elektrostatska indukcija, a uslijed inicijalnih vanjskih deformacija materijala.

Primjena piezoelektričnih i triboelektričnih senzora kao nosivih uređaja za očitavanje nije u potpunosti razjašnjena zbog njihovih karakteristika kao što su rad pod visokim frekvencijama i nemogućnost očitavanja statičke deformacije.

2.2. Fleksibilni materijali u sensorima mehaničkih promjena

Dizajniranje senzora mehaničkih pokreta koji se tijekom očitavanja vanjskih promjena mogu deformirati obuhvaća odabir aktivnog senzorskog materijala te odabir supstrata odnosno potpornog materijala.



Slika 4. Prikaz nekoliko vrsta aktivnog senzorskog materijala koji se na različite načine sklapaju s podlogom u jedinstveni senzor.

Odabir aktivnog senzorskog materijala jedan je od ključnih koraka u dizajnu rastezljivih mehaničkih senzora. Važno je da je senzorski materijal vodljiv što najčešće uključuje ugljikove nanomaterijale (ugljkovo crnilo; CB, ugljikove nanocijevi; CNT, grafen i njegove derivate), nanovlakna i nanočestice, metalne nanožice, ionske tekućine, hibridne mikro i nanostrukture, vodljive polimere te MX-ene (npr. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$).⁹⁻¹³

Aktivni senzorski materijali uglavnom se ne koriste samostalno već se ugrađuju u različite potporne podloge. Podloga je važan dio jer može, a najčešće i mora imati pojedina svojstva koja su potrebna, a nisu prisutna ili ostvariva u aktivnom senzorskom materijalu cjelokupnog senzora. Takva svojstva uvjetovana su primjenom samog senzora tj. načinom njegovog korištenja. Tako je za senzore koji se mogu na različite načine nositi na tijelu (npr. rukavice)

ili fizički pričvrstiti na određeni dio tijela (npr. trake), tzv. nosive senzore, važno da budu fleksibilni odnosno da se mogu prilagoditi neravnoj i deformiranoj površini kao što je ljudska koža tj. da budu mehanički popustljivi. Osim mehaničkih svojstava, za nosive senzore važno je da budu kemijski otporni te neosjetljivi na atmosferske uvjete kao što su promjena temperature i vlažnost zraka. Interakcije između aktivnog senzorskog i potpornog fleksibilnog materijala važne su te mogu značajno utjecati na samu izvedbu i svojstva senzora. Kao potporne podloge koriste se materijali od prirodnih vlakana (npr. pamuk, vuna, svila i lan) te sintetički materijali (npr. silikonski elastomeri, termoplastični polimeri, gume i slično).¹

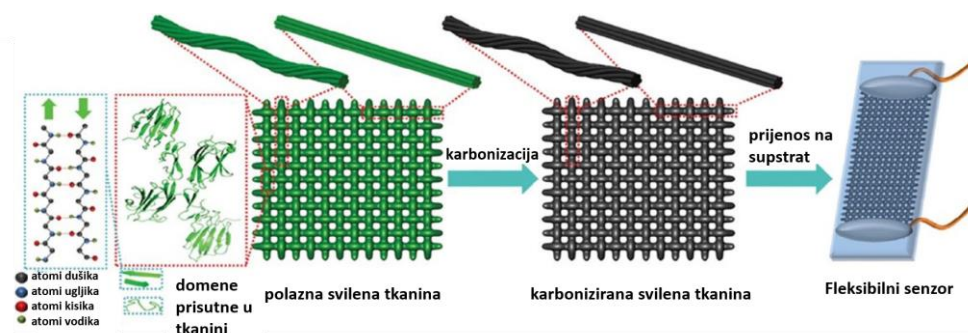
Odabrani aktivni senzorski materijal i supstratni materijal određenim se proizvodnim tehnikama sklapaju u jedinstveni rastezljivi senzor mehaničkih promjena (slika 4). Jednostavni, pouzdani i jeftini proizvodni postupci važni su u proizvodnji nosivih senzora mehaničkih promjena na velikoj skali. Korištene tehnike u proizvodnji rastezljivih senzora ovise o vrsti senzorskog materijala kao i potpornog materijala, a općenito se mogu podijeliti u dvije glavne skupine: proizvodne postupke senzora na bazi prirodnih materijala i proizvodne postupke na bazi polimera.

2.2.1. Materijali od prirodnih vlakana i pripadni proizvodni postupci

Od prirodnih materijala najčešće se koriste pamuk, svila, vuna i lan. Prirodni materijali moraju se aktivirati da bi imali svojstvo električne vodljivosti što se najčešće radi tehnikama kao što su karbonizacija, premazivanje tkanine uranjanjem i presvlačenjem (engl. *dip-coating*, *bar-coating*), ultrazvučni procesi i vakuumska infiltracija.¹⁴⁻¹⁷ Do danas su razvijeni mnogi proizvodni postupci dobivanja električki vodljive tkanine korištenjem prirodnog materijala od kojih su neki pogodni i za masovnu proizvodnju.¹⁷ Proizvedeni aktivirani prirodni materijali kombiniraju se s različitim fleksibilnim podlogama.

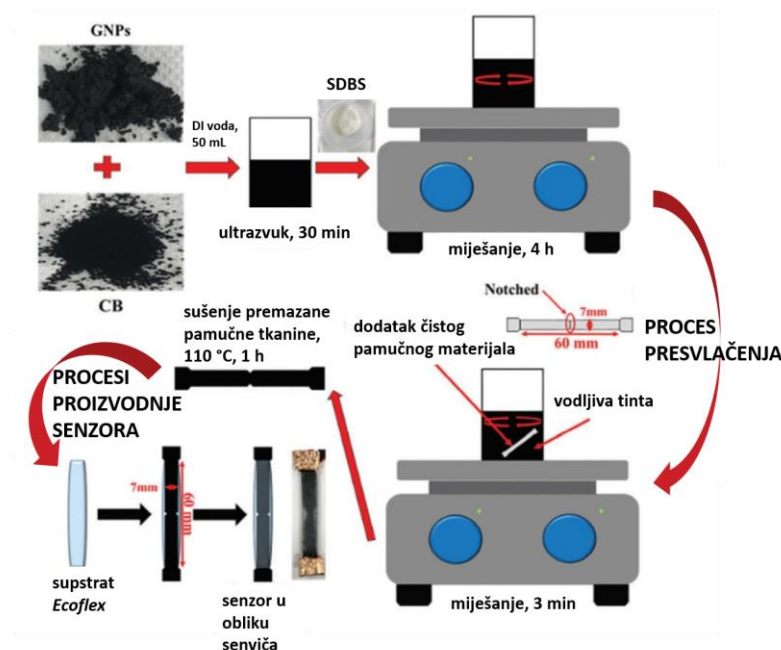
Karbonizacija je postupak koji obuhvaća zagrijavanje u vakuumskoj pećnici u prisutstvu inertnog plina, a bez prisutstva kisika, pri čemu se tvari na bazi ugljika razlažu na elementarni ugljik i kemijske spojeve. (slika 5).^{14,15} Karbonizacijom se prirodni materijali, kao na primjer pamučna¹⁴ i svilena¹⁵ tkanina mogu prevesti u električki vodljive materijale. Tako aktivirani materijali nanose se na elastomerne podloge čime se dobiva rastezljivi senzor mehaničkih promjena. Iako je karbonizacijska metoda dobro utvrđena, ima više nedostataka koji ograničavaju njezinu primjenu, a to su: skupi dijelovi opreme (vakuumске peći), vremenski

zahtjevan proces za koji je karakteristična visoka potrošnja energije i ograničene mogućnost proizvodnje na velikoj skali.¹⁷



Slika 5. Proces karbonizacije svilene tkanine u proizvodnji rastezljivih mehaničkih senzora na bazi prirodnih materijala. Prilagođeno prema izvoru.¹⁵

Uranjanje tkanine u vodljivu tintu (*dip-coating*) najčešće je korištena tehnika u aktivaciji materijala premazivanjem. Na takav su način aktivirane pamučne i lanene tkanine koje su uronjene u prethodno pripravljenu vodljivu otopinu hibridne tinte priređenu otapanjem grafenskih nanopločica (engl. *graphene nanoplatelets*, GNPs) i čestica ugljikovog crnila (engl. *carbon blacks*, CBs) u vodi. Tako aktiviran materijal ugrađen je elastomer *Ecoflex* čime je dobiven fleksibilni senzor u „obliku sendviča“. (slika 6).¹⁶

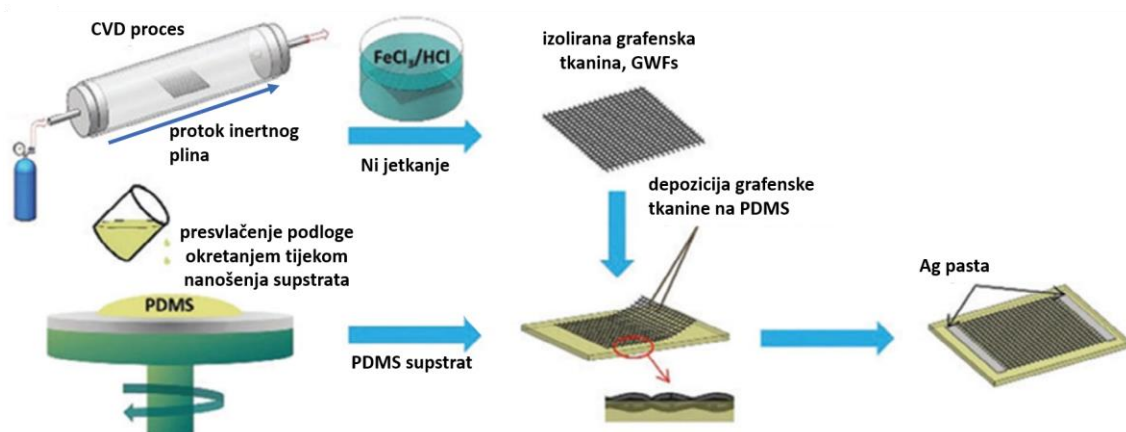


Slika 6. Postupak presvlačenja pamučnog materijala s hibridnom tintom GNPs-/CBs u proizvodnji rastezljivih mehaničkih senzora na bazi prirodnih materijala. Prilagođeno prema izvoru.¹⁶

Nekoliko rastezljivih polimera proizvedeno je i korištenjem ultrazvučnih tehnika: laneno predivo s hibridnim materijalima od grafenskih nanoploča i ugljikovih čestica (GNPs–CBs) proizvedeno korištenjem ultrazvučne kupke te vodljivi pamučni i vuneni materijali razvijeni korištenjem ultrazvučnog presvlačenja tkanine.¹⁷

2.2.1. Sintetički materijali i odgovarajući proizvodni procesi

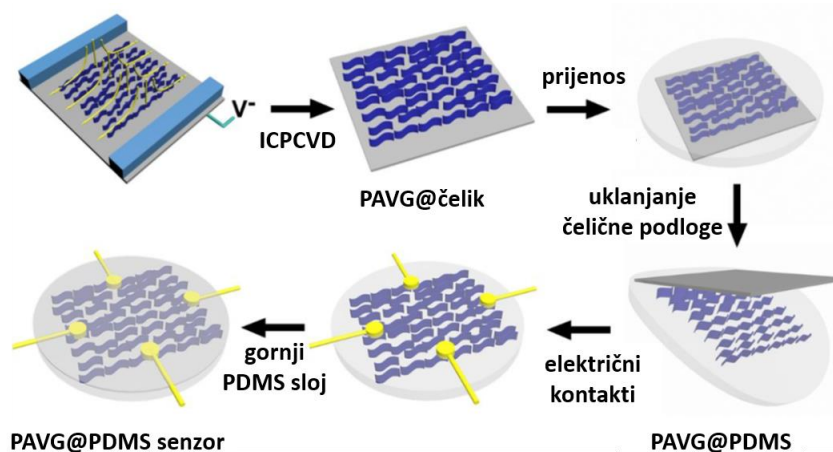
Od umjetno proizvedenih materijala, za fleksibilne podloge mehaničkih senzora općenito se koriste silikonski elastomeri, termoplastično polimeri, različite gume i adhezivni filmovi. Dva najčešće korištena silikonska elastomera su *Ecoflex* i polidimetilsiloksan (PDMS). Do danas je za proizvodnju polimernih predloženo više različitih tehnika proizvodnje od kojih su neke: kemijska sinteza, *electrospinning*, *coating and sputtering*, *printing*, *transfer patterning*, *liquid-phase blending*, *filtration and laser micromachining*.



Slika 7. Postupci pripreve grafenske tkanine (GWF) i PDMS supstrata u proizvodnji rastezljivog mehaničkog senzora na bazi polimera. Prilagođeno prema izvoru.¹⁸

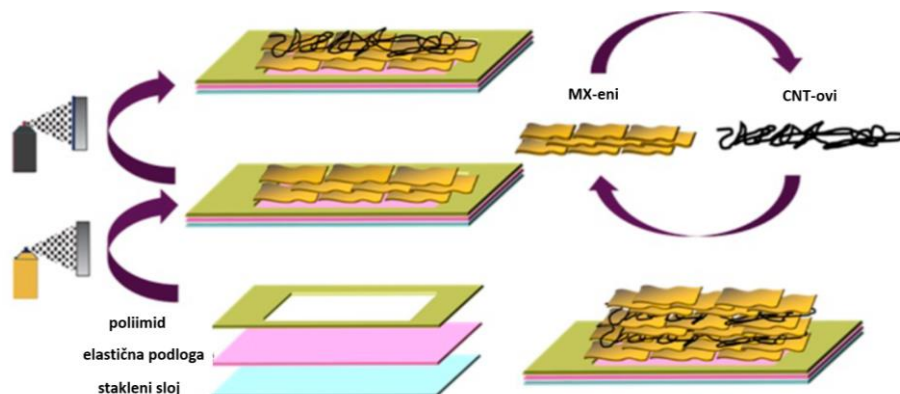
Literaturno je poznat primjer sklapanja senzora na bazi grafenske tkanine i PDMS supstrata (slika 7).¹⁸ Grafenska tkanina sintetizira se kemijskom depozicijom para uz korištenje metalnog templata koji je prethodno priređen, izrezan u pločice i postavljen unutar cijevi. Provođenjem metana kroz cijev dok se cijev zagrijava i hladi, događa se precipitacija ugljikovih čestica na templatu. Nakon toga se dobiveni materijal jetka uranjanjem u kiselinu, a potom se izoliraju grafenske tkanine. Izolirana grafenska tkanina u biti je isprepletana mreža grafenskih cijevi, a orijentacija tih cjevčica utječe na otpor i osjetljivost, pa se ti parametri mogu ugađati CVD sintezama pod drugim uvjetima. Budući da je grafen stabilna vodljiva mreža – senzori su jako osjetljivi te mogu prevoditi male meh. deform. u zamjetan električni

signal. Supstrat je priređen metodom oblaganja tijekom okretanja površine na koju se nanosi supstrat (engl. *spin-coating*). Nakon nanosa grafenske tkanine na podlogu, nanose se još i vodljive paste od srebra koji služe za ostvarivanje električnog kontakt. (Cu žice).



Slika 8. Priprava senzora na bazi paralelno poslaganih vertikalnih grafenskih ploča (PAVG) korištenjem ICPCVD procesa u proizvodnji rastezljivog mehaničkog senzora na bazi polimera. Prilagođeno prema izvoru.¹⁹

PDMS supstrat često je korišten, pa tako i u proizvodnji senzora s paralelno poslaganim vertikalnim grafenskim pločama (engl. *parallel aligned vertical graphen*, PAVG). PAVG ploče su sintetizirane induktivno spregnutom plazmom CVD (ICPCVD) odnosno induciranjem električnog polja (pomoću ovakvih metalnih konduktora) za rast grafena na čeličnoj podlozi. Nakon što se grafen prenese na fleksibilnu podlogu, uklanja se čelični dio, i to tako da se oguli, a grafen time zaostaje u matrici podloge. U takav grafen ubacuju se 4 električna kontakta od srebra i nakon toga se aktivni dio zatvara nanošenjem novog sloja podloge odnosno PDMS-a. Time se dobiva grafenski dio upakiran unutar supstrata (slika 8).¹⁹



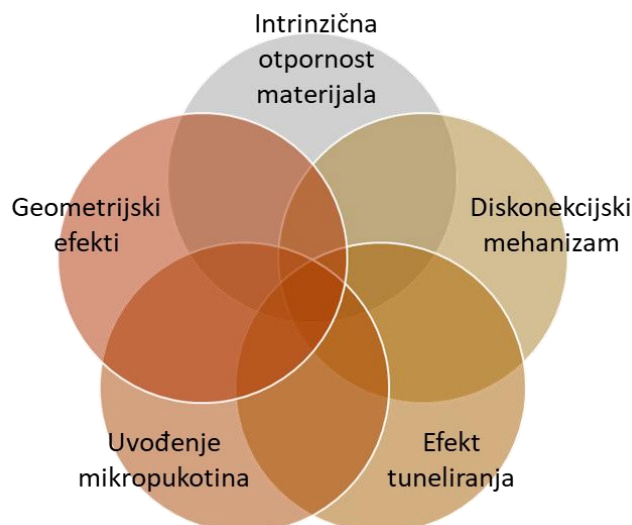
Slika 9. Proizvodnja metodom presvlačenja sprejanjem (engl. *spray coating*). Prilagođeno prema izvoru.²⁰

Između ostalih, jedna vrlo jednostavna tehnika proizvodnje rastezljivih senzora jest sprejanje slojeva; jednog preko drugog.²⁰ Tako se često dobivaju senzori na bazi višeslojnih kompozita (slika 9). Prvo se priredi elastični film koji se sastoji od 3 sloja: staklenog, gumenog i na kraju sloja poliiimidnih okvira. Na taj sloj se potom izmjenično nanose: sloj 2D kompozita, pa sloj ugljikovih nanocijevi. Ova tehnika lako se može primijeniti i za proizvodnju senzora na većim skalama.

2.3. Mehanizmi rada senzora

Glavni mehanizmi na temelju kojih funkcioniraju rezistivni, kapacitivni i optički senzori su: geometrijski efekti, intrinzična otpornost materijala, diskonekcijski mehanizam, efekt tuneliranja i kontrolirano uvođenje pukotina u vodljivi senzorski film. Ovisno o vrsti senzorskog materijala, proizvodnom procesu i interakciji aktivnog senzorskog elementa s potpornim materijalom, navedeni mehanizmi ugađaju elektromehanički odgovor rezistivnih, kapacitivnih i optičkih senzora.¹

Geometrijski efekt jest promjena praćenog svojstva senzora uslijed promjene geometrijskih parametara senzora tj. pri razvlačenju što je glavni senzorni mehanizam kapacitivnih i optičkih senzora. Intrinzična otpornost senzorskog materijala najčešće je korišten princip rada rastezljivih senzora mehaničkih pokreta, kako u starijim tako i u novije razvijenim sensorima otpora. Efekt se temelji na promjeni električnog otpora materijala kada se na njega primijene vanjske deformacije. Intrinzična otpornost senzorskog materijala temeljni je mehanizam senzora izrađenih od poluvodiča (npr. silicija, germanija). Slaba međusobna adhezija površine aktivnog senzorskog materijala i površine podloge rezultira značajnom mehaničkom neusklađenosti zbog čega je doprinos ovog mehanizma ukupnoj senzorskoj sposobnosti dosta malen.² Mehanički kontakt površina aktivnog senzorskog materijala i podloge važan je i u diskonekcijskom mehanizmu tj. mehanizmu prilikom kojeg zbog odvajanja primjerice mikromaterijala i nanomaterijala dolazi do smanjene ili izostavljene vodljivosti materijala. Ukoliko su materijali potpuno odvojeni, ali je prisutna vodljivost, doprinos se pripisuje efektu kvantnog tuneliranja. Iako u većini strukturnog dizajna nepoželjne, pukotine također doprinose ugađanju vodljivosti senzora. Tijekom rastezanja se zbog mehaničke neusklađenosti s potpornim materijalima krtime tankim filmovima nanosenima na gornju površinu mekih polimera od prirodnih vlakana pojavljuju i propagiraju pukotine.



Slika 10. Sinergističko djelovanje mehanizama rada senzora o čemu ovisi ukupna performansa senzora.

Važno je napomenuti da ukupna senzorska performansa proizlazi iz sinergističkog djelovanja više mehanizama (slika 10). Pri tome naravno svaki mehanizam pridonosi određenim postotkom, a koji će sve biti prisutni ovisi o vrsti senzorskog materijala, proizvodnom procesu i interakciji aktivnog senzorskog elementa s potpornim materijalom. Navedeni mehanizmi ugađaju elektromehanički odgovor (*rezistivnih, kapacitivnih i optičkih*) senzora te na različite načine doprinose parametrima izvedbe senzora.

2.4. Parametri dizajna i funkcionalnosti senzora

Parametri važni u dizajnu različitih vrsta rastezljivih mehaničkih senzora su: rastezljivost, osjetljivost, linearnost, odziv i vrijeme oporavka, prenaprezanje te dinamička izdržljivost senzora.

Maksimalna deformacija koju senzor može podnijeti, a da pritom zadrži svoj fizički integritet i stabilnost odgovora odnosi se na rastezljivost senzora. Rastezljivost senzora ovisi o više različitih faktora od kojih su najznačajniji: vrsta podloge, proizvodni postupak te omjer proporcija korištenih senzorskih dijelova (mikromaterijala i nanomaterijala).²

Mjernim faktorom GF (engl. *gauge factor*) kvantificira se osjetljivost senzora kao omjer relativne promjene izlaznog signala i primijenjene deformacije.^{2,5} Vrijednost faktora GF također ovisi o pojedinim faktorima kao što su senzorski dijelovi, mikrostruktura, senzorski mehanizam i proizvodni postupak.^{4,6}

Linearnost mehaničkih senzora kvantificira se koeficijentom determinacije, R^2 koji se dobiva linearnom regresijom. Rastezljivi mehanički senzori mogu imati linearan i nelinearan odgovor pri čemu velika vrijednost R^2 podrazumijeva linearan odgovor te zanemarivo odstup od pravca izlaznog signala, a mala vrijednost R^2 podrazumijeva nelinearan odgovor. Linearni odgovor rastezljivih mehaničkih senzora poželjniji je kada se promatra veliki raspon naprežanja jer nelinearnost uzrokuje kompleksniju kalibraciju i obradu podataka izlaznog signala.²

Vrijeme odziva je vrijeme potrebno da sensor dosegne stanje spremnosti odgovora. To vrijeme može biti i dulje od predviđenog tj. produljeno zbog izrazito elastičnog ponašanja elastomera koji su jedni od ključnih elemenata fleksibilnih senzora.² Vrijeme odziva može se odrediti eksperimentalno (direktnim mjerenjem) i teorijski (računom).^{6,11,16}

Prenaprežanje (engl. *overshooting*) je parametar često prisutan kod fleksibilnih senzora, a glavni uzrok tome je relaksacija stresa polimernih supstrata ili matrica nakupljenog tijekom primjene vanjske sile. Na naprežanje utječe unutarnja struktura polimera te njihovo pomicanje pod utjecajem vanjskog tereta (uobičajeno kod rezistivnih senzora koji pokazuju najviše prenaprežanje u odnosu na kapacitivne i optičke senzore), brzina naprežanja te velika elastičnost polimera.¹

Izdržljivost senzora odnosi se na stabilan odgovor i mehanički integritet senzora tijekom dugotrajnih cikličkih opterećenja što je od ključne važnosti upravo u nosivim sensorima.¹

Navedeni parametri važni su u procjeni funkcionalnosti pojedinog rastezljivog senzora te je puno pozornosti usmjereno na mogućnosti ugađanja tih parametara za pojedini senzor.

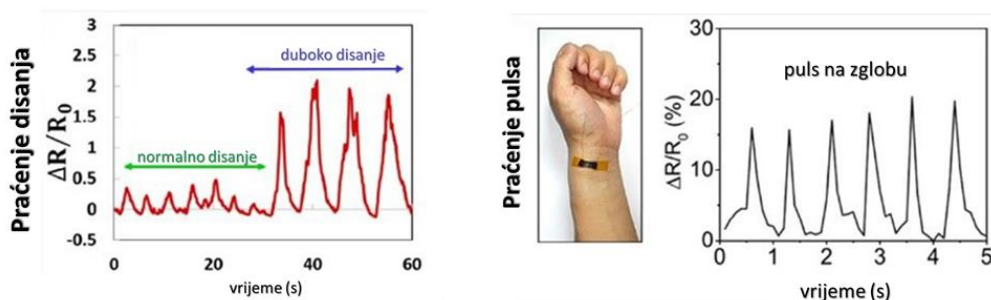
§ 3. PRIMJENA FLEKSIBILNIH SENZORA U NAPREDNIM TEHNOLOGIJAMA

Prethodno opisani rastezljivi senzori od ključne su važnosti u različitim naprednim tehnologijama koje obuhvaćaju ili opažanje različitih pokreta ljudskog tijela ili interakciju čovjeka i uređaja. Praćenje velikog broja različitih pokreta ljudskog tijela važno je na primjer u sportu, medicini i zdravstvu. Interakcija ljudskog, pa čak i životinjskog pokreta s različitim uređajima bitna je primjerice u proučavanju i razvitku robotike i neuromehanike te u tehnologiji zabave.

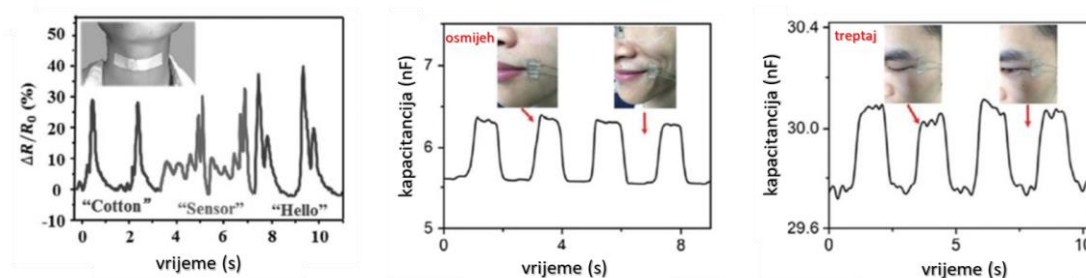
3.1. Zdravstveni sustavi i medicina

U zdravstvu je primjena fleksibilnih senzora važna iz dva glavna razloga. Prvo, oni omogućavaju kontinuiranu detekciju širokog raspona pokreta i gibanja tijela dakle praćenje tijekom duljeg vremenskog perioda bez prekida. Drugo, fleksibilni senzori omogućuju detekciju vrlo suptilnih deformacija koje uzrokuju fiziološki signali (npr. detekcija pulsa ili očitavanje brzine disanja). Za praćenje tako malih napreznja, potrebni su jako osjetljivi senzori kako bi se dobila visoka rezolucija i točna promjena signala prilikom odziva senzora tijekom malih deformacija.

Takvi senzori mogu pratiti na primjer brzinu pulsa kada se pričvrste na palčanu arteriju ručnog zgloba, trenutne promjene volumena i tlaka srca kada se pričvrste na međurebreno područje kod petog rebra, parametre cirkulacije kao što su primjerice otvaranje i zatvaranje atrioventrikularnog zaliska i slično, brzinu i dubinu disanja te mnoge druge važne fiziološke signale (slika 11).¹ Osim toga, mogu se koristiti i u fonetskom prepoznavanju kada se pričvrste na grlo osobe te u detekciji emocionalnog izražavanja kao što su osmijeh ili mrštenje kada se pričvrste blizu usta i kuta oka (slika 12).^{21,22}



Slika 11. Primjena fleksibilnih senzora u praćenju fizioloških promjena kao što su disanje (lijevo) i puls (desno). Prilagođeno prema izvoru.¹

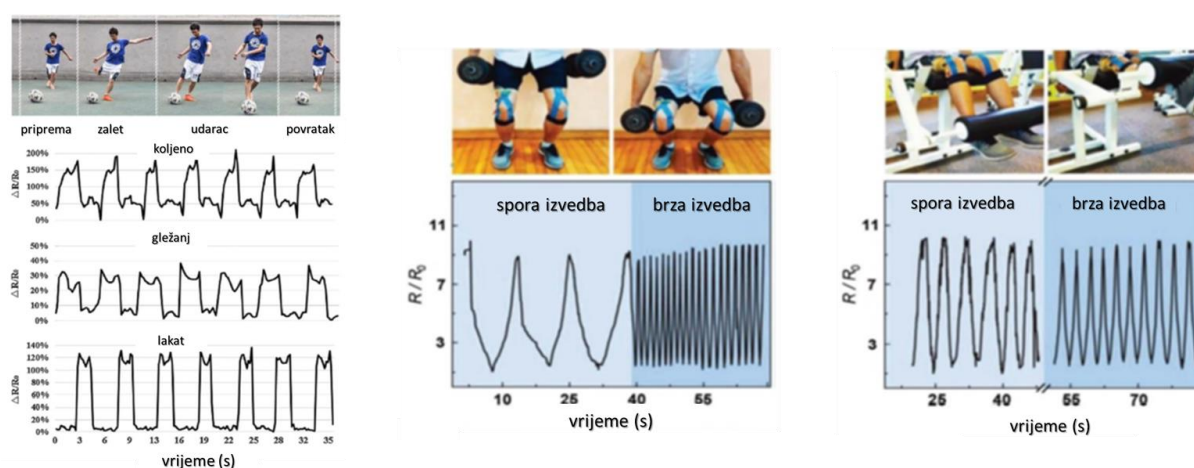


Slika 12. Primjena fleksibilnih senzora u fonetskom prepoznavanju (lijevo) i identifikaciji facijalnih i emocionalnih izraza (sredina, desno). Prilagođeno prema izvorima.^{21,22}

Kontinuirano praćenje kucanja srca, disanja i pulsa omogućuje korisne medicinske informacije za rane dijagnoze različitih bolesti kao što su astma, anemija, srčane mane i embolija. Osim toga, i praćenje fizičkih signala koji potječu od ljudskih emocija (smijanje, mrštenje i slično) korisno je u procjeni oboljenja kao što je npr. Alzheimerova bolest.²²

3.2. Praćenje sportskih performansi

Praćenje biofizičkih parametara u realnom vremenu (disanje, brzina otkucaja srca) omogućuje detaljne uvide u fiziološko zdravstveno stanje sportaša prije, tijekom i nakon fizičkih aktivnosti, primjerice izvođenja čučnjeva i slično. Također, nosivi senzori na različitim dijelovima tijela međusobno se mogu spregnuti što omogućuje detaljno praćenje sportskih aktivnosti te uzročno-posljedične pokrete sportaša (slika 13).^{2,23,24}



Slika 13. Primjena fleksibilnih senzora u praćenju sportskih performansi (lijevo) i vježbanju (sredina, desno). Prilagođeno prema izvorima.^{23,24}

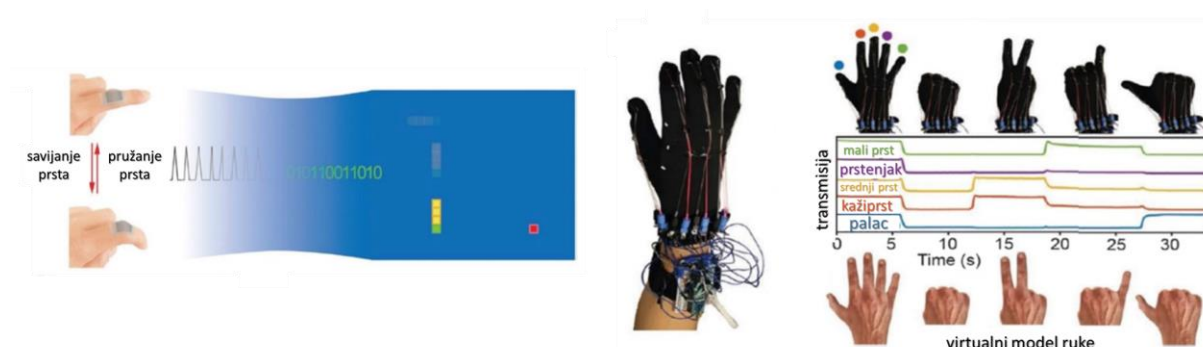
Ovakva primjena senzora poželjna je u praćenju, ali i poboljšanju kondicije sportaša. Osim toga, ovi rezultati pokazuju da se rastezljivi senzori mogu koristiti i u sportskoj rehabilitaciji te općenitom praćenju biofizičkog zdravlja pojedinca.²

3.3. Digitalne igre i virtualna stvarnost

Možda najatraktivnija primjena je u tehnologiji zabave i virtualnoj stvarnosti gdje se koriste intuitivne interakcije ljudskog tijela s virtualnim okruženjem ili se kontroliraju različiti uređaji (slika 14). U ovom području primjene, najkorišteniji su optički fleksibilni senzori, primjerice grafenski sensor pričvršćen za prste ruke koji prilikom savijanja i ravnjanja mijenjaju otpor senzora što se koristi kao komanda u igranju.²⁵ ili npr. integrirani sustav pametne rukavice kojom se kontrolira virtualni 3D model ruke u stvarnom vremenu (slika 15).²⁶



Slika 14. Primjena fleksibilnih senzora u tehnologiji zabave. Prilagođeno prema izvoru.¹

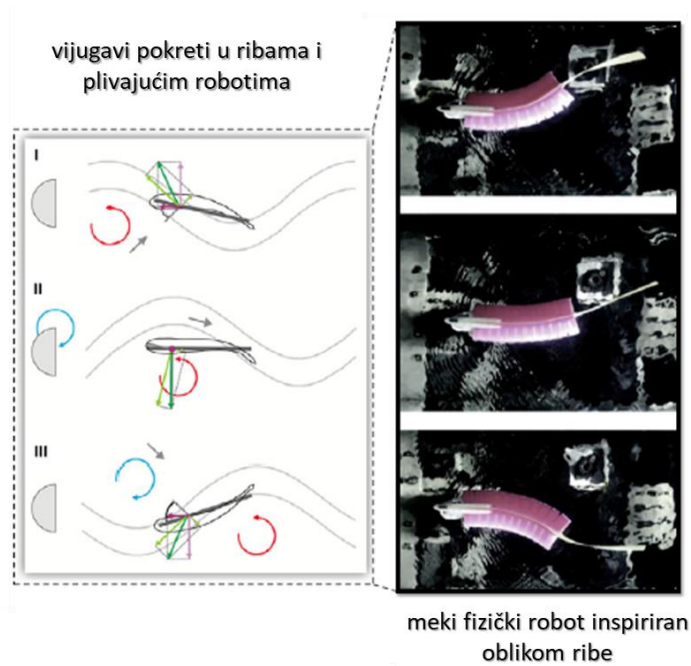


Slika 15. Primjena fleksibilnih senzora u tehnologiji zabave. Prilagođeno prema izvorima.^{25,26}

Na temelju razvitka senzora kojima se pokretima tijela upravlja uređajima omogućena je primjena nosivih senzora i u kućnoj rehabilitaciji te fizioterapiji.²

3.4. Meka robotika i neuromehanika

U robotici je značajan fokus usmjeren na meke robote koji mogu interagirati s okolinom koja nije pravilna i statična jer se roboti sve više predviđaju za zadatke koji podrazumijevaju kontakt s ljudima. Da bi interakcija ljudskog tijela i robota bila što sigurnija, potrebni su takvi roboti koji u najvećoj mjeri oponašaju pokrete mekih prirodnih organizama (slika 16). Shodno tome, važno je razumjeti neuromehaniku živih bića koja se intenzivno proučava na temelju direktnog praćenja živih organizama, ali i na temelju različitih robotskih uređaja koji su inspirirani živim bićima u prirodi. Neuromehanika se odnosi na više fizioloških sustava koji interagiraju da bi se stvorio pokret u živim bićima. Da bi se pokušala protumačiti neuromehanika pokreta, potrebno je skupiti neuronsku aktivnost, dinamiku muskulo-skeletnog sustava te interakciju tijela i vanjskog okruženja što nerijetko nije izvedivo u direktnom praćenju pokreta živih bića. Stoga je živi svijet najčešće inspiracija za strukturni i funkcionalni dizajn fleksibilnih senzora pomoću kojih se omogućuje uvid u dinamiku kretanja, korištenje različitih muskulaturnih sustava u pokretu, refleksne procese i još mnogo toga.¹



Slika 16. Primjena fleksibilnih senzora u proučavanju neuromehanike. Prilagođeno prema izvoru.²⁷

U nosivoj mekoj robotici vrlo su popularni optički fleksibilni senzori jer su uglavnom otporni na okolišne faktore kao što su promjena temperature ili vlaga zraka.^{7,26}

§ 4. ZAKLJUČAK

U kontekstu razvitka naprednih tehnologija, intenzivno se istražuju različite vrste fleksibilnih materijala zbog njihove primjene u fleksibilnim sensorima koji idu u korak s dinamičnim napretkom meke robotike, biomedicinskih i zdravstvenih pomagala, virtualne stvarnosti i mnogih drugih grana napredne tehnologije. U fleksibilnim sensorima važna je fleksibilna komponenta od koje može biti priređen aktivni senzorski materijal ili supstrat tj. podloga koja je važna jer najčešće doprinosi sa svojstvima koje sam aktivni senzorski materijal nema ili na neki način poboljšava svojstva tog materijala.

Iako je ovim pregledom prikazan velik tehnološki napredak fleksibilnih senzora, još uvijek je otvoreno puno mjesta za napredak, pa shodno tome postoji i mnoštvo aktualnih pitanja koja još uvijek nisu djelomično ili u potpunosti odgovorena. Primjerice, napredak u proizvodnim postupcima sklapanja senzora korištenjem strukturnog inženjerstva i ciljanim ugađanjem istraženih mehanizama rada sklopljenih senzora, kojim bi se dobili senzori jednostavniji za korištenje te s optimalnim parametrima rastezljivosti, osjetljivosti, izdržljivosti i slično.

Iscrpna istraživanja i prikupljeni podaci od značajne su važnosti u razumijevanju utjecaja fleksibilnih senzora na budućnost zdravstva gdje se otvara mogućnost korištenja pametnih kirurških instrumenata, na ekonomski i socijalni doprinos na koji bi utjecala mogućnost kućnih treninga i rehabilitacije te pristupačnost fleksibilnih senzora. Osim implementacije u postojeće grane primjene, otvoreno je i pitanje razvoja novih disciplina, primjerice veterinarske senzorske njege koja bi otvorila potpuno novi pristup veterinarskog liječenja.

Budući da fleksibilni senzori već sada imaju značajnu ulogu u kontekstu mnogih disciplina, ispitivanja i istraživanja njihove proizvodnje, karakteristika, mehanizama rada i ostalog od ključne su važnosti te se ubrzano premještaju u središte pozornosti kada je riječ o naprednim tehnologijama.

§ 5. LITERATURNI IZVORI

1. H. Souri, H. Banerjee, A. Jusufi, N. Radacsi, A. A. Stokes, I. Park, M. Sitti, M. Amjadi, *Adv. Intell. Syst.* **2** (2020) 2000039–2000065.
2. M. Amjadi, K. U. Kyung, I. Park, M. Sitti, *Adv. Funct. Mater.* **26** (2016) 1678.
3. C. Wang, K. Xia, H. Wang, X. Liang, Z. Yin, Y. Zhang, *Adv. Mater.* **31** (2019) 1801072.
4. Z. Lou, L. Wang, G. Shen, *Adv. Mater. Technol.* **3** (2018) 1800444.
5. H. Liu, Q. Li, S. Zhang, R. Yin, X. Liu, Y. He, K. Dai, C. Shan, J. Guo, C. Liu, C. Shen, X. Wang, N. Wang, Z. Wang, R. Wei, Z. Guo, *J. Mater. Chem. C* **6** (2018) 12121.
6. S. Seyedin, P. Zhang, M. Naebe, S. Qin, J. Chen, X. Wang, J. M. Razal, *Mater. Horizons* **6** (2019) 219.
7. H. Zhao, K. O'Brien, S. Li, R. F. Shepherd, *Sci. Robot.* **1** (2016) eaai7529.
8. M. T. Almansoori, X. Li, L. Zheng, *Curr. Smart Mater.* **4** (2019) 3.
9. M. Amjadi, M. Turan, C. P. Clementson, M. Sitti, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** (2016) 5618.
10. M. Amjadi, Y. J. Yoon, I. Park, *Nanotechnology* **26** (2015) 375501.
11. M. Amjadi, A. Pichitpajongkit, S. Lee, S. Ryu, I. Park, *ACS Nano* **8** (2014) 5154.
12. Y. Yang, L. Shi, Z. Cao, R. Wang, J. Sun, *Adv. Funct. Mater.* **29** (2019) 1807882.
13. T. Yan, Z. Wang, Y. Q. Wang, Z. J. Pan, *Mater. Des.* **143** (2018) 214.
14. M. Zhang, C. Wang, H. Wang, M. Jian, X. Hao, Y. Zhang, *Adv. Funct. Mater.* **27** (2017) 1604795.
15. C. Wang, X. Li, E. Gao, M. Jian, K. Xia, Q. Wang, Z. Xu, T. Ren, Y. Zhang, *Adv. Mater.* **28** (2016) 6640.
16. H. Souri, D. Bhattacharyya, *J. Mater. Chem. C* **6** (2018) 10524.
17. H. Souri, D. Bhattacharyya, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** (2018) 20845.
18. X. Liu, C. Tang, X. Du, S. Xiong, S. Xi, Y. Liu, X. Shen, Q. Zheng, Z. Wang, Y. Wu, A. Horner, J. K. Kim, *Mater. Horizons* **4** (2017) 477.
19. S. Huang, G. He, C. Yang, J. Wu, C. Guo, T. Hang, B. Li, C. Yang, D. Liu, H.-J. Chen, Q. Wu, X. Gui, S. Deng, Y. Zhang, F. Liu, X. Xie, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** (2019) 1294.
20. Y. Cai, J. Shen, G. Ge, Y. Zhang, W. Jin, W. Huang, J. Shao, J. Yang, X. Dong, *ACS Nano* **12** (2018) 56.
21. Q. Liu, J. Chen, Y. Li, G. Shi, *ACS Nano* **10** (2016) 7901.
22. H. Xu, Y. Lv, D. Qiu, Y. Zhou, H. Zeng, Y. Chu, *Nanoscale* **11** (2019) 1570.

23. J. Zhang, Y. Cao, M. Qiao, L. Ai, K. Sun, Q. Mi, S. Zang, Y. Zuo, X. Yuan, Q. Wang, *Sens. Actuators A Phys.* **274** (2018) 132.
24. Z. Liu, D. Qi, G. Hu, H. Wang, Y. Jiang, G. Chen, Y. Luo, X. J. Loh, B. Liedberg, X. Chen, *Adv. Mater.* **30** (2018) 1704229.
25. S. Wan, Z. Zhu, K. Yin, S. Su, H. Bi, T. Xu, H. Zhang, Z. Shi, L. He, L. Sun, *Small Methods* **2** (2018) 1700374.
26. A. Leber, B. Cholst, J. Sandt, N. Vogel, M. Kolle, *Adv. Funct. Mater.* **29** (2019) 1802629.
27. J. C. Liao, D. N. Beal, G. V. Lauder, M. S. Triantafyllou, *J. Exp. Biol.* **206** (2003) 1059.