Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.311.243
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35UI03Cvijic

Поређење софтверских решења за анализу носеће конструкције фотонапонских електрана

Comparison of Software Solutions for the Analysis of Photovoltaic Power Plant Support Structures

Марија Цвијић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм: ЧИСТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кратак садржај – *Соларни системи су технички системи који користе енергију Сунчевог зрачења и претварају је у користан облик енергије, најчешће електричну или топлотну енергију.*
Лоше пројектована или неадекватно изведена носећа конструкција соларних система често представља један од кључних разлога због којих соларни системи нису искоришћени на оптималан начин и због чега се јављају различите техничке и енергетске неефикасности.
У овом раду софтвери K2 Base и ESDEC Calculator коришћени су као инжењерски алати за проверу и димензионисање носеће конструкције фотонапонског система, са посебним освртом на прорачун стабилности конструкције са бетонским стопицама (баластима) на равним крововима.

Кључне речи: *Соларни системи, K2 Base, ESDEC, статика, носећа конструкција.*

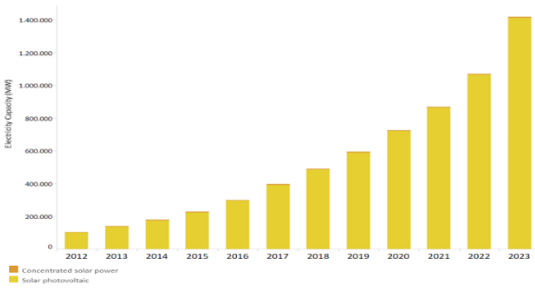
Abstract – *Solar systems are technical systems that utilize solar radiation energy and convert it into a useful form of energy, most commonly electrical or thermal energy. Inadequately designed or improperly executed supporting structures for solar systems are often a primary factor limiting the optimal performance of these systems, leading to various technical and energy inefficiencies. In this work, the K2 Base and ESDEC Calculator software were used as engineering tools for the verification and dimensioning of the supporting structure of a photovoltaic system, with particular focus on the calculation of the stability of ballast-mounted systems on flat roofs.*

Keywords: *Solar systems, supporting structure, K2 Base, ESDEC, statics.*

НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из мастер рада чији ментор је био др Бане Попадић

1. УВОД

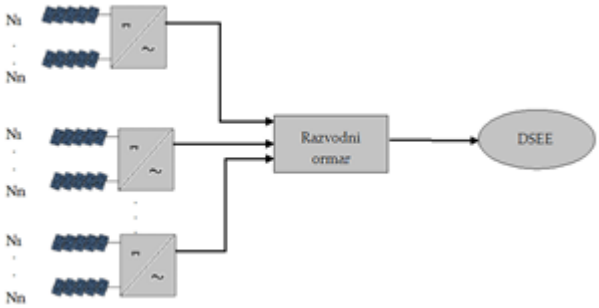
Соларна енергија је једна од најбрже растућих технологија у последње време. Са развојем технологије дошло је и до пада цена опреме за фотонапонске системе, а самим тим интересовање за ову врсту обновљивог извора расте.



Слика 1. График пораста употребе солара као обновљивог извора енергије

Соларна енергија се све више препознаје као један од кључних фактора одрживог развоја и преласка ка нискоугљеничној економији [1] [2].

Основни елементи једног фотонапонског система су: фотонапонски панели, носећа конструкција, инвертор, DC (eng. direct current) разводна опрема, AC (eng. alternating current) разводна опрема, средњенапонско постројење, прикључење на дистрибутивну енергетску мрежу. На слици 2. дат је приказ фотонапонског система:



Слика 2. Блок дијаграм фотонапонског система

2. ПОДЕЛА ФОТОНАПОНСКИХ СИСТЕМА С ОБЗИРОМ НА НОСЕЋУ КОНСТРУКЦИЈУ

Носећа конструкција фотонапонског система представља кључни механички елемент који обезбеђује стабилност, дуготрајност и правилно позиционирање фотонапонских модула у односу на дејство спољашњих утицаја. На слици 3. је приказана подела фотонапонских система у зависности од конструкције:



Слика 3. Блок дијаграм поделе фотонапонских сиистема

У зависности од места уградње и начина ослањања, носеће конструкције фотонапонских система могу се поделити на конструкције за кровне системе и конструкције за тло.

Носећа конструкција фотонапонских система на тлу може бити са фиксним нагибним углом - фиксни системи и промењљивим нагибним углом - ротациони системи. Код фиксне носеће конструкције соларни панели су постављени под унапред дефинисаним углом и оријентацијом, без могућности праћења кретања Сунца током дана или године [3]. Ови системи могу бити:

- Фиксни соларни системи са оптималним положајем (положај се никад не мења)

Фиксни соларни системи са више положаја (периодично, ручно премештање соларни панела)

У зависности од начина кретања, ротациони системи се деле на једноосне и двоосне системе. Једноосни пратећи системи омогућавају ротацију панела око једне осе, најчешће у правцу исток–запад или север–југ, чиме се прати дневно кретање Сунца. Двоосни системи, поред дневног кретања, прате и сезонске промене положаја Сунца.

Кровни фотонапонски системи могу бити:

- Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) - соларни системи интегрисани у објекат
- Roof-mounted (BAPV) - системи постављени на кров

BIPV системи представљају соларне панеле који се директно интегришу у конструкцију зграде, тако да постају део крова, фасаде или других делова објекта.

BAPV системи подразумевају соларне панеле који се постављају на постојећи кров, обично на металну или дрвену носећу конструкцију.

У оквиру кровних система посебно се издвајају конструкције за косе кровове (прате нагиб крова) и конструкције за равне кровове (обично исток-запад орјентација), при чему баластирани системи имају значајну примену код равних кровова. Равни кровови захтевају специфичан приступ пројектовању носећих конструкција услед повећаног утицаја ветра и ограничене носивости кровне плоче. У пракси се примењују два основна концепта: механички фиксирани системи и баластирани системи, при чему баластиране конструкције имају доминантну примену.

Механички фиксирани соларни системи на равним крововима ослањају се на чврсту носећу конструкцију, а причвршћују се помоћу монтажних вијака и стезних елемената директно за носиву подлогу крова.

Баластиране носеће конструкције представљају систем у којем се стабилност фотонапонских модула обезбеђује сопственом тежином конструкције и додатним баластом, најчешће у виду бетонских блокова. Основна карактеристика овог типа система је да се конструкција не причвршћује директно за кровну подлогу, чиме се избегава пробијање хидроизолационог слоја крова. Овај тип карактерише добра стабилност [4].



Слика 4. Носећа конструкција са баластима [4]

3. СОФТВЕРСКА РЕШЕЊА ЗА АНАЛИЗУ НОСЕЋЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

У савременом пројектовању соларних система, софтверска решења за монтажне конструкције имају значајну улогу у обезбеђивању тачног и поузданог прорачуна носеће подструктуре.
Два значајна произвођача монтажних решења на међународном тржишту су K2 Systems и ESDEC, који нуде иновативне системе за фиксирање соларних панела како на косим тако и на равним крововима
K2 Systems и Esdec димензионишу носећи систем соларне електране (баласт, размаке, висине) за задате услове крова. Ово укључује стална оптерећења (сопствена тежина соларних панела, носача и причвршћивача), али и променљива оптерећења узрокована ветром, снегом, температурним променама и земљотресима или механичким утицајима на отвореним инсталацијама [5] [6].

3.1. СОФТВЕР K2 SYSTEMS

Статички прорачун у K2 Systems софтверу заснива се на улазним подацима који се односе на локацију објекта, карактеристике крова и параметре самог система. У прорачуну се узимају у обзир сопствена тежина система, оптерећење ветром и оптерећење снегом. За сваку од зона крова посебно се рачуна узгон ветра, потребна количина баласта да не дође до подизања система, као и провера клизања и превртања. Резултат прорачуна је извештај који садржи податке о потребном баласту и оптерећењу крова. Баласт је приказан по модулу или по редовима и разликује се у зависности од зоне крова. У извештају се даље приказује површинско оптерећење крова изражено у килограмима по квадратном метру. Поред тога, приказује се и максимално површинско оптерећење, које представља највеће локално оптерећење на крову [5].

3.2. СОФТВЕР ESDEC

Статички прорачун у Esdec софтверу заснива се на улазним подацима који се односе на локацију објекта, карактеристике крова и параметре самог фотонапонског система. Esdec пружа и детаљне податке о локалним и тачкастим оптерећењима. Прорачун у Esdec софтверу обухвата сопствену тежину система, дејство ветра и оптерећење снегом. Esdec за сваку од зона крова посебно рачуна узгон ветра, потребан баласт да не дође до подизања система, као и проверу клизања. Разматра се стално оптерећење, променљиво оптерећење од снега, док се ветар посматра као критична провера стабилности система. У извештају се приказују различите врсте површинских оптерећења, укључујући просечно оптерећење преко целе површине крова, просечно оптерећење преко површине на којој је систем постављен и максимално оптерећење на површини испод једног панела. Esdec, за разлику од K2 Systems, рачуна и тачкаста оптерећења. Максимално статичко тачкасто оптерећење (енг. Max static point load) представља највећу силу која делује у једној тачки ослонца система. Поред статичког, приказује се и максимално динамичко тачкасто оптерећење (енг. Max dynamic load). Ово оптерећење односи се на фазу монтаже и одржавања система и укључује ходање монтажера, померање баласта и привремена концентрисана дејства [5].

4. УПОРЕДНА АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА СОФТВЕРА K2 SYSTEMS И ESDEC

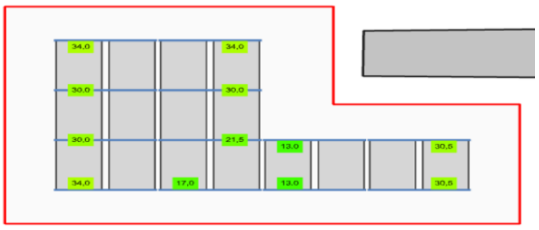
Приликом анализе резултата добијених употребом софтверских алата K2 Base (K2 Systems) и Esdec Calculator уочавају се одређене разлике у количини потребног баласта, расподели оптерећења, као и у примењеним сигурносним маргинама. Софтвери користе Еврокод стандарде. Еврокод (Eurocode) представља јединствени систем европских стандарда који дефинише принципе прорачуна оптерећења и димензионисања носећих елемената грађевинских конструкција.

Посебно важан део за пројектовање кровних фотонапонских система, а нарочито баластираних конструкција, јесте стандард EN 1991-1-4, који се односи на оптерећење ветром. Овај стандард дефинише начин одређивања дејства ветра на кровове, фасаде и друге делове објеката, узимајући у обзир утицај локалних климатских услова и геометрију објекта. Исти нормативни приступ користе и ESDEC и K2, при чему се разлике између ових алата јављају у начину приказа и интерпретације резултата. Кључна разлика између ова два приступа огледа се у моделовању баласта. ESDEC баласт посматра као дискретне, стандардизоване јединице са унапред дефинисаном масом и геометријом. На основу прорачунатих сила, софтвер аутоматски одређује тачан број баластних елемената и њихов распоред по крову, уз посебно наглашавање критичних зона као што су ивице и углови крова, као и положаји у близини стабилизатора конструкције. Са друге стране, K2 баласт третира као укупну потребну масу која је неопходна да би се савладао узгон ветра и задовољили сигурносни захтеви дефинисани Еврокодом. Резултат прорачуна се најчешће приказује као потребна маса баласта по јединици површине, при чему је акценат стављен на најнеповољнију зону крова. Овај приступ даје пројектанту теоријску основу за проверу стабилности, али не врши аутоматску трансформацију у конкретан број и распоред баластних елемената.

K2 Base користи инжењерски оријентисан приступ који је снажно повезан са аналитичким моделима дефинисаним у Еврокод стандардима, пре свега EN 1991 (дејства на конструкције) и EN 1990 (основе пројектовања конструкција). Прорачун се заснива на: подели крова на зоне, аналитичком одређивању притисака и усисних сила ветра, равномерној или зонаски дефинисаној расподели баласта, класичним статичким равнотежним условима.

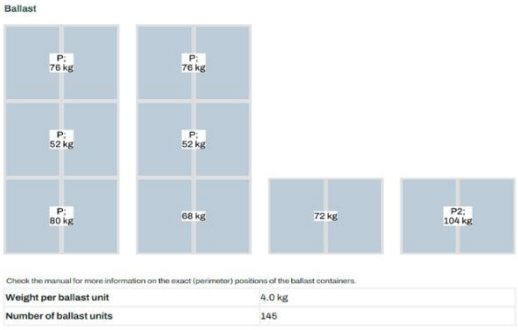
Esdec Calculator користи комбинацију аналитичких прорачуна и експериментално добијених података, пре свега из аеродинамичких испитивања у аеротунелу. Овај софтвер узима у обзир: реалне аеродинамичке коефицијенте добијене испитивањем конкретних система, неравномерну расподелу сила услед турбуленције ветра, интеракцију између редова модула, ефекте локалних појачања усисних сила. Захваљујући оваквом приступу, Esdec Calculator често даје прецизније, али и специфичније резултате који су директно везани за тестирани систем.

На сликама 5. и 6. се виде резултати из софтвера по питању количине баласта. Са слика се види да ESDEC даје доста више баласта од K2 Systems јер посмара систем у реалнијим условима. K2 Systems предвиђа тежину баласта од 13 до 34 kg/m^2, док ESDEC предвиђа тежину баласта од 52 до 104 kg, што је значајна разлика. K2 Systems рачуна тежину баласта по m^2, а ESDEC рачуна тежину по модулу те одређује прецизније колико баласта треба.



Слика 5. Количина баласта из софтвера K2 Systems

Угаоне и ивичне зоне крова изложене су значајно већим усисним силама ветра услед појаве вртлога и локалних аеродинамичких појачања, те захтевају већу количину баласта у односу на унутрашње делове система. Додатни фактор који утиче на расподелу баласта јесте интеракција између редова фотонапонских модула. Предњи редови система често су изложени већим аеродинамичким оптерећењима, док задњи редови могу бити делимично заштићени.



Слика 6. Количина баласта из софтвера ESDEC

Начин расподеле баласта може утицати на гранична стања превртања и клизања. Коефицијент трења између конструкције фотонапонског система и кровне подлоге представља један од кључних параметара у прорачуну отпорности система на клизање. K2 Systems узима коефицијент трења 0,6, док ESDEC узима 0,7.

Аеродинамички коефицијент спољашњег притиска c_{pe} (EN 1991-1-4) је највећа разлика, иако оба софтвера користе Еврокод. Типичне вредности из Еврокода за равне кровове:

- Централна зона крова: $c_{pe} \approx -0,7$
- Ивичне зоне: $c_{pe} \approx -1,2$
- Угаоне зоне: $c_{pe} \approx -1,5$ до $-1,8$

K2 Systems користи ове вредности. ESDEC у критичним зонама користи повећане ефективне коефицијенте, добијене из аеротунелских испитивања (Ивице: ефективно $\approx -1,6$; углови: ефективно $\approx -2,0$ до $-2,4$).Овакав приступ сам по себи може повећати силу узгона ветра 30–60 % у односу на K2.

За коефицијент експозиције ветра $c_e(z)$ K2 Systems узима номиналну вредност за дату висину објекта (нпр. $c_e \approx 1,0–1,2$), док ESDEC често примењује неповољнију вредност за ниске кровове изложене турбуленцији (ефективно $c_e \approx 1,2–1,4$).

Када је реч о сигурносним коефицијентима (γ) K2 узима вредности директно из стандарда за целокупан систем, а ESDEC их у појединим локалним проверама примењује на нивоу појединачног модула / тачке ослонца. Коефицијент унутрашњег притиска c_{pi} K2 Systems често занемарује или узима $c_{pi} = 0$. Међутим, ESDEC у неким конфигурацијама узима $c_{pi} = +0,2$.

Дакле, разлике у количини баласта између K2 Systems и ESDEC проистичу и из различитог приступа моделовању аеродинамичких утицаја ветра, начина провере граничних стања стабилности, као и нивоа детаљности у анализи локалних и тачкастих оптерећења и различитих коефицијената при чему ESDEC примењује реалнији инжењерски приступ.

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду извршено је детаљно поређење софтверских алата компанија K2 Systems и ESDEC, са посебним освртом на начин на који се спроводи статички прорачун и одређивање баластних оптерећења код равних кровних соларних система.

K2 Base тежи оптимизацији баласта кроз геометрију распореда и конструктивна решења, док Esdec Calculator у већој мери узима у обзир аеродинамичке ефекте као што су подизање и турбуленције између редова, на основу лабораторијски верификованих података. K2 Systems даје у прорачуну 30-40% мање баласта у односу на ESDEC. Резултати потврђују да софтверски алати за пројектовање соларних система морају бити коришћени у складу са системом за који су развијени, уз пуно разумевање њихових прорачунских основа и ограничења, како би се обезбедила конструкцијска безбедност и техничка оправданост пројектованог решења.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Н.-С. Б. Г.-У. Б. Гвозденац Душан, Обновљиви извори енергије, Нови Сад: Факултет Техничких Наука, 2011.

[2] И. К. В. Ф. Владимир Катић, Обновљиви извори електричне енергије, Нови Сад: ФТН, 2007.

[3] К. Д., Обновљиви извори енергије, Београд: Машински факултет, Универзитет у Београду, 2016.

[4] „Принцип рада соларне електране,“ Соларни панели - Србија. [На мрежи]. Available: https://solarnipaneli-srbija.rs/kategorija/solarne-elektrane/princip-rada-solarne-elektrane/. [Последњи приступ 2. 7. 2024.].

[5] E. B.V., „ESDEC Calculator – Упутство за пројектовање баластираних фотонапонских система,“ 2023..

[6] K. S. GmbH, „K2 Base – Упутство за прорачун и пројектовање носећих конструкција,“ 2023.

[7] M. a. з. о. е. (IRENA), „Будућност соларне енергије,“ IRENA, Абу Даби, 2020.

Кратка биографија:

Маријана Цвијић рођена је у Теслићу 1999. године. Дипломирала је на Факултету техничких наука у Новом Саду, на смеру Чисте енергетске технологије, 2024.године. Мастер рад из области Чистих енергетских технологија – „Поређење софтверских решења за анализу носеће конструкције фотонапонских електрана“, одбранила је 2026. године.

Контакт: marijanac84@gmail.com