

PRIMERJAVA IZRAČUNA SENČENJA SONČNE ELEKTRARNE Z MERITVAMI

Dejan ŽELEZNIK, Sebastijan SEME, Primož TRUČL, Jože VORŠIČ

POVZETEK

Izkoriščanje sonca je v zadnjem času vedno bolj pogosto. Sonce, večni jedrski reaktor, je praktično neizčrpen vir obnovljive energije. Čist vir, ki nam lahko zagotovi pomemben del energije za naše potrebe. Zato mora biti cilj izkoriščati to energijo v največjem možnem obsegu, predvsem je treba izkoristiti strehe že zgrajenih objektov. Objektov, na katerih je možno postaviti sončno elektrarno je veliko, vendar niso vsi primerni. Niso redki primeri, ko določene lokacije zaradi ovir sploh ne sprejemajo sončnega sevanja tudi po več jesenskih oz. zimskih mesecev ali pa je trajanje sončnega sevanja močno skrajšano. Količina sončne energije je odvisna tudi od letnega časa in lokacije.

V prispevku je predstavljeno načrtovanje sončne elektrarne ter pasti na katere moramo biti pri tem pozorni. Senčenje je prisotno skoraj povsod, bodisi so to individualni objekti, ali pa samo travnate površine, kjer nam senčenje lahko povzroča sam horizont ali okoliške ovire, npr. drevesa. Vpliv senčenja je potrebno še posebej upoštevati na lokacijah, kjer imamo strnjene objekte enega ob drugem – v mestih.

V članku je prikazana simulacija senčenja za določene lege strehe objekta, ki se nahaja v strnjenem naselju (mestu), ter narejena primerjava med matematičnim izračunom senčenja in elektronsko meritvijo senčenja na strehi objekta.

ABSTRACT

Harnessing the Sun has lately become increasingly frequent. The Sun, the eternal nuclear reactor, is practically an inexhaustible source of energy. It is clear source, which can assure us an important part of energy for our needs. Therefore the goal has to be to harness this energy to the maximal possible extent; especially we have to use the roofs of already constructed buildings. There are many objects, on which we could build a solar power plant, but not all of them are suitable. There are numerous cases where certain locations do not receive solar radiation due to obstacles, even after more autumn or winter months all the duration of the solar radiation is significantly reduced. The amount of solar energy therefore depends on the season and location.

This paper presents the design of solar power plants and pitfalls which should be considered in planning. Shading is present almost everywhere, whether they are individual objects or just grassland where shading may cause horizon himself or surrounding obstacles, for example, trees. The impact of shading, it is necessary carefully to be considered in locations where there are grouped objects side by side – in the cities.

The article presents a simulation of shading for certain position of roof of a building, which is located in the agglomeration (city). It is made a comparison between the mathematical calculation of shading and electronic shading measurement on the roof of the building.

1. UVOD

Še pred desetletjem se je le govorilo o obnovljivih virih energije in učinkoviti rabi energije, danes pa se takšno izkoriščanje in ravnanje z energijo zdi prava rešitev za energetske in okoljske krize. Cene nafte in zemeljskega plina naraščajo, pri tem pa so njune zaloge omejene. Slovenija neobnovljivih virov, kot sta nafta in zemeljski plin, praktično nima, oziroma si ne more ustvariti zadostne zaloge za brezskrbno prihodnost.

Na tem mestu ne moremo mimo komentarja, ki ga lahko vsakodnevno srečujemo: »Če ljudje ne znamo biti racionalni, bodo viri energije naredili selekcijo – preživeli bodo tisti, ki bodo znali uporabljati obnovljive vire.« Morda ostro, a s poudarkom na pravem mestu – obnovljivi viri energije so prava izbira za čistejšo in energetske boljše prihodnost.

Sonce je trajen in ekološko najčistejši vir energije, njegovo izkoriščanje nam ohranja okolje čisto. Na področju tehnologije se je nedolgo nazaj iz laboratorijskega nivoja na množični industrijski nivo razširila nova vrsta tehnologije, imenovana fotovoltaika.

Namestitev sončnih modulov se je tokom časa razširila na vse možne objekte, kakor tudi na tla. Možnost postavitve sončnih modulov je omejena iz strani primerne lokacije (osončenost lokacije čez dan), površine, vrste objektov (statična primernost objekta) in zanimanje posameznika oziroma družbe za to vrsto investicije.

Za postavitev sončne elektrarne pa ne potrebujemo nujno strešne površine, saj jo lahko postavimo tudi na primerno zemljišče. Tako lahko odlično izkoristimo degradirane površine, ki sicer ne bi bile v uporabi, saj lahko s primernim naklonom podkonstrukcije zagotovimo optimalno usmeritev sončne elektrarne.

Pri vseh naštetih namestitvah sončnih modulov pa velja eno dejstvo, da si je lokacijo, kjer bodo sončni moduli nameščeni, potrebno predhodno natančno ogledati. Natančen ogled kraja in zabeleženje vseh dejavnikov, ki vplivajo na namestitev in pozneje delovanje sončne elektrarne, sta zagotovilo, da bo elektrarna delovala z največjim možnim energijskim izplenom¹. Tako je osnovna naloga ugotoviti, ali je predvidena lokacija za namestitev sploh primerna, pri čemer upoštevamo usmeritev objekta, okoliško rastje in druge izvore senc. Izvori senc so umetni in naravni. Med umetne vire spadajo okoliški objekti, drogovi,..., medtem ko med naravne vire prištevamo obliko horizonta, hribe, vzpetine, ki tako ali drugače vplivajo na dobiček sončnih modulov. Pri različnih postavitvah sončnih modulov se nam torej pojavljajo različne sence, katerim se, če je le moč, skušamo izogniti.

Obravnavali bomo primernost postavitve sončne elektrarne na strehi Laboratorija za energetiko Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (FERI) in določili vplive senc pri sami postavitvi sončnih modulov z uporabo programskega orodja Sketchup.

¹ Za energijski izplen sončne elektrarne oziroma pridobljeno energijo večkrat uporabljamo izraz solarni dobitki (angleški izraz = solar gain, solar yield)

Rezultate simulacije bomo preverili z pomočjo meritev osenčenja z merilnim instrumentom Solmetric Suneye 210. Inštrument omogoča izdelavo kompleksne analize senčenja in sončnega obsevanja, kar je osnova za načrtovanje optimalne postavitve sončnih modulov za maksimiranje načrtovane proizvodnje električne energije. Dobljene meritve bomo kasneje primerjali z matematičnim izračunom senčenja. Pri tem bomo ovrednotili izmerjene in izračunane vrednosti.

2. NAČRTOVANJE IN POSTAVITEV SONČNE ELEKTRARNE

Ko se odločamo za postavitev sončne elektrarne, je pomembno, da z izbiro ustrezne lokacije izkoristimo čim daljši čas osenčenja. Osončenost in posledično produktivnost sončne elektrarne je tako odvisna od območja na katerem se sončna elektrarna nahaja (različna območja v Sloveniji imajo različno intenziteto osončenosti) in njene usmerjenosti.

Pri izbiri lokacije in vrednotenju donosnosti fotonapetostnega sistema je potrebno analizirati naslednje dejavnike:

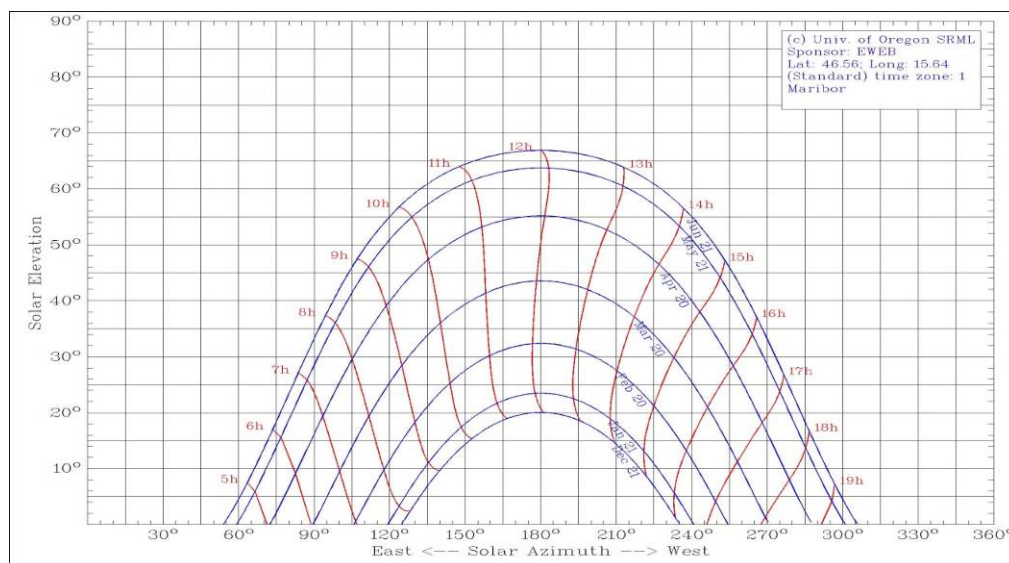
- razpoložljivo površino
- potencialno senčenje fotonapetostnega sistema
- potencial sončnega obsevanja lokacije
- pot sonca
- orientacijo sistema.

Ko predvidevamo in ocenjujemo končno moč celotnega sistema, smo najbolj omejeni s površino, ki jo imamo na razpolago za postavitev elektrarne. Pomemben podatek je tudi vrsta uporabljenih sončnih modulov in način namestitve. Pri tem si lahko pomagamo, da so orientacijske vrednosti za namestitev sončne elektrarne z močjo 1kW od 7 do 9 m² za polikristalne sončne module in od 16 do 20 m² za tankoplastne sončne module.

Potrebno je zagotoviti konstantno osončenje celotnega sistema, vsaj med 9. in 15. uro skozi vse leto, saj ravno v tem času posije na Zemljo 80% sončne energije.

Za določitev potenciala sončnega obsevanja primerne lokacije, nam podatki o povprečni energiji globalnega obsevanja (globalno obsevanje predstavlja vsoto direktnega in difuznega obsevanja) za obdobje 10 let (ki jih pridobimo pri ARSO), predstavlja osnovno izhodišče za odločitev o primernosti postavitve fotonapetostnega sistema na določeni lokaciji. Podatki ki jih pridobimo so zelo pomembni, saj je sončno obsevanje zelo različno in se spreminja iz kraja v kraj.

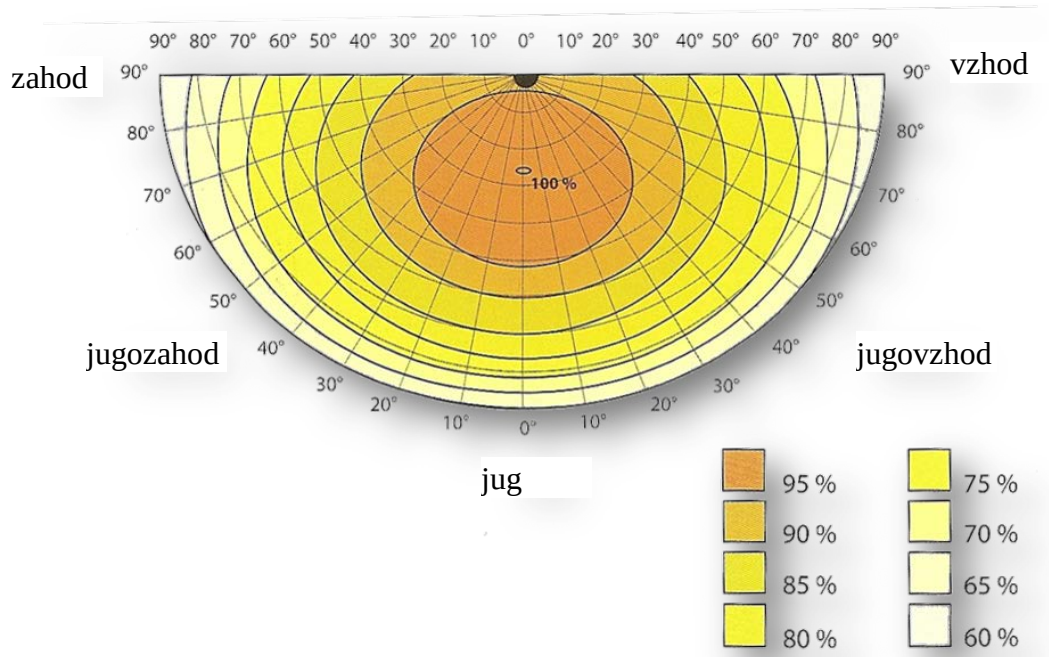
Pot sonca, slika 2.1, nam pokaže, kje se bo sonce nahajalo ob določeni uri v določenem dnevu. Podatki nam pomagajo predvsem pri tem, da lahko simuliramo sence na objektih, ki so v bližini sončne elektrarne.



Slika 2.1: Pot sonca skozi vse leto za kraj Maribor

Pot Sonca določimo s primerno programsko opremo. Ena izmed tovrstnih programskih oprem je Solar Tool 2.0. V program vnesemo geografske podatke določenega kraja (zemljepisna širina in dolžina ter nadmorska višina) nato program izriše graf za določeno lokacijo. Ta podatek uporabimo za simulacijo ali pa za hiter pogled na potencialne izvore senc [12].

Za boljši sončni dobitek (pridobljena energija) je pomembna tudi orientacija sončnih modulov (slika 2.2).



Slika 2.2: Odvisnost sončnega dobitka od usmerjenosti in lege [13]

Lahko bi rekli, da ima senčenje večji vpliv na sončni dobitek kot sama orientacija, vendar je pomemben podatek, da si lahko s slabo orientacijo sončni dobitek zmanjšamo tudi za 40 % ali več.

3. IZRAČUN SENČENJA

Za izračun senčenja za dani objekt, potrebujemo podatke o samem objektu, kot so lega objekta z zemljepisno širino in dolžino ter merami objekta. Prav tako potrebujemo geometrijske podatke okoliških objektov, drevja in drugih ovir, za katere predvidevamo, da nam predstavljajo oviro, oziroma senčenje glede na postavitev sončnih modulov, ki so glavni del sončne elektrarne.

Geometrijske podatke (višino, dolžino, razdaljo med ovirami, ter razporeditev objektov v prostoru) smo pridobili z meritvijo (elektronski laserski merilnik) objekta na samem terenu. Pri razporeditvi objektov in ovir v prostoru, smo si pomagali z digitalnim satelitskim posnetkom, katerega smo pridobili iz prosto dostopnega strežnika z geografskimi podatki in zemljevidi, ki ga ponuja podjetje Google v sklopu spletne strani - Google Maps..

Seveda pa poleg vseh potrebnih podatkov, ne moremo mimo dejstva, da je za sam izračun potrebno tudi poznavanje solarne geometrije. Preučiti smo morali osnove solarne geometrije in tako spoznati potrebne izraze, preko katerih smo dosegli želeni cilj, ter pomembne parametre, ki vplivajo oziroma nastopajo v samih izrazih.

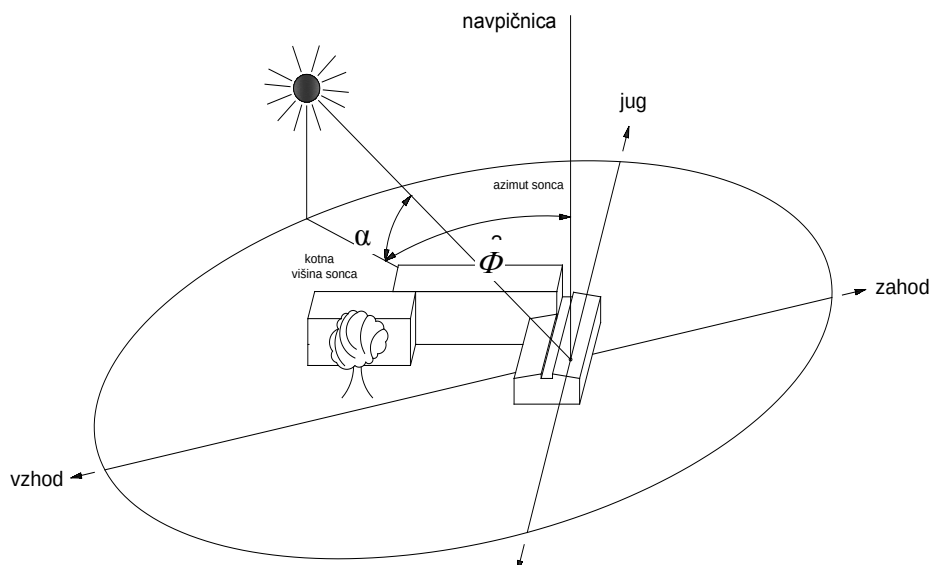
Namen izračuna, je ugotoviti, kakšna je natančnost merilnega instrumenta za analizo osončenosti in senčenja, oziroma, kako natančno se lahko z izračuni približamo izmerjenim vrednostim.

3.1 Osnove solarne geometrije

Parametri sončnega sevanja, ki ga prejemajo ploskve na Zemlji, so geometrijske funkcije Zemlje glede na Sonce. Osnovni geometrijski koti, ki opisujejo položaj točke na Zemlji glede na položaj Sonca so; zemljepisna širina, zemljepisna dolžina, deklinacija in urni kot. Iz njih izpeljane pa so: zenitni kot, višina sonca in azimut sonca.

Najpomembnejša parametra, ki opisujeta trenutni položaj Sonca, sta kotna višina sonca, α in azimut sonca, ϕ - prikazana na sliki 3.1.

Azimut sonca je kot med projekcijo sončnega žarka direktnega sevanja na vodoravno ravnino in navpično ravnino v smeri juga, ki ga določa izraz (3.1).



Slika 3.1: Kotna višina sonca in azimut sonca predstavljena na primeru opazovanega objekta Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Azimut sonca, ϕ

$$\Phi = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \cdot \sinh}{\cos \alpha}\right) \quad (3.1)$$

δ – deklinacija

h – urni kot

α – kotna višina sonca

Deklinacija, δ ($^{\circ}$)

$$\delta = 23,45 \sin\left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right] \quad (3.2)$$

n – zaporedni dan v letu

Urni kot, h ($^{\circ}$)

$$h = \pm 15^{\circ} \cdot (\text{število ur od / do sončnega poldneva}) \quad (3.3)$$

Kotna višina sonca, α ($^{\circ}$)

$$\alpha = \arcsin(\sin L \sin \delta + \cos L \cosh) \quad (3.4)$$

L – zemljepisna širina ($^{\circ}$)

δ – deklinacija ($^{\circ}$)

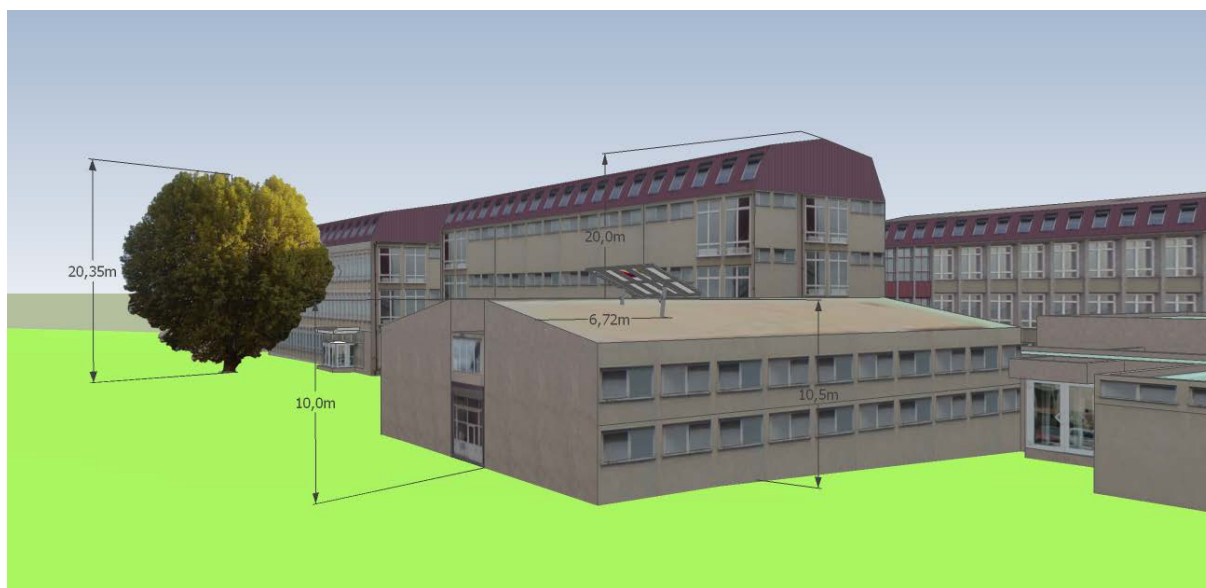
h – urni kot ($^{\circ}$)

3.2 Ovrednotenje vpliva senčenja

Viri senc so lahko zelo različni. Med naravne vire senc prištevamo obliko horizonta, naravne ovire, hribe, vzpetine, vegetacijo ipd. Umetni viri senc pa so sosednji objekti, nadstreški, dimniki, telefonski drogovi, drogovi za zastave, oblika strehe in podobno. Dolžino sence objekta je moč enostavno določiti pri enostavni geometriji senčila (objekta ki meče senco). Če objekt ni enakomerno visok oziroma je razgiban, moramo dolžino sence določiti za vsak različno visok del objekta. Dobljene dolžine senc, izračunane pri mejnih višinah posameznih elementov zgradbe, ki mečejo senco, nato povežemo in dobimo sliko sence za določeno uro dneva.

3.3 3-D model objekta v prostoru

Za boljšo ponazoritev objekta, kjer smo izvajali meritve senčenja, smo objekt predstavili v 3-D modelu, s pomočjo brezplačnega programa za risanje modelov imenovanega Google SketchUp.



Slika 3.2: Dimenzije objekta v 3D predstavitvi, kjer so se opravljale meritve

3.4 Izračun potrebne kotne višine sonca α_p v točki A (vrh drevesa)

Za ovrednotenje ali nam drevo v točki A predstavlja oviro, glede na našo želeno pozicijo namestitve sončnih modulov, razvidno s slike 3.2, moramo najprej vedeti, kje v prostoru se drevo nahaja. Poznati moramo azimut drevesa. Prav tako moramo poznati višino drevesa h_2 , oddaljenost drevesa in višino od tal h_1 .

V našem primeru zavzema azimut vrednost $\alpha_d = 98$ stopinj. Ta podatek potrebujemo, saj bomo računali vrednost kotne višine sonca ravno, ko sonce zavzame to vrednost. Sonce je ravno takrat vzporedno s položajem drevesa.

Azimut drevesa: $\alpha_d = 98^\circ$

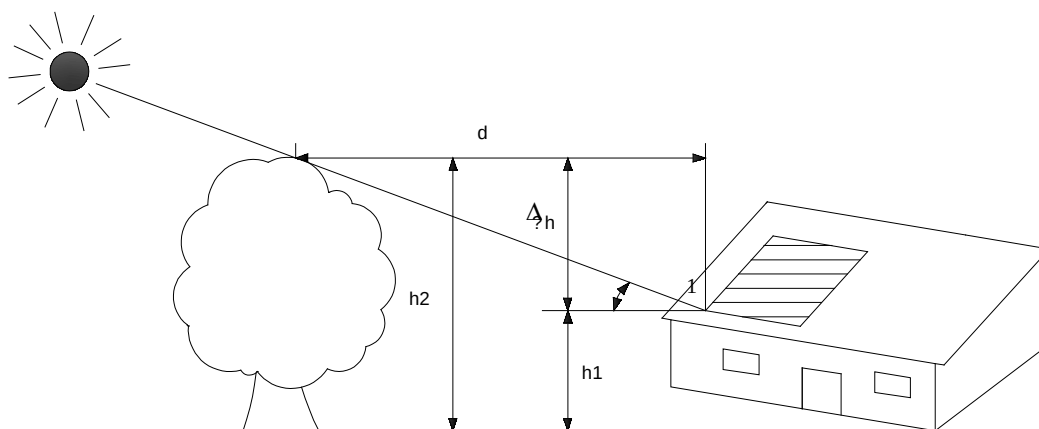
Višina drevesa v točki A: $h_2 = \text{cca. } 20 \text{ m}$

Oddaljenost drevesa od točke A do pozicije 1: $d = \text{cca. } 71 \text{ m}$

Višina pozicije 1: $h_1 = 10,5 \text{ m}$

S pomočjo teh podatkov lahko izračunamo potrebno kotno višino sonca (α_p), da nam drevo v točki A ne predstavlja več ovire. Sončni žarki dosežejo nameščene sončne module.

Položaj sence, glede na sončne module, nameščene na strehi, kot je prikazano na sliki 3.3, določimo s pomočjo (3.5), [1].



Slika 3.3: Parametri senčenja polja modulov, nameščenega na strehi

Računanje potrebne kotne višine sonca α_p :

$$\alpha_p = \arctg\left(\frac{h_2 - h_1}{d}\right) = \arctg\left(\frac{\Delta h}{d}\right) = \arctg\left(\frac{20 - 10,5}{71}\right) = 7,6^\circ \quad (3.5)$$

Vidimo, da je potrebna kotna višina sonca α_p , v azimutu 98° , cca. $\alpha_p = 7,6^\circ$

Ko smo izračunali potrebno kotno višino sonca za podane točke, se lotimo izračuna dejanske kotne višine sonca v izbranih točkah. Dejansko kotno višino sonca izračunamo za izbrane dneve v letu, ki nam glede na naše ovire (krošnja drevesa, streha sosednje stavbe), predstavljajo kritične dneve (čas, ko sonce ne doseže zadostne kotne višine).

Kritični dnevi; so dnevi v letu, ko sonce tekom dneva dosega nizko kotno višino sonca (najvišja dosežena kotna višina sonca od 20 do 30 stopinj) – zimski čas (november – april), razvidno s slike 2.1 in pa del poletnega časa, ko sonce vzhaja z azimutom nad 90° (september in oktober) in sicer le jutranje ure, saj se v tem času sonce nahaja vzporedno s platano pred stavbo in nam ta jutranji čas predstavlja oviro za možnost senčenja nameščenih sončnih modulov v poziciji 1.

3.5 Izračun dejanske kotne višine sonca α_d v točki A

Dejanska kotna višina sonca predstavlja višino sonca, ki jo sonce doseže ob določenem trenutku dneva ob pripadajoči vrednosti azimuta. Izračun je potreben, da ugotovimo ali je sonce doseglo potrebno kotno višino.

Izbrani kritični dan: 23. september – azimut ovire: $\alpha_o = 98^\circ$

Iz (3.4), je razvidno, da se nam pri izračunu kotne višine sonca, v našem primeru dejanske kotne višine α_d , pojavi deklinacija, ki se skozi leto spreminja in je odvisna od dneva v letu in je podana z (3.2).

Za 23. september je deklinacija podana z (3.6):

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (284 + 266)}{365} \right] = -1,008^\circ \quad (3.6)$$

V enačbi (3.1), prav tako nastopi spremenljivka h , ki predstavlja urni kot in je podana s (3.3).

V našem primeru izberemo uro 6:42, saj ob tem času, na ta dan, sonce doseže vrednost azimuta 98 stopinj, ki je enak vrednosti naše ovire v točki A (krošnja drevesa).

$$h = \pm 15^\circ \cdot (12 - 6,7) = -79,5^\circ \quad (3.7)$$

Sedaj, ko imamo izračunani urni kot, lahko izračunamo dejansko kotno višino sonca za ta dan, ob tej uri:

$$\begin{aligned} \alpha_d &= \arcsin(\sin L \sin \delta + \cos L \cos h) = \\ &= \arcsin(\sin 46,56 \sin -1,008 + \cos 46,56 \cos -79,5) = 6,5^\circ \end{aligned} \quad (3.8)$$

Ko imamo izračunano dejansko kotno višino sonca, se še dodatno prepričamo ali je vrednost azimuta sonca res enaka vrednosti azimuta ovire, $\alpha_o = 98$ stopinj. To je tudi pogoj za pravilno rešitev našega izračuna.

Za izračun uporabimo izraz (3.9):

$$\Phi = \arcsin \left(\frac{\cos \delta \sinh \alpha}{\cos \alpha} \right) = \arcsin \left(\frac{\cos -1,008 \cdot \sin -79,5}{\cos 6,5} \right) = 98^\circ \quad (3.9)$$

Po opravljenih izračunih, se izkaže, da sonce na ta dan ob tej uri ne doseže potrebne kotne višine $\alpha_p = 7,6$ stopinj, saj vidimo da je dejanska kotna višina sonca le $\alpha_d = 6,5$ stopinj. V tem primeru nezadostna kotna višina sonca, predstavlja senčenje s strani krošnje drevesa (točka A).

Da bi ugotovili, kako dolgo je prisotno senčenje, moramo opraviti več izračunov. To naredimo tako, da v samih enačbah spreminjamo časovno spremenljivko (urni kot). Pri spreminjanju le-tega, pa moramo upoštevati dejstvo, da se nam s spreminjanjem časovne spremenljivke spreminja tudi azimut sonca.

3.6 Izračun časa trajanja senčenja

Za določanje časa trajanja senčenja, spreminjamo časovno spremenljivko urni kot, h . Iz (3.5), za izračun potrebne kotne višine, sonca izpeljemo čas (urni kot). Pazimo na to, da izberemo pravilno potrebno kotno višino sonca, saj se nam s spreminjanjem časa, spreminja tudi azimut sonca. Prehajamo iz točke A v naslednjo poljubno izbrano točko (izberemo lahko poljubno število točk).

Računanje urnega kota, ko sonce doseže zadostno kotno višino:

$$h = \arccos\left(\frac{\sin \alpha_p + \sin L \cdot \sin \delta}{\cos L}\right) = \arccos\left(\frac{\sin 8 - \sin 46,56 \cdot \sin -1,0088}{\cos 46,56}\right) = 77^\circ \quad (3.10)$$

Iz tega sledi, da je čas, ko sonce doseže zadostno kotno višino:

$$t_1 = \frac{180^\circ - h}{15^\circ} = \frac{180^\circ - 77^\circ}{15^\circ} = 6,73 \text{ h}, \quad (3.11)$$

kar je 6 h in 52 min.

Čas trajanja senčenja je enak:

$$t_{sen} = t - t_1 = 6:52 - 6:42 = 10 \text{ min} \quad (3.12)$$

Izračun nam je pokazal, da imamo na dan 23. septembra 10 minut senčenja zaradi prisotnosti krošnje drevesa.

4. POSTOPEK MERJENJA

Meritve so bile opravljene z merilnim instrumentom Solmetric SunEye 210, slika 5.1. na strehi Laboratorija za energetiko Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (FERI). Predvidena orientacija namestitve sončnih modulov za posamezno pozicijo je 180° (jug). Predviden naklon modulov je izbran glede na optimalen sončni dobitek skozi vse leto in znaša 35° .

Izvedbo samih meritev je opravilo podjetje Enerson.



Slika 5.1: Merilni instrument Solmetric SunEye 210

4.1 Podatki o merilnem instrumentu

Solmetric SunEye 210 je ročna elektronska naprava, ki omogoča uporabnikom pomoč pri analizi lokacije za postavitev sončne elektrarne. S pomočjo elektronske naprave lahko ocenimo skupni potencial sončne energije ter senčenje posameznega mesta.

Z napravo lahko ugotovimo moteče ovire, kot so drevesa ali strukture in tako ugotovimo, koliko bi bilo proizvedene dodatne energije, če bi odstranili te ovire. S pomočjo vgrajenega GPS modula nam naprava določi točne koordinate za izbrano lokacijo. V napravo so vgrajeni senzorji, ki nam povedo natančen naklon strešine in orientacijo. Deluje v severni in južni polobli, kar omogoča enostavno merjenje in takojšnjo povratno informacijo. Vse dobljene podatke shranjuje za kasnejši pregled. Z vgrajeno 180 stopinjsko optično lečo nam omogoča posneti vse ovire, ki povzročajo senčenje sončnih modulov.

S pomočjo vgrajene knjižnice diagramov sončne poti, lahko natančno ugotovimo, v katerem letnem obdobju bomo imeli izgube in v kolikšni meri. Naprava nam z upoštevanjem senčenja skozi vse leto, prikaže grafično in tabelarično napoved sončnega obsevanja. Možno je tudi ročno modeliranje in korigiranje motečih objektov.

Rokovanje z napravo je enostavno. Velik barvni zaslon, občutljiv na dotik, nam olajša delo pri vizualizaciji naših diagramov in vnosu podatkov. Vse podatke in analize je možno prenesti na osebni računalnik, kjer jih lahko dodatno obdelujemo s priloženim programom. Vse te podatke je možno prenesti tudi v druge računalniške programe za dimenzioniranje fotonapetostnih sistemov.

Merilni instrument Solmetric Suneye, omogoča izdelavo kompleksne analize senčenja, kar je osnova za:

- izbiro primernih sončnih modulov
- načrtovanje optimalne postavitve sončnih modulov za maksimiranje načrtovane proizvodnje električne energije
- načrtovanje zunanjšega izgleda naprave glede na željeno funkcionalnost
- preverjanje sprejetih odločitev v zvezi z izbrano naložbeno možnostjo sončne naprave.

Merilni instrument zagotavlja natančnost meritve $\pm 1\%$, kar je pomembno zaradi uporabe rezultata meritev za kasnejše ekonomske izračune [16] in [17].

4.2 Podatki o opravljenih meritvah

Po opravljeni meritvi z merilnim instrumentom Solmetric SunEye 210, nam le-ta poda potek sončne poti z vrisanimi ovirami (slika 4.2) ter vrednosti sončnega dobitka za merjeno pozicijo (slika 4.3). Poletni sončni dobitek, čas od maja do junija znaša 99 %. V zimskem času, (čas od novembra do aprila), zasledimo upad sončnega dobitka in znaša le 76 %, medtem ko je skupni letni sončni dobitek 90 %.

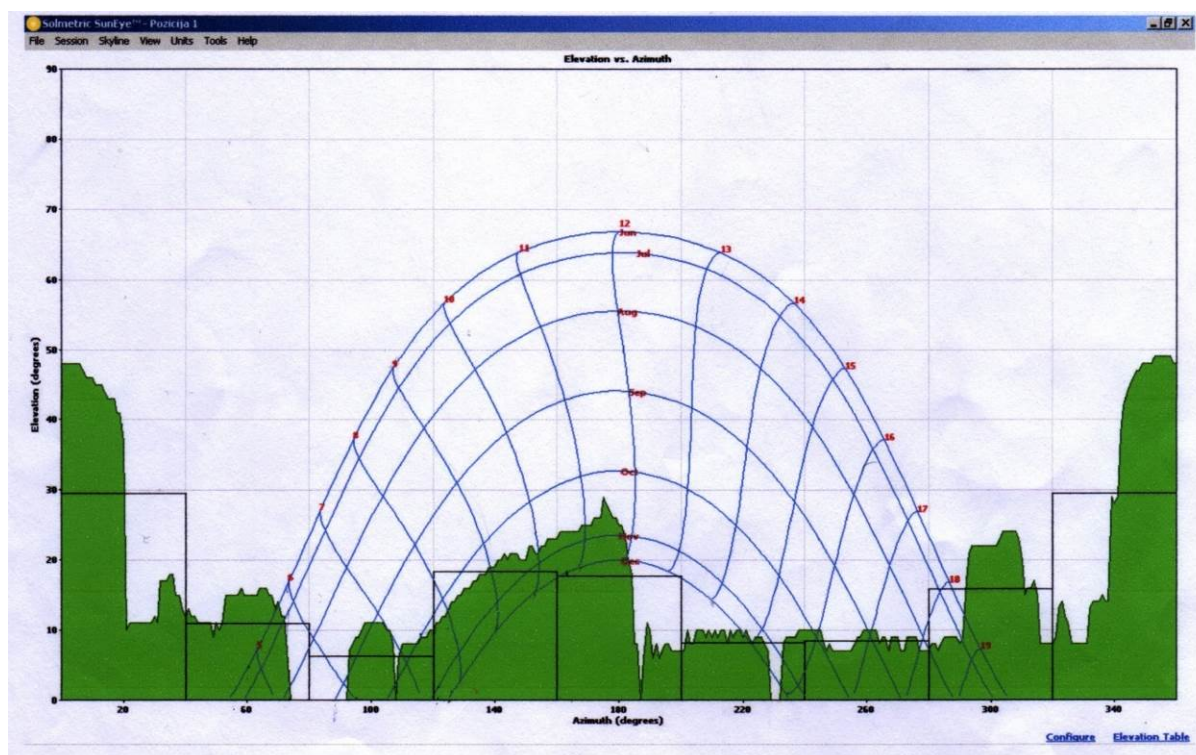
Navidezno gibanje sonca po nebu grafično opišemo z diagramom sončne poti, kot je to prikazano na sliki 4.2. Z diagramom sončne poti so predstavljene poti Sonca (višine in azimuti sonca) za tipične dni v posameznih mesecih. Diagram predstavlja osnovo za ovrednotenje senčenja.

Primer diagrama sončne poti na sliki 4.2 za zemljepisno širino $46,55^\circ\text{N}$ je prikazan za mesece od 21. decembra do 21. junija v kartezični obliki. Abscisna os prikazuje azimut sonca, pri čemer predstavlja 180° orientacijo jug, vrednosti od nič do 180° vzhod in vrednosti od 180° do 360° zahod. Na ordinati je predstavljena višina sonca (kot med horizontom in lego sonca). Ure, ki so prikazane v diagramu so v obliki 8, to pa zato, ker diagram predstavlja sončni in ne urni čas. Iz diagrama lahko odčitamo na primer, da je višina Sonca 21. junija ob 11.00 uri približno 64° . Razberemo lahko tudi čas sončnega vzhoda in zahoda, ter tako določimo dolžino dneva za ta dan.

Čas in trajanje osenčenja, ki nas v našem primeru zanima, določimo tako, da v diagram sončne poti vnesemo položaj ovir, ki jih določimo s pomočjo kompasa (ročno), oziroma v našem primeru uporabimo ustrezno programsko opremo Solmetric sun eye 210. Položaj ovir oziroma sence le-teh, so v diagramu obarvane zeleno.

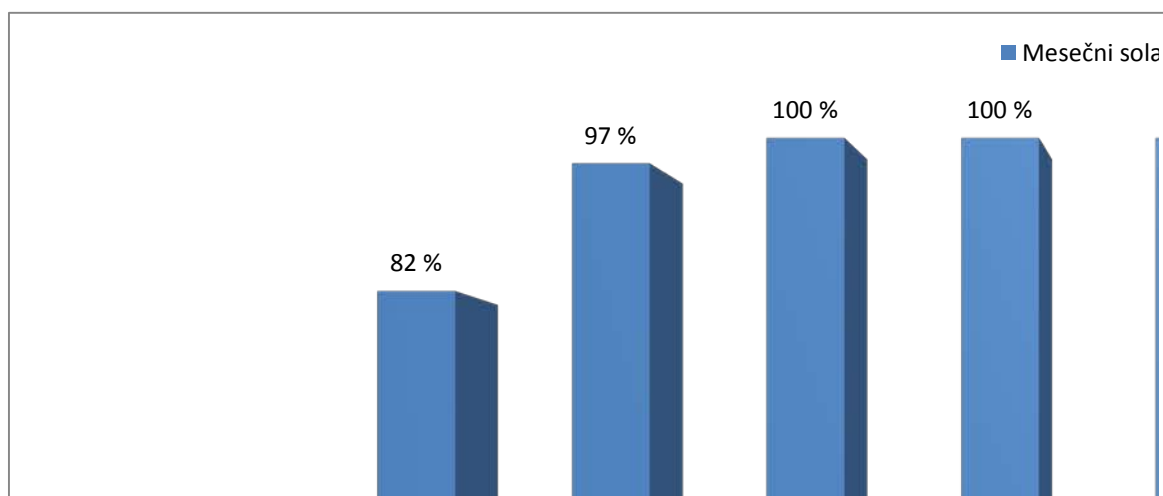
S pomočjo diagrama poti sonca z vrisanimi ovirami, lahko torej določimo, kdaj v letu oziroma tekom posameznega dneva, imamo prisotno senčenje sončnih modulov. Npr. za dan 21. december, lahko iz diagrama razberemo, da je senčenje zaradi okoliških ovir prisotno od sončnega vzhoda približno 7:40 ure, pa vse do poldneva 12:00. Senčenje se ta dan pojavi spet ob 15:00 uri in traja vse do sončnega zahoda, približno 16:15 ure.

Če hočemo na hitro oceniti dnevni delež sončne razpoložljivosti v % za dan 21. december, moramo iz diagrama odčitati dolžino dneva za 21. december (cca. 8:20 ure). Nato odčitamo čas trajanja senčenja za ta dan (gledamo del krivulje tega dne, ki poteka skozi zeleno obarvano površino – sence) cca. 5:10 ure. Sedaj z matematičnim izračunom ugotovimo, da imamo ta dan 21. decembra, zaradi prisotnosti vpliva senčenja, le približno 38 % delež sončnega obsevanja sončnih modulov.



Slika 4.2: Diagram sončne poti v kartezični obliki z vrisanimi ovirami (pozicija1), generiran z merilnim instrumentom Solmetric SunEye 210

Slika 4.3 prikazuje delež sončne razpoložljivosti po mesecih skozi vse leto. Višina stolpcev oziroma vrednost na vrhu posameznega stolpca prikazujejo razpoložljivo sončno energijo v procentih. Višina oziroma vrednost posameznega stolpca je odvisna od intenzitete prisotnega senčenja okoliških ovir. Če skozi vse leto ni prisotnega senčenja, so višine in vrednosti stolpcev enake 100 %. V primeru, da je senčenje tokom dneva prisotno cel dan, skozi vse leto, je vrednost oziroma višina posameznega stolpca enaka 0 %.



Slika 4.3: Delež sončne razpoložljivosti po mesecih, generiran z merilnim instrumentom Solmetric SunEye 210

V odvisnosti od raznolikosti senčenja okoliških ovir (različne ovire) v točki meritve, tako dobimo različne višine oziroma vrednosti stolpcev (slika 4.3). V povezavi s sliko 4.2, kjer imamo vrisane okoliške ovire, lahko vidimo, v kolikšni meri (%) nam določena ovira vpliva na razpoložljivost sončne energije (sončni dobitek).

Iz podanega na sliki 4.3 lahko razberemo, da imamo v zimskih mesecih največji upad razpoložljive sončne energije. Se pravi, da imamo v tem času največ senčenja okoliških ovir, saj sonce v tem času ne doseže zadostne kotne višine (α), da bi se žarki izognili oviram in s tem dosegli nameščene sončne module.

5. SIMULACIJA SENČENJA

Za določitev ali bodo ovire v posameznem letnem času preblizu predlagane namestitve sončnih modulov, so na razpolago različne metode. Te metode vključujejo bodisi izvajanja računanja z diagrami poti sonca, ali z uporabo drugih orodij, kot je Solar Pathfinder. Takšne metode so precej drage in zapletene, zato smo se v našem primeru odločili za enostavnejšo metodo, s programskim orodjem SketchUp.

S programom lahko simuliramo potek padanja senc okoliških objektov na želeno pozicijo za poljuben dan in uro skozi vse leto. Metoda SketchUp ne daje kvantitativnih podatkov. Kot simulacija torej ne more izračunati vrednosti izgub zaradi senčenja v kWh ali MJ, lahko pa daje zelo dober pregled lokacij za gradnjo sončne elektrarne. S to metodo je možno dobiti dobro oceno senčenja [14] in [15].

Možnosti programa sketchup:

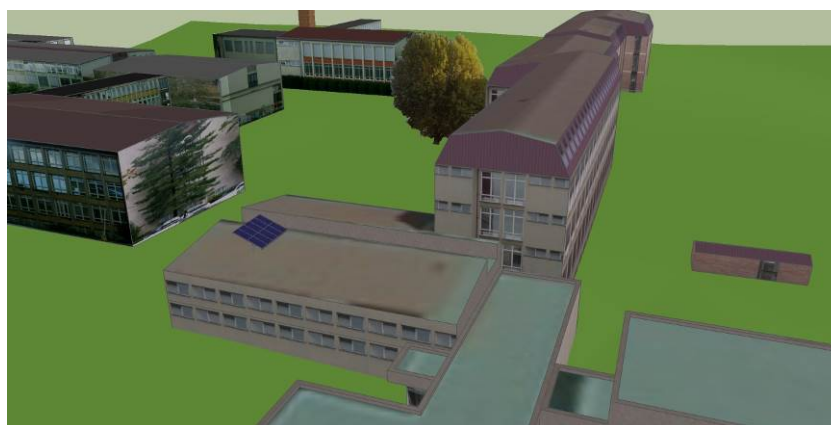
- Kreativno oblikovanje in spreminjanje 3D objektov
- Izdelava zahtevne 3D geometrije s samo nekaj kliki miške
- Poljubno konstruiranje, pomanjševanje in povečevanje, vrtenje in raztegovanje objektov in modela
- Natančen vnos koordinat
- Dodeljevanje barv in materiala iz knjižnice, spreminjanje obstoječih in izdelava lastnih materialov
- Senčenje z natančnim položajem sonca (odvisno od geografske lege, ure, dneva in datuma)
- Animacija osončenja
- Izbira optimalnega grafičnega prikaza (npr. prikaz kot skica)
- Uvoz fotografij (teksture, osebe...) in poljubna nadaljnja 3-D obdelava
- Izdelava 3-D modelov na osnovi ročnih skic
- Izdelava/uvoz 3-D elementov

V našem primeru smo program SketchUp uporabili za hitro in enostavno analizo osončenosti nameščenih sončnih modulov. Na ta način smo se lahko, po opravljenih izračunih in meritvah, še vizualno prepričali glede najprimernejše pozicije za postavitev sončnih modulov.

Kot prvo bomo v analizi senčenja prikazali sončni vzhod najkrajšega dne v letu 21. december in ga med seboj primerjali z 21. junijem (poletni solsticij) in 23. septembrom (enakonočje). Časa, ki ga bo simulacija podala pri sončnem vzhodu dne 23. decembra, pri primerjavi z ostalima dvema dnevoma ne bomo spreminjali, saj bomo lahko na ta način videli kakšne so razlike med danimi dnevi, ob istem času.

Iz podanih slik 5.1 do 5.3 je razvidno, da dne 21. decembra ob času 7:45 še nimamo nobene proizvodnje električne energije, saj je iz slike lepo razvidno, da so nameščeni sončni moduli, kakor tudi celoten objekt osenčeni. Ob istem času dne 21. junija in pa 23. septembra pa nameščeni sončni moduli že prejemajo sončno energijo, se pravi imamo pretvorbo sončne energije v električno.

Pri primerjavi slike 5.2 s sliko 5.3 lahko ugotovimo, da se pojavljajo različne dolžine, ter usmerjenost senc okoliških objektov. Razlog tega je, da sonce ob različnih dnevih ob istem času doseže različno vrednosti azimuta in kotne višine. Višje, kot je sonce nad obzorjem, krajše so dolžine senc. Azimut sonca vpliva na usmerjenost senc. Če se na hitro dotaknemo kotnih funkcij lahko ugotovimo, da je dolžina sence najkrajša, ko imajo sončni žarki vpadni kot 0 stopinj (sinus vpadnega kota sončnih žarkov je 0).



Slika 5.1: Senčenje za obravnavani objekt dne 21. december, čas 7:45



Slika 5.2: Senčenje za obravnavani objekt dne 23. september, čas 7:45



Slika 5.3: Senčenje za obravnavani objekt dne 21. junij, čas 7:45

Če torej želimo dober sončni dobitek sončne elektrarne, mora biti vpadni kot v času, ko je sončnega sevanja največ (opoldan), kar se da majhen – idealno je, če sončno sevanje vpada na sončne module pod pravim kotom (vpadni kot je v tem primeru enak 0). Ker pa sonce tokom dneva ter leta dosega različno kotno višino in s tem različne vpadne kote sončnih žarkov, je potrebno polje sončnih modulov optimirati tako, da dosežemo najboljši idealni naklon sončnih modulov tokom celega leta.

6. NAMESTO SKLEPA – OVREDNOTENJE REZULTATOV

V preglednicah 6.1 in 6.2 je narejena primerjava časov trajanja senčenja med izmerjenimi vrednostmi z merilnim instrumentom Solmetric SunEye (preglednica 6.1) in izračunanimi (preglednica 6.2).

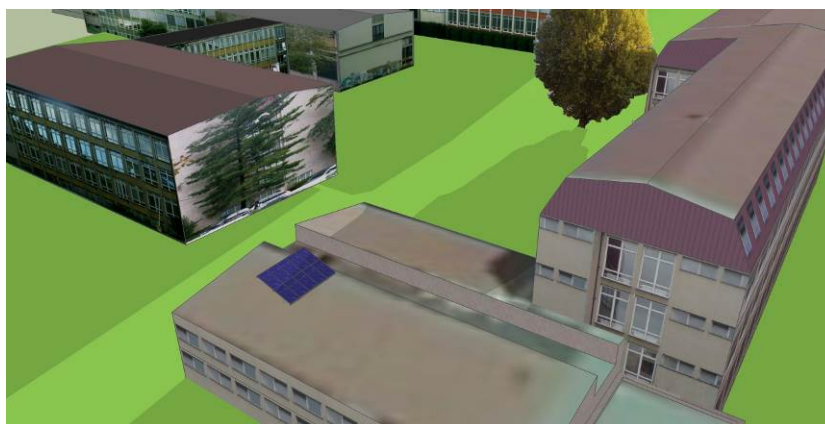
Preglednica 6.1: Iz grafa instrumenta Solmetric SunEye odčitane vrednosti

višina sonca (°)	datum	Čas opazovanja sonca (h)	Čas senčenja (h)
0 - 20	22 dec	7:50 - 12	4:10
0 - 23	19 jan – 22 nov	7:35 - 11:45	4:10
0 - 32	21 feb – 23 oct	6:50 – 7:50	1
0 - 43	20 mar – 23 sep	6:10 – 6:55	0:15
0 - 56	20 april - 23 aug	5:10 - 12	0
0 - 64	22 maj – 23 jul	4:25 - 12	0
0 - 67	22 jun	4:10 - 12	0

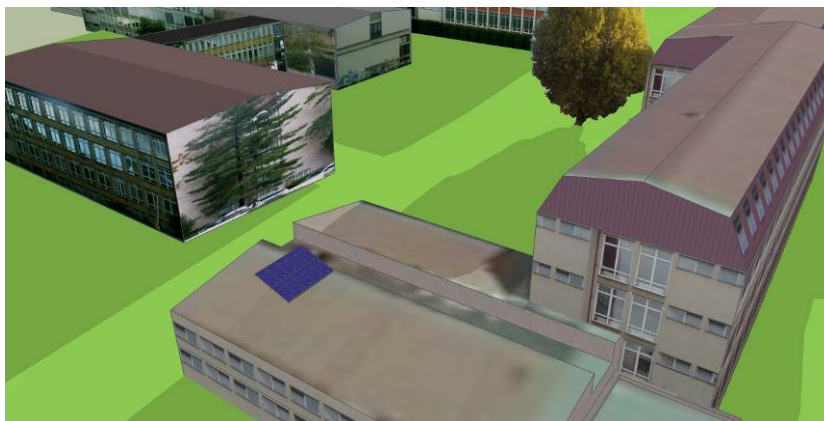
Preglednica 6.2: Izračunane vrednosti

višina sonca (°)	datum	Čas opazovanja sonca (h)	Čas senčenja (h)
0 - 20	22 dec	7:50 - 12	4:10
0 - 23	19 jan – 22 nov	7:35 – 11:40	4:05
0 - 32	21 feb – 23 oct	6:55 – 7:55	1
0 - 43	20 mar – 23 sep	6:05 – 6:55	0:10
0 - 55	20 april - 23 aug	5:10 - 12	0
0 - 64	22 maj – 23 jul	4:27 - 12	0
0 - 67	22 jun	4:10 - 12	0

Vidimo, da prihaja samo do majhnih razlik med merilnim instrumentom in izračunanimi vrednostmi. To je lahko posledica: slabo odčitane vrednosti (izmerjene vrednosti) z grafa, ali napake pri izračunih (zaokroževanje, zajemanje mer na terenu, itd...).



Slika 6.1: Prikaz senčenja dne 23. septembra, čas 6:45



Slika 6.2: Prikaz senčenja dne 23. september, čas 6:55

Slika 6.1 prikazuje potek senc dne 23. septembra ob 6:45. To uro smo izbrali, da se prepričamo ali držijo naše računske ugotovitve (poglavje 3, enačbe 3.5 do 3.12), da platana pred stavbo v tem času povzroča senčenje sončnih modulov. Na sliki 6.1 je lepo vidno, da je več kot polovica sončnih modulov osenčena. Z enačbo 3.11 smo izračunali, da je čas, ko sonce doseže zadostno kotno višino, 6:52. Da je sonce ob tem času dovolj visoko, je razvidno tudi iz slike 6.2 za čas 6:55, ko senca platane ne doseže več sončnih modulov.

7. SEZNAM UPORABLJENIH VIROV

- [1] D. Lenardič, Fotonapetostni sistemi : priročnik : Gradniki, načrtovanje, inštalacija, vzdrževanje, Agencija Poti, Ljubljana, 2009
- [2] M. Babuder, Obnovljivi viri energije (OVE) v Sloveniji = Renewable energy sources in Slovenia, Fit media, Celje, 2009.
- [3] K. H. Böse, Uporabljajmo sončno energijo, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana, 1979.
- [4] B. Jermanj, Greje naj sonce : arhitektura, sistemi, tehnika, Slovensko društvo za sončno energijo, Ljubljana, 1986.
- [5] B. Jermanj, Sonce v vašem domu : tehnike in 19 ekosolarnih hiš, Svet knjige, Ljubljana, 1993.
- [6] D. Kastelec, J. Rakovec, K. Zakšek, Sončna energija v Sloveniji, ZRC SAZU, Ljubljana, 2007.
- [7] S. Seme, G. Štumberger, J. Voršič; Vpliv osenčenja na U-I karakteristiko fotonapetostnega modula
- [8] L. Dragovan; Načrtovanje fotovoltaičnih sončnih elektrarn; dipl.delo
- [9] http://www.gorenjske-elektrarne.si/resources/files/doc/Referat_Flegar_Jereb_konni.pdf
- [10] <http://www.plan-net-solar.si/soncne-elektrarne/fotovoltaika/>
- [11] <http://www.soncna-elektrarna.net/solarni-sistemi.asp?fotovoltaika=Proizvodi&sistemi=Moduli>
- [12] <http://pv.fe.uni-lj.si/Uvod.aspx>

- [13] <http://solardat.uoregon.edu/>
- [14] <http://en.wikipedia.org/wiki/SketchUp>
- [15] <http://www.builditsolar.com/References/SketchUp/SketchUpEx.htm>
- [16] <http://varčevanje-energije.si/fotovoltaične-elektrarne/solarni-analizator-suneye-210.html>
- [17] <http://www.gogreensolar.com/products/solmetric-suneye-210-site-analysis-tool>

NASLOV AVTORJEV

Dejan Železnik
Jože Voršič
UM FERI Laboratorij za energetiko

Sebastijan Seme
UM Fakulteta za energetiko Krško

Primož Tručl
ENERSON d.o.o.