

INSTRUMENT DE PROGNOZA ASIFOR

Prezentare generală

Instrumentul ASIFOR a fost proiectat modular, principalele elemente componente fiind:

- (1) Modulul de monitorizare a stării cerului (SMS) care cuantifică poziția relativă dintre soare și nori prin procesarea imaginilor succesive ale cerului înregistrate cu o camera digitală fisheye.
- (2) Modulul de monitorizare a centralei PV (RS), care furnizează date radiometrice și meteorologice măsurate in-situ necesare pentru rularea aplicațiilor de prognoză.
- (3) Modulul computațional (CS), unde sunt implementate aplicațiile de prognoză dezvoltate în cadrul proiectului și care controlează întregul proces de prognoză.

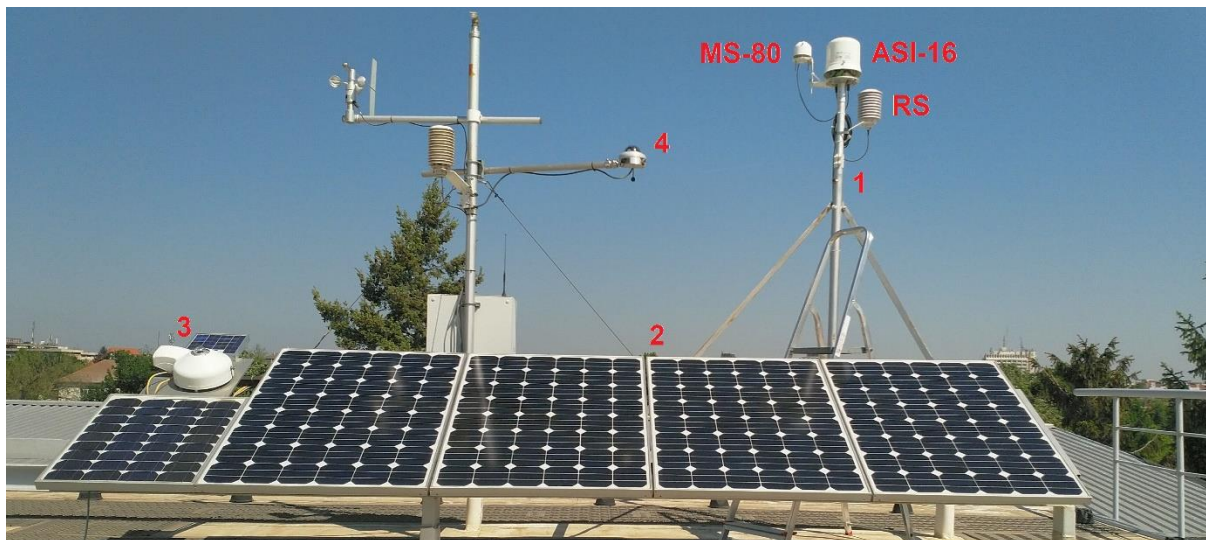


FIGURA 1. Fotografie de ansamblu a standului experimental pentru testarea modelelor de prognoză a puterii PV. Acesta include: (1) modulele instrumentului de prognoză ASIFOR: SMS (echipat cu camera ASI-16) și RS (incluzând pyranometrul MS-80S); (2) micro-centrala fotovoltaică destinată testării algoritmilor de prognoză a puterii PV. (3) Pyranometru Kipp&Zonen de clasă A conform ISO9060:2018 pentru monitorizarea iradianței solare în planul modulelor PV; (4) Pyranometru Delta-T Devices SNP1 pentru monitorizarea SSN.

În prezent, instrumentul de prognoză ASIFOR este operațional pe Platforma Solară a Universității de Vest din Timișoara și funcționarea sa este monitorizată continuu. O fotografie a standului experimental este prezentată în figura 1. Componentele ASIFOR vizibile pe stanul experimental sunt: SMS - sistemul de monitorizare stării cerului, având la bază instrumentația de fotografiere fisheye EKO Instruments ASI-16 și RS stația radiometrică echipată cu următoarele instrumente: pyranometru EKO MS-80S de clasă A în acord cu ISO 9060:2018 și stația meteorologică standard.

Pyranometrul EKO MS-80 monitorizează iradianța solară globală în plan orizontal. Micro-centrala PV din dotarea standului experimental are o putere instalată de 540 Wp și debitează pe o sarcină rezistivă de valoare constantă. Monitorizarea stării cerului, a iradianței solare în plan orizontal și a parametrilor meteorologici (temperatură, presiune, umiditate) este realizată continuu, datele fiind înregistrate cu eșantionare la minut. Procesul de monitorizare este complet automatizat.

Modelul de prognoză

Instrumentul de prognoză ASIFOR are la bază modelul cu două stări, în versiunea PV2-state [Paulescu M et al. (2022) *Renewable Energy* 195, 322]. În principiu, modelul funcționează astfel: dacă soarele strălucește, puterea PV este estimată folosind un estimator în condiții de cer senin, în caz contrar, puterea PV este estimată cu același estimator, dar ajustat în funcție de transmitanța norului. Cele două stări sunt discriminate de către indicatorul de însorire SSN, care este singura mărime direct prognozată. SSN este un cuantificator binar, care indică dacă soarele strălucește pe cer $SSN = 1$, sau nu $SSN = 0$. Ecuația modelului evidențiază cele două stări, diferențiate de valoarea prognozată a SSN:

$$\hat{P}_t = \begin{cases} \alpha_{cs} P_{0,t} & \text{IF } SSN_t = 1 \\ \gamma_c P_{0,t} & \text{IF } SSN_t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

unde \hat{P}_t este valoare prognozată a puterii fotovoltaice la momentul t . Prognoza este emisă la timpul $t - \Delta t$. $P_{0,t}$ reprezintă puterea PV estimată la momentul t în condiții de cer senin. α_{cs} reprezintă o ajustare dinamică în timp real aplicată transmitanței atmosferice în condiții de cer senin încapsulată în $P_{0,t}$. γ_c este un factor de atenuare aplicat lui $P_{0,t}$, în concordanță cu transmitanța norului. Ambii parametri, α_{cs} și γ_c , sunt estimați simultan prin regresie liniară aplicată datelor măsurate într-o perioadă Δt , anterioară momentului de prognoză. Pentru fiecare din zile, procedura de calcul a lui α_{cs} și γ_c este rulată după cum urmează. La o oră predefinită dimineața, α_{cs} și γ_c sunt inițializați: $\alpha_{cs} = 1$, ceea ce înseamnă că se presupune că $P_{0,t}$ este un estimator de calitate pentru puterea fotovoltaică în condiții de cer senin, și γ_c este egal cu media multianuală a transmitanței norilor în locație respectivă. Sistematic, înainte de a genera o prognoză, valorile lui α_{cs} și γ_c sunt actualizate.

Pentru prognoza SSN este testat un model bazat pe procesarea imaginilor succesive ale cerului înregistrate de ASI-16 și determinarea deplasării câmpului de nori. În implementarea ASIFOR, imaginile sunt procesate în timp real (defishing, identificarea norilor, conversia în binar, adăugarea coordonatelor soarelui pe imaginea binară, etc.). Figura 2 ilustrează diversele etape din procesarea imaginilor. Figura 2a prezintă fotografia luată de camera fisheye ASI-16. Primul pas în procesarea imaginii este proiecția plană a imaginii fisheye (figura 2b). Proiecția plană apare ca o imagine în oglindă a fotografiei originale, ca și cum punctul de observație de la sol se deplasează deasupra norilor. În proiecția plană, pixelii corespund la suprafațe egale din imaginea cerului.

Astfel, nebulozitatea poate fi determinată direct prin raportul numărului de pixeli asociați norilor și numărul total de pixeli din imagine. De notat că orizontul imaginii este setat luând în considerare configurația reală din teren (de exemplu, eliminarea din calcul a vârfului bradului din figura 2a). Poziția soarelui este calculată determinist și inserată în imaginile procesate. Următorul pas constă în aplicarea algoritmului BRBG. Algoritmul calculează raportul $B/R + B/G$ pentru fiecare pixel din proiecția plană a imaginii RGB. Rezultatul este o imagine în tonuri de gri, care, pentru o vizualizare mai bună, este prezentată în tonuri de albastru (fig. 2d). Această imagine rămâne nemodificată, atunci când variază expunerea la lumină. În final, imaginea procesată cu algoritmul BRBG este transformată în imagine binară (fig. 2e), imagine care stă la baza algoritmului de prognoză a SSN.

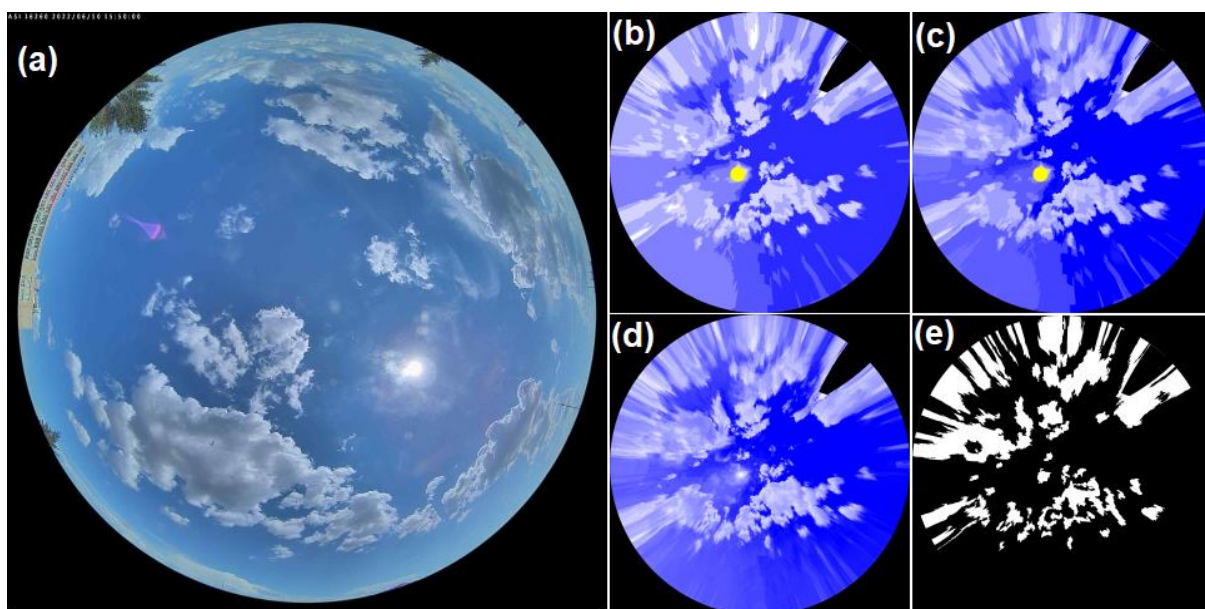


FIGURA 2. Diferite etape ale procesării imaginii achiziționate de sistemul de monitorizare a stării cerului în data de 10 iunie 2022 la ora 12:50:00 UTC: (a) Fotografie originală realizată de camera fisheye ASI-16, (b) proiecție plană cu poziția soarelui marcată de un disc galben, (c) proiecție plană cu culori ajustate, (d) imagine procesată cu algoritmul BRBG, (e) imagine binară.

Rezultate teste

Sezonalitatea are o influență indirectă asupra acurateței prognozelor. În perioadele de primăvară cu instabilitate ridicată a stării cerului, acuratețea prognozelor scade. Chiar dacă prognoza SSN este corectă, cu cât instabilitatea crește, cu atât devine mai dificilă ajustarea estimatorului puterii în condiții de cer senin ($P_{0,t}$ în relația 1). Influența sezonality asupra instrumentului de prognoză are o legătură directă cu unghiul de înălțare a soarelui pe cer: cu cât declinația se apropie mai mult de valoarea maximă pozitivă (cu atât soarele se ridică tot mai sus pe cer. Analiza rezultatelor arată

că algoritmul de prognoză al SSN pe baza imaginilor cerului funcționează cu acuratețe mai bună la unghiuri de înălțare mai mari.

Orizontul de prognoză are o influență complexă atât asupra acurateței cât și a preciziei prognozelor. Concluzia generală este că pe măsură ce orizontul de prognoză crește, performanța modelului scade. Într-un test relevant [Paulescu M et al. (2022) *Renewable Energy* 195, 322], acuratețea modelului PV2-state propus pentru prognoza puterii PV este evaluată la zece orizonturi de prognoză, cuprinse între 1 minut și 20 minute. Acuratețea PV2-state este comparată cu modelarea ARIMA a seriilor temporale măsurate ale puterii PV măsurate. De notat că modelul PV2-state prognozează puterea PV pe baza extrapolării statistice a seriei SSN în timp ce modelul ARIMA operează nemijlocit pe seria de timp a puterii PV normalizată. Rezultatele sunt prezentate în figura 3 în termeni de skill score SS. Skill score cuantifică îmbunătățirea performanței unui model față de un model de referință, în această ilustrare persistența. Figura 3 prezintă asemănări dar și diferențe notabile între modelul PV2-state și modelul ARIMA. În general, pentru orizonturi scurte de prognoză, de până la 5 minute, performanța modelului PV2-state este net superioară modelului ARIMA. Prin substituirea modelului statistic de prognoză a SSN cu modelul bazat pe procesarea imaginilor s-a obținut o creștere considerabilă a acurateței prognozelor și la orizonturi de timp mai mari de 5 min. Testarea a fost efectuată până la orizonturi de prognoză 30 min.

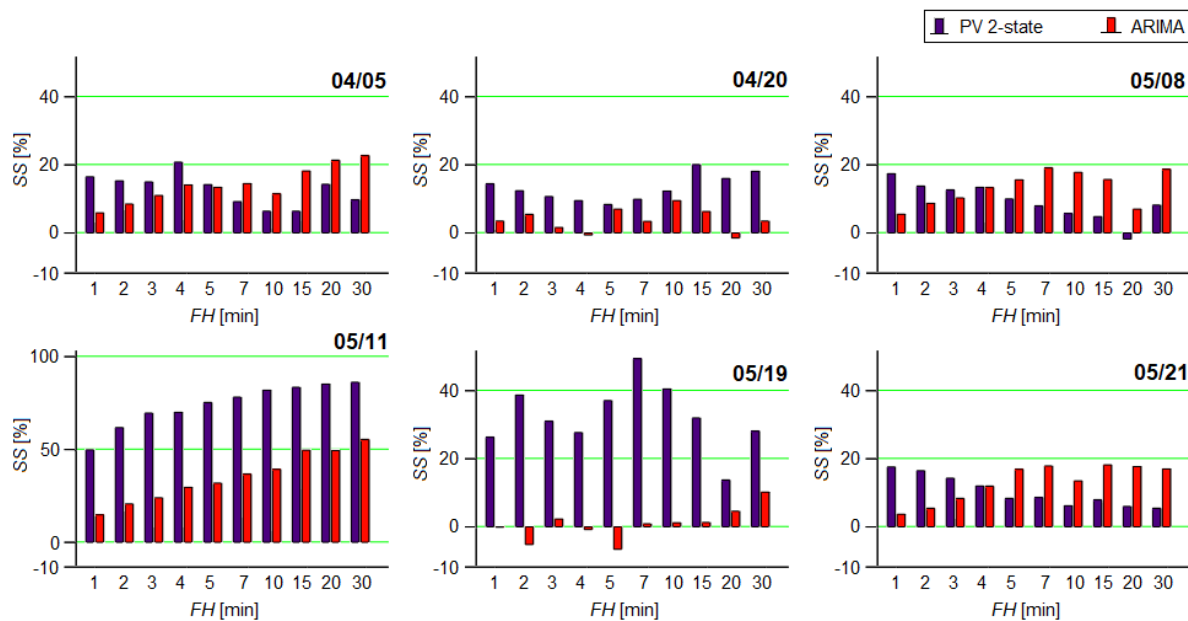


FIGURA 5. Performanța modelelor PV2-state și ARIMA evaluate din perspectiva de skill score la diferite orizonturi de prognoza FH în zilele de test din 2021: 05/04 o zi însoțită cu instabilitate moderată, 20/04 cu instabilitate ridicată pe un fond înnorat, 08/05 cu o variabilitate mare stării cerului, 11/05 o zi cu cer senin stabil, 19/05 o zi înnorată stabilă și 21/05 o zi însoțită și stabilă dimineața și variabilă după-amiază.

Datorită ajustării permanente a estimatorului de cer senin la starea curentă a micro centralei PV, influența asupra acurateții prognozelor a factorilor de mediu, precum conținutul de vapori de apă din coloana atmosferică, aerosoli, este minoră. Totuși, există un factor de mediu, variabilitatea stării cerului, cu influență majoră asupra acurateții prognozelor. Privind din nou figura 5, în cazul zilelor cu variabilitate mare (de exemplu 21/05), pe măsură ce orizontul de prognoză crește, modelul ARIMA devine mai performant. În zilele cu regim meteorologic mai stabil, comportamentul este complet diferit. Fie că este o zi stabilă cu cer senin (11/05) sau o zi cu cer acoperit de nori dar stabilă (19/05), performanța modelului PV2-state depășește cu mult performanța modelului ARIMA. Mai mult, atunci când acoperirea cu nori este mare, PV2-state este cu 20%-40% mai performant decât persistența, în timp ce modelul ARIMA are performanțe comparabile sau chiar mai slabe decât persistența. Aceste observații pot fi explicate pe baza diferențelor dintre mecanismele prin care funcționează cele două modele. PV2-state se bazează pe prognoza SSN. De fiecare dată când SSN nu este prognozat corect, eroarea în prognoza puterii fotovoltaice este mare. În zilele cu variabilitate mare, numărul de comutări SSN este mare, ca urmare, probabilitatea de a prognoza SSN incorect este mai mare. Adăugarea în prognoza SSN a informațiilor exogene furnizate de ASI-16 crește acuratețea instrumentului de prognoză în condiții de variabilitate crescută a stării cerului.

Specificatii tehnice

- Camera foto și sistem de monitorizare radiație solară: All-Sky Imager ASI-16
- Unghi de vedere: 180 de grade
- Unghi de vedere efectiv utilizat: 170 de grade (pentru eliminarea clădirilor din jurul camerei)
- Calitate imagine: JPEG sau PNG (selectabilă din interfața Sky-Imager-ului)
- Rezoluție imagine: 1920 x 1920 pixeli
- Baza de date: MySQL
- Parametri ce se înregistrează în baza de date: data și timpul curent, puterea măsurată, puterea prognozată, iradianța solară globală și difuză, iradianța solară în planul modulelor PV, temperatura, umiditatea aerului, fotografia cerului.
- Serverul WEB: Apache
- Server FTP: FileZilla
- Limbaj de programare aplicație WEB: PHP și HTML
- Modul detecție nori: FindClouds Trinity
- Sistem de operare: Windows 10
- Interval captura imagini: 1 min
- Interval calcul nebulozitate: 1min
- Interval calcul prognoza putere: 1min
- Modalitate transfer date de la sky imager la calculatorul se proces: LAN

- Transfer imagini: protocol FTP
- Server web: XAMPP / Apache
- Stocare fisiere imagine: HDD
- Back-up fisiere imagine: Local
- Back-up baza de date: local si remote
- Aplicatie software de prognoza: limbajul R
- Aplicatia de management al bazei de date: PHP si MySQL

Implementare industrial potențială

În figura 4 este prezentată o diagramă generală a fluxului de date într-un sistem de prognoză bazat pe instrumental ASIFOR. Informațiile despre starea cerului și nebulozitatea atmosferică sunt preluate de către modulul Sky Imager și transmise prin intermediul protocolului FTP sau alt protocol de transmisie a fișierelor de date (un eventual backup prin intermediul unui serviciu de Cloud) unui server ce conține o baza de date unde sunt stocate imaginile. În continuare, imaginile sunt preluate de către sistemul de procesare a datelor și prognoză care le va interpreta utilizând algoritmi specifici: detecția norilor în imaginea proiectată plan, evaluarea mișcării norilor, evaluarea indicatorului de însorire. De asemenea, alături de imaginile furnizate de SMS sunt stocate în baza de date măsurători ale parametrilor meteorologici și radiometrici monitorizați. Baza de date poate fi implementată utilizând serverul MySQL (server disponibil gratuit și care permite operarea cu un număr suficient de mare de înregistrări). Vor fi create tabele separate pentru datele de intrare și una sau mai multe tabele pentru datele de ieșire ale sistemului de prognoză. Aplicația de prognoză va rula în timp real ca și script pe serverul de baze de date SQL. Atât imaginile raw cât și prognozele vor putea fi accesate de către utilizatori prin intermediul unei platforme web. Consultarea on-line a datelor se va putea face de pe orice dispozitiv conectat la internet. Pentru protecția bazei de date și a sistemului de calcul, este prevăzut un firewall care separă traficul intern de traficul extern generat de interogările utilizatorilor.



Figura 4. Fluxul de date în sistemul de prognoză ASIFOR. Sky Imager include sistemele SMS și RS (montate in-situ), Baza de date și sistemul de procesare formează CS, iar clienți se referă la abonați, într-o eventuală implementare industrială.