

Кинетичка фасада као интерактивни елемент савремене архитектуре*Kinetic façade as an interactive element of contemporary architecture*Владан Јовановић, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Студијски програм – АРХИТЕКТУРА**

Кратак садржај – Истраживање се бави развојем и тестирањем кинетичких фасада које реагују на светлост, топлоту и људску активност. Кроз низ физичких прототипова, анализира се како различити механизми могу побољшати енергетску ефикасност и визуелну динамику објекта. Крајњи резултат је прототип "Wave 2.0", самоодржив систем са соларним напајањем и једноставним, поузданим механизмом који ствара интерактивну, таласну фасадну површину.

Кључне речи: Кинетичка фасада, интерактивни системи, еколошка одрживост

Abstract – The research focuses on the development and testing of kinetic façades that respond to light, heat, and human activity. Through the combination of digital simulations and physical prototypes, it examines how different mechanisms can improve a building's energy efficiency and visual dynamism. The final outcome is the "Wave 2.0" prototype — a self-sustaining system powered by solar energy, featuring a simple and reliable mechanism that generates an interactive, wave-like façade surface.

.Keywords: Kinetic façade, interactive systems, ecological sustainability

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Бојан Тепавчевић, ред. проф.

1. УВОД

Савремена архитектура све више напушта статичке моделе и окреће се динамичким системима који могу да се прилагођавају условима околине. У том контексту, кинетичке фасаде представљају један од најзначајнијих корака ка развоју адаптивних архитектонских структура. Оне интегришу механику, дигиталну технологију, сензоре и алгоритме како би генерисале променљив просторни израз и побољшане функционалне перформансе.

Мотивација за истраживање проистиче из недостатка доступних података о реалним перформансама кинетичких фасада. Иако постоје различите технологије и компоненте, њихова примена у пракси често је ограничена јер не постоје стандардизовани методи за њихову процену и тестирање. Фокус истраживања није на технологији самој по себи, већ на

дизајну покрета – начину на који се кретање може користити као основни архитектонски елемент који успоставља дијалог између унутрашњег, спољашњег простора и корисника.

Циљ рада је да се истраже и развију стратегије за пројектовање кинетичких фасада које одговарају на промене у окружењу путем покрета и композиције, да се развију прототипи како би се у раним фазама дизајна идентификовале оптималне конфигурације система и избегли проблеми у каснијим фазама пројектовања и постигле максималне еколошке перформансе, самоодрживост и интерактивност са околином.

2. ТЕОРИЈСКИ ОКВИРИ-ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Ово истраживање даје свеобухватан преглед постојећих приступа и реализованих примера кинетичких фасада, са циљем да се дефинише теоријски оквир за разумевање њихове улоге у савременој архитектури и њиховог потенцијала у области контроле микроклиме, енергетске ефикасности, одрживости и интерактивности. Кинетички системи у архитектури представљају важан корак ка обликовању фасада које активно реагују на промене у окружењу, мењајући се у складу са светлосним, топлотним и просторним условима. Упркос растућем интересовању, постојећа литература указује на то да теоријска основа ових система још увек није у потпуности развијена, као ни систематизовано разумевање њихових перформанси и дугорочне ефикасности. Зато је неопходан интердисциплинарни приступ који повезује архитектуру, инжењерство и рачунарски дизајн, уз развој метода за симулацију и вредновање кинетичких механизма у раној фази пројектовања. Кинетика у архитектури није нов концепт, а њени почеци могу се пратити још од 1960-их, иако развој тих система није јасно линеаран. Рани примери, као што је Pavilion '67 Бакминстера Фулера, представљају прве визионарске покушаје да се фасада осмисли као одзивни систем. Иако технички ограничен за своје време, овај прототип поставио је концепт „архитектонске коже“ која се прилагођава сунчевој путањи и утиче на унутрашњу микроклиму. Слично томе, фасада Института арапског света Жана Новела из 1980. године уводи механизам инспирисан сочивима фотоапарата, са 25.000 покретних ћелија које контролишу пропусност светлости. Ипак, временом је постало

јасно да механички системи, колико год технички иновативни били, могу постати непоуздани у експлоатацији, што указује на један од кључних изазова кинетичких фасада – одрживост и трајност механизма у реалним условима. Савремени пројекти настављају да развијају ова начела кроз технички напредније системе. Пример *"Abu Dhabi Investment Council"* зграде, једне од највећих реализованих динамичких машрабија, демонстрира комплексну фасаду са преко хиљаду покретних јединица које у три режима отварања и затварања реагују на сунчеву радијацију. Иако фасада визуелно и технички делује импресивно, јавни подаци о стварној енергетској ефикасности овог система остају ограничени, што поново указује на важност перформансних анализа. Мањег размера, али подједнако значајни примери су *"Milsertor Service Centre"* у Аустрији, са преклопним плексиглас панелима синхронизованим преко механичких вођица, као и *"Kiefer Technik"* шоурум са индивидуално управљивим алуминијумским жалузинама. Иако технолошки прецизно изведени, ови системи често не садрже довољно података о томе у којој мери заиста прате и одговарају на услове околине. Међутим, и поред значајног архитектонског потенцијала, и даље постоје кључни изазови који успоравају њихову ширу примену: поузданост и дуготрајност механичких компоненти, потреба за одржавањем, висок степен зависности од технологије, као и недостатак свеобухватних анализа пре и после изградње. За напредак у овој области неопходно је увођење јединствене методологије евалуације, развој нових алата за симулацију и итеративни дизајн који би омогућили боље разумевање перформанси система у реалним условима. Будући развој кинетичких фасада зависиће од балансирања архитектонске експресије, функционалне ефикасности и технолошке поузданости, што ће допринети њиховој широј примени у оквиру одрживе и климатски адаптивне архитектуре.

3. ИДЕНТИФИКОВАЊЕ КИНЕТИЧКИХ ОБРАЗАЦА АРХИТЕКТОНСКИХ ФАСАДА

Поглавље 3 бави се идентификацијом и развојем кинетичких образаца фасада, кроз процес који обједињује истраживање механизма кретања, материјалних својстава и контролних система. Циљ је да се успостави уопштени оквир који омогућава разумевање како појединачни елементи – материјал, геометрија и актуатори – заједнички дефинишу понашање активне површине. Посебан нагласак ставља се на важност експерименталног прототиписања, које допуњава дигиталне симулације и омогућава проверу реалних ограничења, као што су трење, флексибилност и стабилност у покрету. У оквиру истраживања издвојена су четири кинетичка система – *"Wave"*, *"Square-tic"* и *"Balloon"* – који представљају различите типове трансформација и начине увођења кретања у фасадне површине.

3.1. „Wave“ систем: Ротација

"Wave" систем заснива се на комбинацији клизања и ротације, са елементима који се померају у таласастом

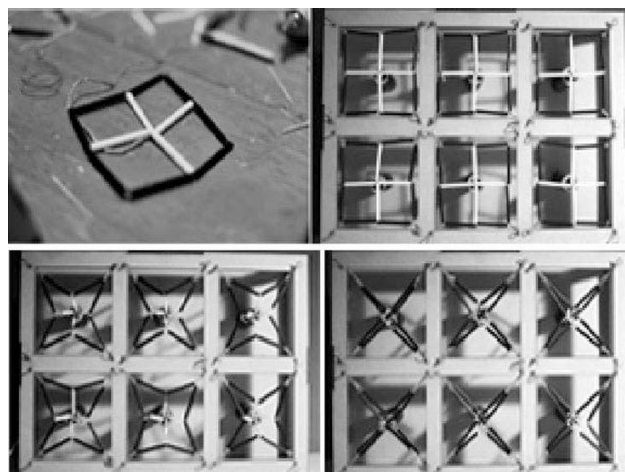
образцу. Прототип показује да комплексност механизма расте са бројем модула, јер је потребна висока прецизност у синхронизацији и минимизацији отпора. Овај систем илуструје да динамички визуелни ефекти често захтевају сложенију кинематику него што се претпоставља у концептуалној фази.



Слика 1. Одвојене компоненте модела "Wave" [2]

3.2. „Square-tic“ систем: Увлачење

"Square-tic" систем користи принципе клизања и увлачења/извлачења у оквиру једноставније геометријске структуре. Захваљујући еластичним спојевима и редукованом броју покретних делова, прототип је постигао стабилније и предвидљивије трансформације од *"Wave"* система. Овај пример указује да поједностављена геометрија може побољшати поузданост и употребљивост у архитектонским условима.

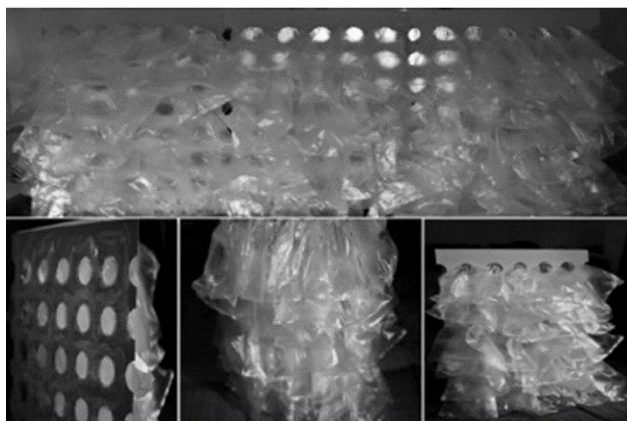


Слика 2. Фазе кретања четири панела који се покрећу истовремено коришћењем јединственог механизма за повлачење и отпуштање [2]

3.3. „Balloon“ систем: Надувавање и издувавање

"Balloon" систем користи пнеуматску трансформацију кроз надувавање и издувавање, ослањајући се на принципе мембранских материјала попут ETFE-а. Иако нуди изразиту пластичност и визуелну динамичност, контрола облика је ограничена због непредвидљивости деформација и ширења материјала. Овај систем наглашава потенцијал пнеуматике, али и показује да је за архитектонску

примену неопходна напреднија контрола притиска и материјалних својстава.



Слика 3. Физички прототип пројекта "Ballon" [2]

Закључно, поглавље истиче да успешан развој кинетичких фасада зависи од избора једноставних, али поузданих кинетичких принципа, као и од раног физичког тестирања које омогућава емпиријску проверу трансформација, енергетских ефеката и временског понашања система. Овакав комбиновани приступ представља кључни корак ка развоју ефикасних и одрживих респонзивних фасадних структура.

4. АНАЛИЗА ТИПОВА АКТУАТОРА У КИНЕТИЧКИМ ФАСАДНИМ СИСТЕМИМА

Поглавље представља систематску анализу пет кључних типова актуатора који се примењују у савременим кинетичким фасадним системима: електричних линеарних и ротационих, хидрауличних, пнеуматских и термо-реактивних (SMA) актуатора. Полазиште истраживања заснива се на експерименталним моделима из претходног поглавља, који су показали да избор механизма покрета суштински утиче на конструктивне, материјалне и енергетске карактеристике адаптивних фасада.

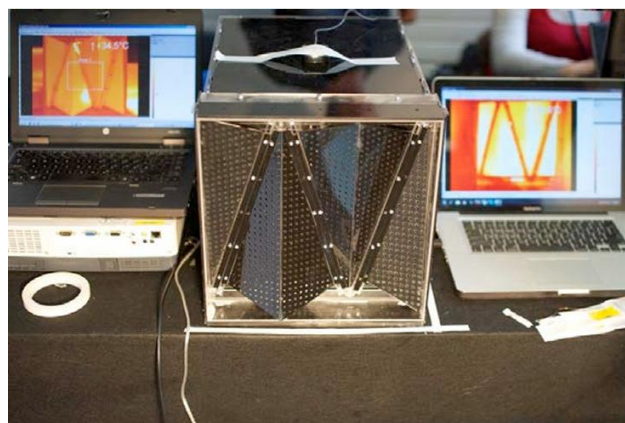
Кроз анализу репрезентативних светских примера — "Bloomframe Window", "Kiefer Technic Showroom", "Milwaukee Art Museum", "Watercube" и "HygroSkin Pavilion" — идентификоване су основне предности и ограничења различитих врста актуатора. Електрични линеарни и ротациони актуатори истакли су се као поуздано решење за фасадне системе који захтевају прецизно позиционирање и флексибилне сценарије кретања. Хидраулични актуатори показали су највеће могућности у погледу преноса силе и управљања масивним елементима, док пнеуматски и SMA актуатори проширују поље примене ка лаганим, адаптивним и биомиметичким структурама.

Резултати анализе указују да се избор актуатора мора дефинисати већ у раној фази пројектовања, јер директно условљава комплексност механизма, енергетску ефикасност, визуелни идентитет и дугорочну одрживост фасадног система. Разумевање функционалних и техничких својстава сваког типа актуатора омогућава архитектама и инжењерима да развијају динамичке фасаде које су истовремено

технолошки изводљиве, функционално ефикасне и естетски интегрисане.

5. ТЕРМАЛНА РЕАКЦИЈА КИНЕТИЧКОГ ПРОТОТИПА

Поглавље 5 анализира термалну реакцију кинетичког прототипа, уз нагласак на потреби да се перформансе фасада процењују током целокупног годишњег циклуса. Истраживање се ослања на резултате радионичког кластера "Thermal Reticulation" (SmartGeometry 2013), где је спроведена серија симулација светлосних и топлотних услова ради евалуације једног кинетичког система у раној фази пројектовања. Експерименти са дневним светлом реализовани су применом пет халогених лампи и три светлосна сензора у контролисаном окружењу, при различитим угловима упада светлости који репрезентују летње и зимске услове. Кинетички панели били су управљани SMA опругама повезаним са Arduino платформом, што је омогућило директну одзивност фасаде на промене нивоа осветљења; тестирање је показало да осетљивост сензора и карактеристике актуатора значајно утичу на квалитет трансформације.



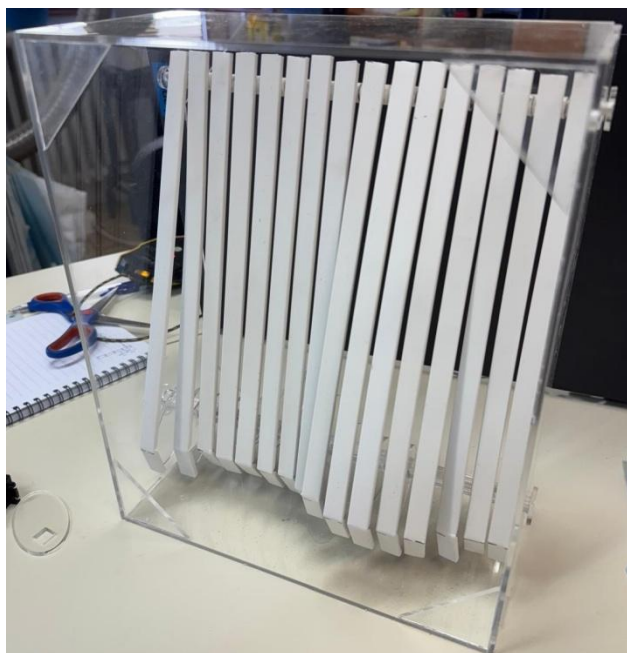
Слика 4. Инфрацрвена термална камера је постављена испред и унутар кутије како би се визуелизовало колико брзо материјал апсорбује топлоту [4]

Други део истраживања обухватао је симулацију топлотног понашања, у којој је фасадни систем редукован на модел-кутију са контролисаним граничним условима. Комбинација две инфрацрвене термалне камере и мреже од 27 температурних сензора омогућила је визуелизацију поља температуре и праћење преноса топлоте у три различита стања отворености фасаде. Резултати указују на брже загревање ивичних зона и изражену неравномерност расподеле топлоте, док су варијације отворености показале потенцијал у ублажавању унутрашњег прегревања. Дигитална реконструкција у MATLAB-у потврдила је да физичка тестирања нуде поузданије податке за евалуацију него искључиво симулацијски модели, те да термичке трансформације фасаде захтевају интеграцију материјала, механизма и сензорских система у раној фази дизајна.

6. УНАПРЕЂЕНИ ПРОТИТИП "Wave 2.0"

Прототип "Wave 2.0" представља унапређену фазу развоја кинетичке фасаде намењене јавним објектима, засновану на поједностављењу механизма, повећању поузданости и увођењу енергетске самоодрживости. Основна идеја је да се постигне интерактивна, визуелно динамична и технички рационална фасадна површина која ради преко једног ротирајућег мотора и ствара континуирани „таласни“ ефекат панела. Конструктивни систем чине вертикални панели који клизе по вођицама и ослањају се на ротирајући низ од 16 елипси. Оне су постављене под благим угаоним помацима, тако да синхронизовано окретање ствара синусоидно кретање дуж целе фасаде. Механизам је поједностављен употребом лаганих материјала и једног осовинског система који равномерно преноси обртни момент, уз могућност континуираног или периодичног рада.

"Wave 2.0" је развијен као потенцијално потпуно самоодржив систем: на површинама панела интегрисани су соларни модули који напајају мотор и микроконтролер, док батерија омогућава рад у условима слабије инсолације. Фасада функционише у аутономном режиму континуираног таласања или у респонзивном режиму у ком сензори звука и Arduino контролер прилагођавају брзину кретања у складу са интензитетом активности у окружењу. Тако фасада постаје посредник између архитектуре и јавног простора, реагујући на звучни и друштвени амбијент. Естетски, "Wave 2.0" ствара флуидну површину која производи променљиве игре светлости и сенке, чиме фасада постаје динамичан визуелни елемент и део амбијента јавних простора. Комбинација лаганих материјала и минималистичке геометрије наглашава технолошки карактер система, а у различитим деловима дана кретање добија перформативни квалитет.



Слика 5. Макета унапређеног прототипа "Wave 2.0"

Иако је реализован у скали макете, систем је скалабилан на реалне објекте захваљујући једноставној конструктивној логици, малом броју покретних елемената и могућности софтверског управљања. Даљи развој могао би обухватити тестирање под оптерећењем, оптимизацију морфологије елипси и проширивање интерактивних режима преко више типова сензора. У целини, Wave 2.0 показује да је могуће комбиновати визуелну експресију, енергетску независност и техничку поузданост у једном компактном, адаптивном фасадном систему.

7. ЗАКЉУЧАК

Сумирано, истраживање показује да кинетичке фасаде нису само формални експеримент већ интегрални део еколошки одговорне архитектуре. Њихова истинска вредност лежи у способности да посредују између корисника и окружења, да унапређују енергетске перформансе и да архитектуру претворе у динамичан систем који реагује на светлост, топлоту и људску активност. Будући развој треба да обједини инжењерску прецизност, материјалну иновацију и интерактивне принципе како би кинетичке фасаде postale стандард у савременом пројектовању.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Moloney J. „*Designing Kinetics for Architectural Facades: State change*“, Routledge, London 2011.
- [2] Kamil Sharaidin, „*Towards desing for Enviromental Performance*“, 2014.
- [3] Loonen, „*Responsive building envelopes*“. 2013.
- [4] Alex Ritter, „*Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Desing*“, 2007.

Кратка биографија:



Владан Јовановић рођен је 23.08.2000. године у Новом Саду. Дипломски рад је одбранио на Факултету техничких наука 2023. године из области Архитектура и урбанизам.
Контакт: vladansjovanovic@gmail.com