

ОБРАЗАЦ 6

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА У КРАГУЈЕВЦУ
И
ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

На седници Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу одржаној 24.10.2025. године (број одлуке: IV-04-577/21) одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом: „РАЗВОЈ АНАЛИТИЧКОГ МОДЕЛА БИОШТАМПЕ МЕКИХ БИОМАТЕРИЈАЛА ЗА ПРИМЕНУ У ОФТАЛМОЛОГИЈИ”, кандидата **Саше Њежића**, студента докторских академских студија Машинско инжењерство, за коју је именован ментор **Проф. Др Фатима Живић**, ванредни професор и коментор **Проф. Др Ненад Петровић**, ванредни професор.

На основу података којима располажемо достављамо следећи:

ИЗВЕШТАЈ
О ОЦЕНИ УРАЂЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

1. Подаци о докторској дисертацији
1.1. Наслов докторске дисертације:
РАЗВОЈ АНАЛИТИЧКОГ МОДЕЛА БИОШТАМПЕ МЕКИХ БИОМАТЕРИЈАЛА ЗА ПРИМЕНУ У ОФТАЛМОЛОГИЈИ
1.2. Опис докторске дисертације (навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, шема, графикана, једначина и референци) (до 500 карактера):
Дисертација (147 стр) има 8 поглавља (46 слика, 19 табела, 388 референци): Увод (стр. 1-16), Биоматеријали у медицини (стр. 16-20), Примена силикона у офталмологији – преглед досадашњих истраживања (стр. 21-44), Теоријска разматрања (стр. 45-64), Експериментална истраживања (стр. 65-92), Резултати истраживања (стр. 93-111), Анализа резултата истраживања (стр. 112-117), Закључци (стр. 118-121), Литература (стр. 122-147) и Прилози (148-161).
Развијен је математички модел тангенцијалног напона заснован на ФЕНЕ (Finite Extensible Nonlinear Elastic) моделу за нењутновске флуиде, који повезује напон, брзину и притисак уз утицај вискозности и смицања, а валидиран је експериментима на полидиметилсилоксан (PDMS) узорцима.
1.3. Опис предмета истраживања (до 500 карактера):
Предмет истраживања је развој аналитичког модела понашања нењутновских меких материјала са ефектом стањивања услед смицања (енг. shear thinning, опадање вискозности нењутновског флуида) при биоштампи офталмолошких интраокуларних сочива. Истраживање обухвата утврђивање везе између параметара биоштампе и финалних својстава материјала, моделовање

тангенцијалног напона, анализу утицаја процесних параметара 3D штампе и експерименталну валидацију добијених резултата.

1.4. Анализа испуњености полазних хипотеза:

Анализом приказаних резултата и закључака може да се констатује да су хипотезе постављене на почетку истраживања, у пријави теме докторске дисертације у потпуности испуњене.

Дисертација указује на методолошки ригорозан приступ у анализи сложеног понашања меких материјала током процеса 3Д биоштампе. Полазне хипотезе, које су представљале нужне апроксимације реалних физичких процеса, формулисане су са циљем успостављања математичког оквира за моделирање и експерименталну верификацију кључних радних и конструктивних параметара.

Основне хипотезе дисертације заснивају се на претпоставци да улазни параметри биоштампе суштински одређују димензиону тачност, стабилност и механичке карактеристике одштампаних меких материјала, као и да разумевање физике течења (shear thinning, вискозност, нењутновско понашање) одређује адхезију слојева и изводљивост структуре. Такође се полази од тога да комбинација различитих меких материјала и ојачавајућих честица може створити погодне биоматеријале за офталмологију и да се аналитичка решења за shear thinning могу примењивати за оптимизацију процеса биоштампе како би се добиле стабилне и прецизне структуре, укључујући интраокуларна сочива.

Верификација наведених хипотеза кроз компаративну анализу резултата математичког модела и емпиријских података стечених експерименталним путем потврђује валидност примењених апроксимација у дефинисаним радним условима. Успешно потврђене хипотезе представљају значајан научни допринос, јер утемељују методолошки оквир за даљу анализу и оптимизацију меких материјала за примену код адитивних технологија 3Д биоштампе. Дисертација пружа увиде у понашање материјала током процеса 3Д штампе и поставља чврсту основу за будућа истраживања усмерена ка побољшању ефикасности и поузданости тих нових производних технологија, као и развоја нових материјала који се могу примењивати код адитивних технологија.

1.5. Анализа примењених метода истраживања:

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације обухватају теоријски и експериментални приступ. Теоријски део заснива се на квантитативној и квалитативној анализи података, формулацији математичких модела и њиховој валидацији.

У дисертацији је извршена детаљна анализа формулације математичких модела заснованих на FENE приступу ради описивања понашања нењутновских меких материјала током биоштампе. У модел су уведени кључни утицајни параметри: брзина смицања, притисак, вискозност и брзина штампања, како би се утврдиле њихове међусобне зависности и утицај на стабилност и тачност штампаних структура. Оваква формулација омогућила је предикцију оптималних услова процеса и валидирана је поређењем са експерименталним резултатима.

Нумерички резултати добијени применом развијеног аналитичког модела и Maple софтверског алата омогућили су прецизну симулацију понашања нењутновских материјала при различитим условима биоштампе. Њихова анализа потврдила је валидност теоријских поставки и омогућила идентификацију кључних параметара који утичу на стабилност, димензиону тачност и реолошко понашање штампаних структура.

Експериментални део обухвата припрему и израду меких материјала применом биоштампе уз контролисану промену одабраних утицајних параметара, као што су брзина штампе, температура, притисак и геометрија узорака. Микроструктура узорака је посматрана применом микроскопије. Механичке карактеристике су испитиване на савременом уређају за испитивање механичких

карактеристика који је омогућио висок степен прецизности у одређивању отпорности на притисак и понашања материјала при различитим степенима оптерећења.

Биоштампање је реализовано употребом модерних биопринтера који омогућавају прецизно дозирање, контролу процесних параметара и израду узорака различитих облика и димензија. Добијени резултати структурних и механичких испитивања су детаљно анализирани ради утврђивања утицаја кључних параметара биоштампе на понашање материјала.

Анализа математичких модела и експерименталних резултата потврдила је полазне хипотезе и омогућила идентификацију оптималних услова процеса који обезбеђују најбоље реолошке и механичке особине материјала, релевантне за практичну примену у процесима биоштампања и изради функционалних елемената за офталмолошку употребу.

1.6. Анализа испуњености циља истраживања:

Дисертација представља значајан научни допринос усмерен ка побољшању стабилности и димензионе тачности штампаних меких материјала применом 3Д биоштампе. Свеобухватним приступом којим је обједињено математичко моделирање и прецизна експериментална испитивања применом специјализоване лабораторијске опреме, идентификовани су кључне карактеристике материјала и параметри производног процеса који директно утичу на могућност 3Д штампе меких материјала. Ова методолошка ригорозност омогућила је квантификацију утицаја појединачних параметара на димензиону тачност, као и идентификацију критичних утицаја за постизање стабилних 3Д штампаних структура.

Циљ истраживања, који обухвата развој аналитичког модела за описивање понашања нењутновских меких материјала са ефектом стањивања услед смицања и њихову примену у биоштампи за офталмолошке намене, у потпуности је остварен. Формулисан је математички модел заснован на FENE приступу, који успешно описује зависност тангенцијалног напона, притиска, брзине смицања и вискозности, а кроз анализу аналитичког модела контакта меких материјала и гелова са тврдим површинама додатно је дат допринос разумевању понашања материјала у реалним условима биоштампе. Експериментални и нумерички резултати валидирани су аналитичка решења, омогућивши идентификацију параметара критичних за стабилност, адхезију и димензиону тачност штампаних структура.

Истраживање је такође показало потенцијал за избор и развој напредних биоматеријала подобних за биоштампу, што укључује и дефинисање услова и приступа за израду кастомизованих интраокуларних сочива. Постигнута побољшања у димензионој тачности и разумевању реолошког понашања меких материјала представљају значајну додатну вредност дисертације и потврђују да су планирани циљеви у потпуности остварени.

Сви задаци и очекивања дефинисани у оквиру циљева истраживања докторске дисертације у потпуности су испуњени.

1.7. Анализа добијених резултата истраживања и списак објављених научних радова кандидата из докторске дисертације (аутори, наслов рада, назив часописа, волумен, година објављивања, странице од-до, DOI број¹, категорија):

Резултати ове дисертације у потпуности су усклађени са планираним исходима. Оптимални параметри биоштампе успешно су дефинисани, што је довело до побољшане димензионе тачности и стабилности меких материјала. Утврђена је јасна зависност трења између слојева од молекулске масе, температуре, оптерећења, брзине клизања и природе површине, док су аналитички модели, укључујући модел стањивања услед смицања, успешно формулисани и потврђени. Експериментална испитивања омогућила су утврђивање механичких карактеристика материјала, а анализе су показале и да биоштампа пружа реалне могућности за развој

¹ Уколико публикација нема DOI број уписати ISSN и ISBN

кастомизованих интраокуларних сочива. Поред тога, разматран је и аспект детерминистичког хаоса, чиме је истраживање обухватило и сложене динамичке феномене процеса биоштампе.

Списак објављених научних радова из докторске дисертације:

1. Njezic S, Zivic F, Savic S., Petrovic N., Jovanovic Pesic Z., Stefanovic A., Milenkovic S., Grujovic N., Analytical model of friction at low shear rates for soft materials in 3D printing, Technology and Health Care, 2024;32(5):3443-3462, doi: 10.3233/THC-240209, ISSN 0928-7329, M23
2. Mladenovic, T.; Zivic, F.; Petrovic, N.; Njezic, S.; Pavic, J.; Kotorcevic, N.; Milenkovic, S.; Grujovic, N. Application of Silicone in Ophthalmology: A Review. Materials 2024, 17, 3454. DOI: 10.3390/ma17143454, ISSN 1996-1944, M21
3. Nježić, S., Radulović, J., Živić, F., Mirić, A., Jovanović Pešić, Z., Vasković Jovanović, M., Grujović, N., Chaotic Model of Brownian Motion in Relation to Drug Delivery Systems Using Ferromagnetic Particles, Mathematics, 10(24), 4791; 2022, DOI: 10.3390/math10244791, ISSN 2227-7390, M21a
4. Busarac N, Jovanovic Z, Njezic S, Zivic F, Grujovic N, Adamovic D, Experimental Study and Analytical model of Shear Thinning in 3D Bioprinting of Gelatin, Tribology in Industry, Vol. 42, No. 3, pp. 503-512, 2020, DOI: 10.24874/ti.964.09.20.09, ISSN: 0354-8996, M24

Објављени радови показују активан допринос кандидата развоју аналитичких модела за подршку процесу биоштампе, посебно у области 3Д штампе меких материјала за примену у офталмологији. Резултати дисертације потврђују научну и практичну вредност развијених аналитичких модела понашања меких материјала у процесу биоштампе, што представља значајан допринос развоју процеса биоштампе и примену у развоју кастомизованих решења материјала за интраокуларна сочива.

Имајући у виду наведене чињенице, Комисија сматра да су циљеви истраживања остварени и да су испуњени сви захтеви прописани Правилником и остварени услови за одбрану докторске дисертације кандидата Саше Њежића.

1.8. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области и анализа извештаја о провери докторске дисертације на плагијаризам (до 1000 карактера):

Оригиналност докторске дисертације огледа се у формулацији новог аналитичког модела за опис понашања нењутновских меких материјала са ефектом стањивања услед смицања и прилагођеног специфичним условима биоштампе. Дисертација први пут систематски повезује реолошке параметре, трење између слојева и процесне услове биоштампе са димензионом тачношћу и стабилношћу структуре, уз експерименталну и нумеричку валидацију модела. Посебну оригиналност представља и примена развијених модела у контексту израде кастомизованих интраокуларних сочива, што отвара нове могућности у биомедицинском инжењерству.

Извештај о плагијаризму указује на висок ниво оригиналности при чему се минимална преклапања текста (индекс сличности 3%) односе на стандардну научну терминологију и претходно објављене резултате кандидата у високоранжираним часописима (M21a, M21, M23).

Садржај дисертације представља оригиналан истраживачки рад кандидата, који демонстрира критичко мишљење, самосталан научни допринос и значајан напредак у области аналитичких модела као подршке у развоју нових офталмолошких материјала применом 3Д биоштампе.

1.9. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области:

Докторска дисертација даје значајан допринос актуелном стању научне области Производно машинство јер уводи свеобухватан аналитички модел за опис понашања меких нењутновских материјала у условима 3Д биоштампе, као нове напредне производне технологије која омогућава дизајн нових материјала, што до сада није било довољно развијено у литератури.

У оквиру дисертације, развијени су оригинални математички модели који обезбеђују теоријску основу за анализу и оптимизацију процеса 3Д штампе меких материјала. Верификација развијених модела је потврђена кроз нумеричка и експериментална испитивања биоштампе меких материјала. Овај интегрисани, теоријско-експериментални приступ омогућио је прецизну анализу параметара процеса 3Д штампе и идентификацију кључних параметара који значајно утичу на могућност 3Д штампе меких материјала.

Комбиновањем аналитичких, нумеричких и експерименталних метода, истраживање пружа нове увиде у утицај процесних параметара на димензиону тачност, стабилност и реолошке карактеристике 3Д штампаних структура. Допринос је посебно значајан и у области биомедицинског инжењерства јер резултати омогућавају примену биоштампе за развој кастомизованих интраокуларних сочива, чиме се отварају нове могућности за практичну примену и даљи научни развој.

1.10. Оцена испуњености услова за одбрану докторске дисертације у складу са студијским програмом, општим актом факултета и општим актом Универзитета (до 1000 карактера):

Докторска дисертација докторанта Саше Њежића испуњава све услове за одбрану, у складу са захтевима студијског програма, општим прописима факултета и смерницама универзитета. Истраживање се одликује високим степеном оригиналности и значајним доприносом у областима производно машинство (адитивне технологије и нови материјали) и биомедицинског инжењерства, са посебним акцентом на развој 3Д штампаних материјала подржано аналитичким и нумеричким моделима за примену у офталмологији.

Дисертација обухвата јасно дефинисан истраживачки проблем, преглед савремене литературе, прецизно формулисане циљеве и добро осмишљену методологију, при чему су сви аспекти истраживања у складу са академским стандардима предвиђеним за докторске студије. Истраживање показује способност кандидата да самостално спроводи експериментални рад, критички анализира резултате и логички их представи кроз дискусију. У раду су детаљно представљени резултати који се односе на развој аналитичког модела за опис понашања меких неђутновских материјала у условима 3Д биоштампе. Такође је представљена примена нумеричког модела заснованог на развијеном аналитичком моделу, као и експериментална валидација модела кроз израду 3Д штампаних узорака и њихово испитивање на савременој опреми уз свеобухватну анализу резултата. На основу свега, Комисија закључује да је истраживање спроведено на високом научном нивоу и да има значајан потенцијал за примену у развоју нових материјала применом 3Д биоштампе.

Оригиналност дисертације је потврђена извештајем о плагијаризму, који показује низак степен сличности у оквиру академски прихватљивих граница. Сходно томе, као и осталим наведеним критеријумима, дисертација у потпуности испуњава формалне услове које факултет и универзитет захтевају за успешну одбрану.

2. ЗАКЉУЧАК

На основу анализе докторске дисертације и приложене документације Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом **„РАЗВОЈ АНАЛИТИЧКОГ МОДЕЛА БИОШТАМПЕ МЕКИХ БИОМАТЕРИЈАЛА ЗА ПРИМЕНУ У ОФТАЛМОЛОГИЈИ”**, кандидата **Саше Њежића**, предлаже надлежним стручним органима да се докторска дисертација прихвати и да се одобри њена одбрана.

Чланови комисије:



Гордана Јовичић, редовни професор

Факултет инжењерских наука, Универзитета
у Крагујевцу

Примењена механика

Председник комисије



Слободан Савић, редовни професор

Факултет инжењерских наука, Универзитета
у Крагујевцу

Примењена механика

Члан комисије



Петар Тодоровић, редовни професор

Факултет инжењерских наука, Универзитета
у Крагујевцу

Производно машинство

Члан комисије



Сунчица Срећковић, редовни професор

Факултет медицинских наука, Универзитета
у Крагујевцу

Офталмологија

Члан комисије



Светлана Пелемиш, редовни професор

Технолошки факултет у Зворнику,
Универзитета у Источном Сарајеву

Физика чврстог стања

Члан комисије