

Параметарско моделовање и евалуација биоактивних фотокаталитичких фасада заснованих на геометрији гироида

Parametric Modeling and Evaluation of Bioactive Photocatalytic Façades Based on Gyroid Geometry

Анастасја Мандић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ДИГИТАЛНИ ДИЗАЈН И ФАБРИКАЦИЈА

Кратак садржај – Рад анализира како морфологија фасаде утиче на потенцијал фотокаталитичког пречишћавања ваздуха у урбаном контексту. Полазећи од проблема акумулације полутаната у градским „street canyon“ условима, фасада се посматра као активни систем који, уз TiO_2 премаз, може да разграђује NO_x и VOC једињења. Истраживање примењује параметарски приступ у Rhino/Grasshopper окружењу и упоређује четири фасадне варијанте истих габарита: равну плочу и три гироидне TPMS структуре различите порозности. Евалуација се врши преко три геометријска индикатора: укупне изложене површине (A), пројекционе отворености (O) и комбинованог индекса ИЕПО. Резултати показују да гироид са средњом порозношћу постиже најповољнији баланс између активне површине и пропусности, те се метод $A-O$ –ИЕПО предлаже као брз и поновљив алат за ранофазно одлучивање у дизајну фотокаталитичких фасада.

Кључне речи: фотокаталитичка фасада, TiO_2 , TPMS гироид, порозност, параметарско моделовање

Abstract – This paper examines how façade morphology affects the potential of photocatalytic air purification in an urban context. Addressing pollutant accumulation in street-canyon conditions, the façade is treated as an active system that, when coated with TiO_2 , can contribute to the degradation of NO_x and VOC compounds. The study applies a parametric workflow in Rhino/Grasshopper and compares four façade variants of identical dimensions: a flat reference panel and three gyroid-based TPMS structures with different porosity levels. The evaluation is carried out using three geometric indicators: total exposed surface area (A), projected openness (O), and a combined index (IEPO). Results indicate that the medium-porosity gyroid achieves the most favorable balance between active surface and permeability, and the $A-O$ –IEPO method is proposed as a fast, repeatable decision-support tool for early-stage design of photocatalytic façades.

Keywords: photocatalytic façade, titanium dioxide (TiO_2), TPMS gyroid, porosity, parametric modeling

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

1. УВОД

Интензивна урбанизација и раст густине изграђености у савременим градовима довели су до трајно повишених концентрација атмосферских полутаната, посебно суспендованих честица $\text{PM}_{2.5}$ и PM_{10} и азотних оксида (NO_x). Према подацима Светске здравствене организације, више од 90% урбаног становништва изложено је концентрацијама загађујућих материја које превазилазе препоручене здравствене границе [1]. Поред примарних извора емисије, као што су саобраћај и индустрија, геометрија градске изграђености значајно утиче на дисперзију полутаната. Однос висине и ширине улица, густина објеката и ограничено струјање ваздуха условљавају појаву такозваног *street canyon* ефекта, при коме се загађење задржава у приземним слојевима атмосфере, управо у зони човековог боравка [2].

У таквом контексту, физичка структура града постаје активан фактор у обликовању квалитета ваздуха, што проблем загађења позиционира не само као еколошки, већ и као архитектонски проблем. Савремена архитектура све чешће третира фасаду као активни систем, а не искључиво као заштитни омотач. Развој параметарског дизајна и напредних материјала омогућио је интеграцију фотокаталитичких премаза на бази титанијум-диоксида (TiO_2), који под дејством ултраљубичастог зрачења разграђују NO_x и органске полутанте [3].

Ефикасност фотокаталитичких фасада у великој мери зависи од геометрије површине. Глатке фасаде имају ограничену активну површину и слаб контакт са струјама ваздуха, што фотокаталитички ефекат своди на танак гранични слој. Насупрот томе, порозне и тродимензионално развијене структуре могу повећати изложену активну површину, продужити време задржавања ваздуха у реактивној зони и увести локалне микротурбуленције које унапређују размену гасова.

Циљ овог рада је формулисање и примена квантитативне методе за поређење различитих фасадних морфологија са истим TiO_2 премазом, како

би се проценио њихов потенцијал као активних фотокаталитичких фасада. Истраживање упоређује равну фасадну плочу и три гироидне TPMS структуре различитог степена порозности кроз анализу укупне изложене површине, пројекционе отворености и комбинованог индекса ИЕПО.

2. АКТИВНЕ ФАСАДЕ У УРБАНОМ КОНТЕКСТУ

Проблем урбаног загађења није искључиво последица количине емисије, већ и морфологије самог града. У густо изграђеним срединама, класичне урбанистичке мере често нису довољне за локално побољшање квалитета ваздуха. Због тога се развијају деконцентрисани приступи у којима појединачне зграде постају активни учесници у микроклиматским процесима.

Фасада, као највећа изложена површина објекта, представља логично место за интеграцију система који могу утицати на локалну чистоћу ваздуха, осветљеност и температуру површине. Активне фасаде могу се класификовати према доминантном механизму деловања на биолошке, физичке и хемијске системе. Међу њима, фотокаталитичке фасаде се издвајају јер делују пасивно, без додатне потрошње енергије, и омогућавају релативно једноставно одржавање [4].

3. ФОТОКАТАЛИТИЧКЕ ФАСАДЕ И УЛОГА TiO_2 ПРЕМАЗА

Фотокаталитичке фасаде заснивају се на примени активних премаза на бази титанијум-диоксида (TiO_2), полупроводничког материјала који под дејством ултраљубичастог зрачења активира редукционо–оксидационе реакције. Током овог процеса долази до разградње азотних оксида (NO_x), испарљивих органских једињења (VOC) и органских нечистоћа у

мање штетна једињења, која се са површине уклањају атмосферским утицајима.

Поред фотокаталитичког дејства, TiO_2 премази показују и изражену хидрофилност, што омогућава самочишћење ефекат фасаде и смањује потребу за одржавањем. Међутим, ефикасност овог процеса ограничена је на веома узак гранични слој ваздуха у непосредној близини површине, због чега геометрија фасаде игра кључну улогу у укупном учинку.

4. САВРЕМЕНИ ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ АКТИВНИХ ФАСАДА

У циљу позиционирања истраживања у реалан архитектонски контекст, анализирани су одабрани примери примене активних фасада у пракси, који илуструју различите приступе утицају фасадног омотача на микроклиматске услове и квалитет ваздуха. Пример зелене фасаде приказан је на Слици 1, где објекат One Central Park у Сиднеју демонстрира биолошки приступ побољшању микроклиме кроз густу вегетацију интегрисану у фасадни систем. Биљни омотач делује као природни филтер за честице и CO_2 , истовремено доприносећи термалној регулацији и побољшању локалних микроклиматских услова.

Пример адаптивне фасаде са контролисаном порозношћу приказан је на Слици 2, где Al Bahr Towers у Абу Дабију користе динамичку фасадну мембрану која мења степен отворености у зависности од соларног зрачења. Овај систем омогућава контролу осунчаности, вентилације и топлотног оптерећења, показујући како морфологија фасаде може активно утицати на услове околине.

Ови примери илуструју различите стратегије активирања фасадног омотача и указују на значај морфологије у регулисању микроклиматских услова, представљајући релевантну референтну основу за даљу анализу параметарски дефинисаних порозних фасадних структура у овом раду.



Слика 1. One Central Park, Сиднеј – пример зелене фасаде са биолошким утицајем на микроклиму [5]



Слика 2. Al Bahr Towers, Абу Даби – пример адаптивне фасаде са контролисаном порозношћу и вентилацијом [6]

5. ПАРАМЕТАРСКИ ПРИСТУП И ИЗБОР МОРФОЛОГИЈЕ

За потребе овог истраживања примењен је параметарски приступ који омогућава систематско и контролисано варирање фасадне морфологије. Основни параметар је порозност, дефинисана као однос празне и пуне запремине фасадног модула, док су остали геометријски параметри задржани константним ради изолације њеног утицаја.

Као морфолошка основа изабране су троструко периодичне минималне површине (TPMS), са посебним фокусом на гироидну геометрију. Гироид омогућава континуалну унутрашњу структуру, висок однос површине и запремине и стабилну параметарску контролу, што га чини погодним за примену фотокаталитичких премаза.

6. МЕТОДОЛОГИЈА И МЕТРИКЕ (А–О–ИЕПО)

Моделовање и анализа изведени су у Rhino 8 / Grasshopper окружењу. Генерисане су четири фасадне варијанте истих габарита (2,0 × 2,0 × 0,2 m): равна фасадна плоча (V1) као референтна варијанта и три гироидне структуре различитог степена порозности (V2–V4). Фреквенција ТПМП структуре задржана је

константном, док је степен порозности контролисан променом *IsoValue* параметра.

Укупна изложена површина (А) израчуната је коришћењем Grasshopper компоненте *Mesh Area* и представља потенцијалну фотокаталитички активну зону. Пројекциона отвореност (О) дефинисана је као однос броја зракова који пролазе кроз фасадни панел без судара са геометријом и укупног броја емитованих зракова, применом *MeshRay* теста.

Комбиновани индекс ефективне површине и отворености (ИЕПО) дефинисан је као:

$$\text{ИЕПО} = A_{\text{површина}} \times \left(\frac{A_{\text{прој. отворено}}}{A_{\text{прој. бруто}}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

где је $\alpha = 0,5$, усвојен као неутрални пондер који балансира утицај активне површине и пропусности. Ради упоредивости, вредности изложене површине нормализоване су у односу на референтну варијанту V1.

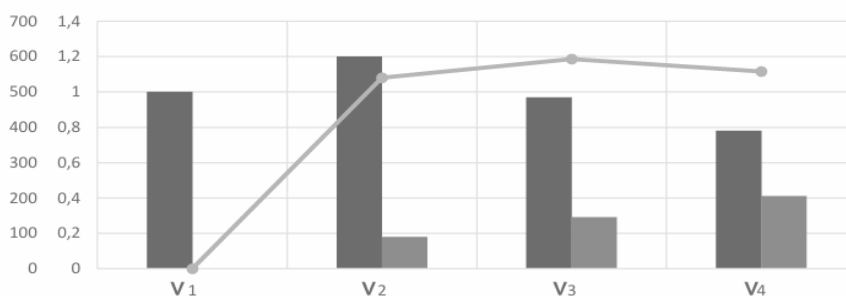
7. РЕЗУЛТАТИ

Резултати мерења показују да гироидна варијанта са средњом порозношћу постиже највишу вредност индекса ИЕПО, што указује на најповољнији однос између активне површине и пропусности.

Табела 1. Резултати мерења

Варијанта	Опис	А (m ²)	О (0–1)	ИЕПО (m ²)	А_норм (V1 = 1.00)
V1	Равна фасада (референца)	11,20	0,00	0,00	1.00
V2	Гироид, мала порозност	12,55	0,18	540,47	1,12
V3	Гироид, средња порозност	10,88	0,29	592,57	0,97
V4	Гироид, велика порозност	87,46	0,41	558,31	0,78

Компаративни приказ параметара А_норм, О и ИЕПО за варијанте V1–V4



Слика 3 Дијаграм односа А, О и ИЕПО за варијанте V1–V4

АРХИТЕКТОНСКА ИНТЕРПРЕТАЦИЈА РЕЗУЛТАТА

Добијени резултати указују да максимална порозност не доводи нужно до највећег фотокаталитичког потенцијала. Оптимални резултати постижу се код средње порозних структура, које обезбеђују уравнотежен однос између развијене активне површине, протока ваздуха и конструктивне рационалности.

8. ОГРАНИЧЕЊА ИСТРАЖИВАЊА

Предложена метода заснива се искључиво на геометријским индикаторима и не обухвата CFD симулације реалних струјања, фотокинетичке моделе реакција TiO_2 премаза, нити дугорочну деградацију материјала у стварним условима експлоатације. Резултати стога представљају алат за ранофазно пројектантско одлучивање, а не директну процену апсолутног смањења загађења.

9. ЗАКЉУЧАК

Истраживање показује да гироидна фасада са средњом порозношћу представља оптимално решење са аспекта фотокаталитичке ефикасности, конструктивне стабилности и архитектонског квалитета. Метод А–О–ИЕПО омогућава архитекти да у раној фази пројектовања донесе мерљиве и аргументоване одлуке, повезујући морфологију фасаде са њеним перформансама у урбаном контексту.

10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] World Health Organization, *Air Quality Guidelines*, WHO Press, 2021.
- [2] S. Vardoulakis et al., “Modelling air quality in street canyons,” *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 155–182, 2003.
- [3] A. Fujishima and K. Honda, “Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode,” *Nature*, vol. 238, pp. 37–38, 1972.
- [4] A. Fujishima, X. Zhang, and D. Tryk, “ TiO_2 photocatalysis and related surface phenomena,” *Surface Science Reports*, vol. 63, pp. 515–582, 2008.
- [5] <https://architizer.com/projects/al-bahr-towers/>
- [6] <https://thursd.com/articles/vertical-gardens-skyscrapers-sustainable-living>

Кратка биографија:



Анастасја Мандић рођена је у Новом Саду 1999. год.

Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Архитектуре и урбанизма– Ентеријер објекта мешовите намене- фабрика чоколаде са ботаничком баштом одбранила је 2023.год.

Контакт:

tasamandic.am@gmail.com