

Eraikin pasiboen karakterizazio termikoa: landare-fatxada modular baten kasu-azterketa

(Thermal characterization of passive buildings:
case study of a modular living wall)

Zalao Azkorra-Larrinaga*, Koldobika Martín-Escudero, Naiara Romero-Antón

Energetika Eraikuntzan. Bilboko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU)

LABURPENA: Sistema berdeak sendotzen ari dira hirietako eskari termikoa murrizteko eta, aldi berean, hiriko bizitzaren kalitatea hobetzeko. Sistema berdeei lotutako onurak hainbat dira: biodibertsitatea handitzea, ekaitz-uren kontrola, energia aurreztea, tenperatura erregulatzea eta zarata arintzea. Landaredun sistema bertikalek errendimendu energetikoari egiten dioten ekarpenari buruzko ezagutza lortzeko, landaredun fatxada bati proba metodologikoak egin zaizkio Paslink zeldea batean. Helburua landare-fatxada modular baten berokuntza- eta hozte-eskaria ezaugarritzea da. Emaitza nagusia isolamenduaren hobekuntza izan da. Erreferentziako fatxada $0.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$ baliotik abiatzen zen, eta $1.22 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$ -ko transmisio termikoko balioetara igaro zen landare-fatxadari esker; horrek esan nahi du isolamendu-ahalmena % 30 handitu zela. Fatxada berdeek energia aurrezteko potentzialtasun handia dutela ondoriozta daiteke.

HITZ GAKOAK: landaredun-fatxada modularra, hozte pasiboa, errendimendu energetikoa, Paslink zeldea.

ABSTRACT: *Modular living walls are being strengthened to reduce thermal demand in cities while improving the quality of life in the city. The benefits associated with green systems are increased biodiversity, storm water control, energy saving, temperature regulation and noise mitigation. In order to gain knowledge of the contribution of vertical plant systems to energy performance, methodological tests of the modular living wall have been conducted in a Paslink test cell. The objective is to characterize the heating and cooling demand of a modular living wall. The main result is the improvement of isolation. The reference façade started from a value of $0.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$ and went to a thermal transmission value of $1.22 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$ thanks to the green façade, which means that insulation capacity increased by 30%. It can be concluded that modular living walls have great energy saving potential.*

KEYWORDS: *modular living wall, passive cooling, energy performance, Paslink test cell.*

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Zalao Azkorra-Larrinaga. Energetikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU) – zalao.azkorra@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0003-4438-2891>

Nola aipatu / How to cite: Azkorra-Larrinaga, Zalao; Martín-Escudero, Koldobika; Romero-Antón, Naiara (2024). «Eraikin pasiboen karakterizazio termikoa: landare-fatxada modular baten kasu-azterketa». *Ekaia*, 45, 2024, 259-278. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.24600>).

Jasotze-data: 2023, ekainak 28; Onartze-data: 2023, irailak 20.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2024 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Eraikinaren kanpoko inguratzaileak funtsezko eginkizuna betetzen du berokuntzaren eta hoztearen kontsumoen eskaeretan, funtsezkoa baita eraikinaren barruko ingurunean ingurumen-konforteko baldintza egokiak lortzeko. Ez da ahaztu behar inguratzaile ororen helburu nagusia kanpoko giroa eta etxebizitzaren barruko giroa bereiztea dela. Klima hotzetan beroa galtzea saihestuko da, eta, klima beroetan, berriz, kanpoko azalerak gehiegi berotzea.

Eraikinen landare-fatxadak dakarren ezaugarri bereizgarria babes-geruza berezia da, inguratzailearen elementuak eguzki-erradiazioaren aurrean isolatzen dituen osagaia. Landaredi-geruzak erradiaziotik babesten du eraikina, eta egituraren tentsio termikoak murrizten ditu. Horrela, fatxadako landarediak lagundu egiten du udan eraikinak hozten eta neguan apur bat isolatzen.

Fatxada berdeak hiri-birgaitzearen hurbilketa adimenduna izan daitezke, landaretza hiri-testuinguruan integratzen laguntzen baitute lurra okupatu gabe, eta gainera hiri-eremuen aprobetxamendua sustatzen baitute eta eraikinen diseinua eta errendimendua hobetu.

Landaredun fatxadak hiri-ingurunerako estrategia jasangarri baten parte izan daitezke [1]. Izan ere, landaretza hiriguneetan integratzeak hainbat ingurumen-onura ditu [2] eta honako hobekuntza hauek eragiten ditu: airearen kalitatea hobetzea [3] CO₂ xurgatuz [4] eta hauts partikulak eta metal astunak atxikiz [5]; hiriko bero-uhartearen efektua arintzea [13] eta, ondorioz, tokiko klima-baldintzetan eragitea (tenperatura eta hezetasun aldetik); hiriko zarata murriztea eta xurgatzea [6] eta biodibertsitatea handitzea [7, 8]. Aldi berean, landaretza hiri-ingurunean integratzeak eragin positiboa du gizakien osasunean, eta onurak ekonomian. Berdeguneen presentziak eragin estetikoa du inguruko hirigunean eta ondasunen balioa handitzen laguntzen du.

Handiak dira eraikinen energia-eskariaren ondoriozko kostuak, bai berokuntzakoak, bai hoztekoak. Horregatik, oso garrantzitsua da ongi aztertzea eraikin baten hozte-eskaria murrizteko inpaktua, landaretza bertikaleko sistema bat (Vertical Greening System-VGS) instalatuko bada.

Eumorfopoulou eta Kontoleon [9] lanean, Grezian egindako ikerketa batetik abiatuta frogatu zen landare-fatxadak hozteko estrategia egokiak direla eskualde mediterraneoko hiriguneetako eraikinetarako. Lanean, fatxadako sistema konbentzionalak huntzez estalitako landare-fatxadako sistemarekin alderatzean, guztiak orientazio bereko eraikin batean instalatuta zeuden. Landaredia zuten fatxadek landaretzarik gabeko fatxadek baino tenperatura askoz baxuagoak eta egonkorragoak zituztela ikusi zen. Gai-

nera, landare-fatxaden ondorio positiboak esanguratsuagoak ziren egun oso beroetan. Beraz, halako estalkiak eraikinetan instalatzea irtenbide ezin hobe da barruko baldintza termikoak hobetzeko.

Vox-ek eta lankideek [10] landare-fatxaden orientazioak eta isolamendu-geruzak eraikin baten hozte-eskaeran duten eragina aztertu zuten. Egiaztatu zenez, eraikinak landare-fatxada bat zuenean, handiagoak ziren hozte-kargak, eta isolamendua kanpoko azalera zegoen, ez barruko azalera, beste isolamendu kasuetako erara. Hala ere, landaretzarik gabeko eraikin batekin alderatzeko orduan, energia-eskariaren murrizketa-ehunekoak neurri handian aldatzen ziren landare-geruza kokatzen zen fatxadaren orientazioaren arabera, mendebaldeko orientaziorako % 20.08ko maximoa izatetik iparraldeko orientaziorako % 4.65eko minimoa izatera.

Wong-ek eta Baldwin-ek [11] frogatu zuten, halaber, landaredi-fatxadek eraikinetan zituzten ondorioak oso positiboak zirela udako giroan. Kasu honetan, aukeratutako kontrol-parametroa batez besteko tenperatura erradiatzailea izan zen. Aztertutako kasu guztietatik, emaitzarik deigarriena baldintza jakin batzuetan batez besteko tenperatura erradiatzailea 10 °C murriztea izan zen. Ikusi zen landare-fatxadako tenperatura egonkorragoa zela landaretzarik gabeko fatxadako tenperatura baino.

Pérez-ek eta lankideek [12] Lleidatik gertu dagoen eraikin batean itzaltze-sistema gisa erabilitako landare-pantaila batzuek eragindako efektuetan oinarritu zuten beren ikerketa. Neurketek erakutsi zuten landare-geruzaren eta itxituraren arteko espazioan landare-pantailak mikroklima bat sortzen zutela, tenperatura baxuagoak eta hezetasun altuagoak zituena.

Landare-fatxaden ondoriozko hozte-efektua ere ikertu zuten [13], eraikinean sartzen den bero-fluxuaren arabera neurtuta. Eraikin batean orientazio bereko bi fatxada konparatuz, bata konbentzionala eta bestea landare-panelduna, ikusi zen egunean zehar landare-fatxadak 10 W/m²-tik beherako fluxuak erregistratzen zituela, eta ohiko fatxadan, berriz, fluxua 40 W/m²-rainoko tontorretara iristen zela. Bestalde, eraikinean sartzen zen fluxua arintzeari dagokionez, 4 orduko atzerapena erregistratu zen fatxadako tenperaturen igoeran, landaretzarik gabeko fatxadekin alderatuta.

Azken urteotan, azterketak egin dira landare-azalaren aurrean sortzen den aire barearen geruzaren eta hostoek eragindako itzaltzearen ondorioei buruz. Hong Kong-en egindako ikerketa batean [14] transmisio termodinamikoaren eredu bat garatu eta baliozkotu zuten, beroaren transmisioa eta landare-gainazaleko tenperatura-aldaketak simulatzeko, eta eguzki-babesaren eta itzaltzearen efektuetan sakontzeko.

Azkorak eta lankideek [15] landare-fatxadetarako azaleko erresistentzia termikoko koefiziente bat definitu zuten, landare-geruza bat duten itxi-

tura bertikalen inguruetan haizearen abiadura murriztean oinarrituta. Ikerketaren emaitzen arabera, landare-geruzak $0.7 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ handituko luke itxituraren erresistentzia termikoa.

Susorova-k eta lankideek [16] frogatu zuten uda garaian fatxadaren gainean landare-geruza bat gehitzeak tenperatura 0.7 tik $13.1 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra jaitsi dezakeela; bero-fluxua, berriz, kanpoko hormaren bidez 2 W/m^2 -tik 33 W/m^2 -ra, eta haren erresistentzia termiko eraginkorra 0.0 tik $0.7 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ -ra hobetu dezakeela. Hormaren erresistentzia termiko koefizientea aldatu egiten da hormaren orientazioaren, zona klimatikoaren eta landarearen ezaugarrien arabera, hosto-eremuaren indizearen eta indargabetze erradiatzailearen koefizientearen arabera.

Stec-ek eta lankideek [17] egindako horma bikoitzeko fatxada baten azterkuntzan ikusi zuten geruza bikoitzeko fatxada osatzen duen geruza bakoitzaren tenperatura, oro har, askoz txikiagoa dela landareen kasuan, aldameneko horma edo pertsianen kasuan baino. Eguzki-erradiazio bererako, instalazioaren tenperaturaren igoera pertsianena baino bi aldiz txikiagoa da, gutxi gorabehera. Gainera, instalazioko tenperaturak ez du inoiz $35 \text{ }^\circ\text{C}$ -ko tenperatura gainditzen; pertsianetakoak, berriz, $55 \text{ }^\circ\text{C}$ -tik gorakoak izan daitezke.

Landare igokarien landare-fatxada baten eta fatxada arrunt baten arteko konparazio-azterketan, [18] egiaztatu zuten tenperatura baxuagoa dela eta hezetasun-ehuneko handiagoa dagoela fatxada begetatuan eraikineko gainerako fatxada arruntetan baino. Fatxada begetatuko mahastiek tenperatura erregulatu eta tarte baten barruan mantentzen dute eta eguzki-energia bero sorra bihurtzen dute transpirazio-prozesuaren bidez, eta, beraz, landareak inguratzen dituen airearen tenperatura eta landareen hostoen gaineko tenperatura landareek itzaltzen ez dituzten fatxadetakoak baino baxuagoak dira.

Lan honetan landare-geruzak eraikinean duen portaera termikoa ebaluatzen da. Ingurutzaila osatzen duten elementuen ezagutza fisikoetan oinarrituz ekuazio diferentzialen multzoa aplikatzen da eta horrela kutxa griseko metodoa garatzen da. Metodoa energia-balantzean oinarritzen da, zeinak kanpoko tenperatura eta energia-fluxuak portaera termikoen ezaugarriak definitzeko erabiltzen dituen. Proposatutako metodoa horma bikoitzeko (Bare Wall-BW) fatxada biluzi batean aplikatu zen, eta haren gainean landaredun horma modular bat (Modular Living Wall-MLW) ezarri zen Paslink zelda monitorizatu batean.

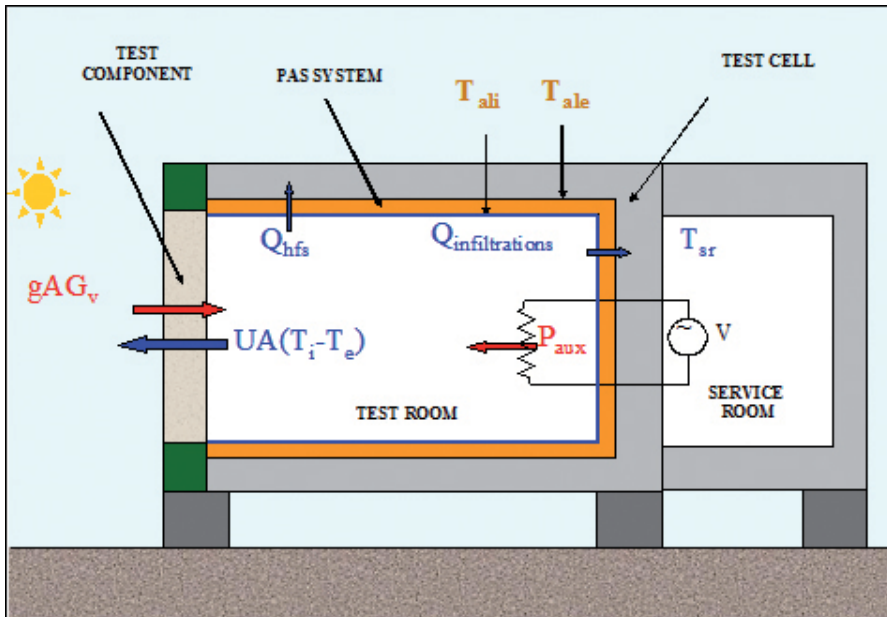
Ikerketa hau etorkizun handikoa da, eta lagungarri izan liteke VGSrekin lortutako energia-aurrezpena kuantifikatzeko erabil daitezkeen ereduak garatzeko, ingurumen-baldintza desberdinak dituen beste edozein tokitan. Eredu matematikoarekin eta aztertutako bi fatxadetan (BW eta MLW) lortutako emaitzekin, MLWren eraginkortasun energetikoan duen eragina

ebalatu daiteke, VGS duten eta ez duten eraikinen hobekuntza energetikoa kuantifikatzeko.

2. MATERIALAK

Esperimentuaren garapena Paslink zelda batean egin zen (1. irudia). Paslink zelda eskala errealeko proba-baldintzetan lortutako datuen analisian oinarritzen da, eta eraikuntza-elementuen ezaugarri termikoak lortzea du helburu. Paslink metodoari esker, landaredun fatxada modulareko elementuen erantzun termikoa aztertu zen, parametro termikoak zehazteko eta birgaitze termiko pasiboa egiteko.

Esperimentazio gunea Gasteizen dago, Araban, Espainiako iparraldean, Eusko Jaurlaritzaren Eraikuntzaren Kalitatea Kontrolatzeko Laborategiaren (LCCE) instalazioetan (latitudea: 42° 51N, longitudea: 2°41' W).



1. irudia. Energia-balantzearen eskema Paslink zelda batean. [19]

Paslink zelda kalorimetroek bezala jokatzen du: zehaztasun handiz neurtzen ditu trukutzen diren bero fluxuak, irabaziak zein galerak, kontrolatutako barne ingurunearen eta kanpokoaren artean. Horma oso isolatzailez osatuta dago, azterketa-azalera izan ezik, non landaredun fatxada modularren lagina jartzen den (hegoaldeko fatxada).

2.1. Ebaluatutako fatxaden deskribapena

Landaredun fatxada modular bat (MLW) jarri da orri bikoitzeko oinarri-horman (BW), Paslink zelda beraren hegoaldeko aurpegian (ikus 2. irudia). Helburua eraikuntzaren birgaitze-soluzioaren portaera termikoa ezau-garritzea eta energia modu pasiboan aurrezteko potentziala kuantifikatzea da.



a)



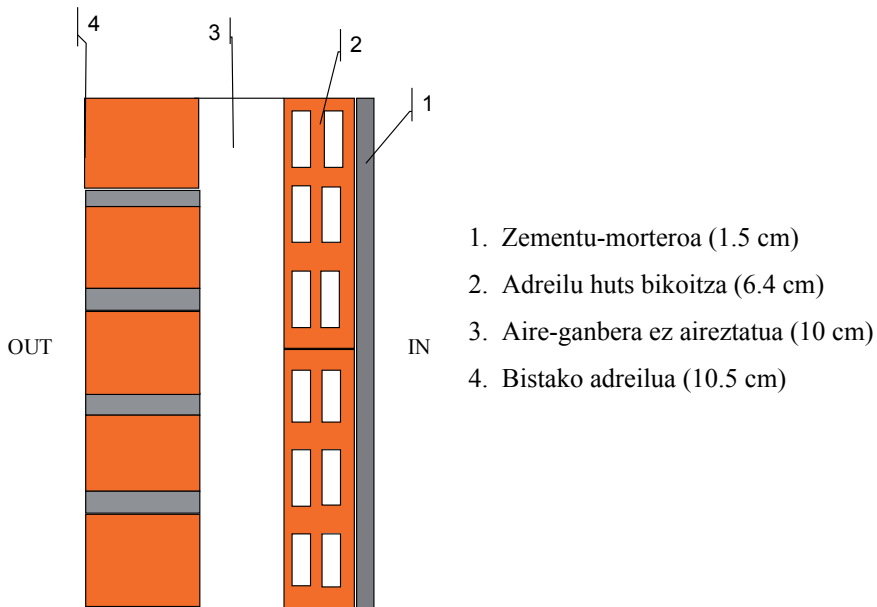
b)

2. irudia. Horma-soluzioak Gasteizko PASLINK zelda esperimentalean. Ezkerretik eskuinera; a) erreferentzia: orri bikoitzeko oinarri-horman (Base Wall-BW); b) Landaredun fatxada modularra (Modular Living Wall-MLW).

Probatutako laginen kanpoko neurriak $2,7 \times 2,7$ metrokoak dira (laginaren azalera $7,3 \text{ m}^2$). Eskala errealeko esperimentutzat har daitezke, baina baldintza kontrolatuetan egina.

2.1.1. Erreferentziatzko horma: orri bikoitzeko oinarri-horma (BW)

Orri bikoitzeko oinarri-hormak (BW) (ikus 3. irudia) honako geruza hauek ditu, barrutik kanpoaldera: zementuzko morteroa, 1,5 cm-ko lodierakoa; adreilu huts bikoitza ($32 \text{ cm} \times 14 \text{ cm} \times 6,4 \text{ cm}$); aire-ganbera ez aireztatua (10 cm); bistako adreilua ($22,8 \text{ cm} \times 49 \text{ cm} \times 10,5 \text{ cm}$).

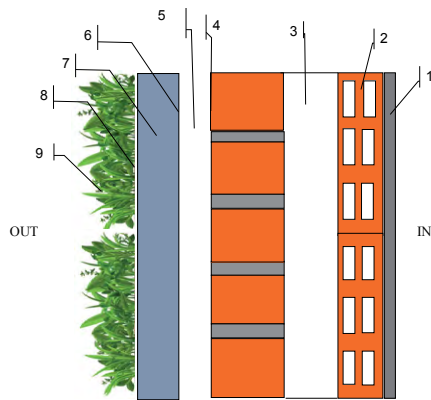


3. irudia. Aztertutako BWaren xehetasuna eta eraikuntza-sistemaren irudikapena.

2.1.2. Landaredun fatxada modularra MLW

Landaredun fatxada modularra BWaren gainean dago (1-4 geruza). Barrutik kanpora geruza hauek ditu: bosgarren geruza aireztatutako aire-ganbera (5 cm), geruza honen gainean altzairu herdoilgaitzezko oinarri metalikoa instalatzen da, moduluak ainguratzen diren torloju metalikoen bidez hormari lotuta. Seigarren geruza $600 \times 400 \times 80$ mm-ko polietileno birziklatuzko moduluen bidez eratutakoa da. Modulu hauek koko-zuntzezko substratuz beteta daude, zazpigarren geruza osatuz. Azkenik, zortzigarren geruza landaretza da. Kanpoko geruza zuhaixka beti-berde edo iraunkor bat da (*Helichrysum italicum*), proba honetan aukeratutako landareak fatxadari uniformetasuna bermatzeko eta Gasteizko negu hotzetan bizirauteko ongi egokitua dagoelako.

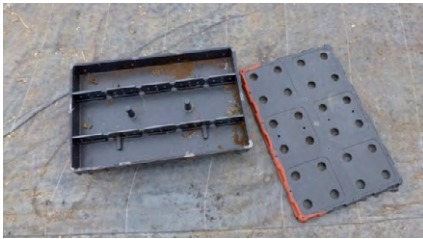
Moduluek, goialdean, itoginentzako lau sarrera dituzte, eta behealdean, drainatzeko bi irteera. Hermetikoki itxita daude, eta, beraz, estankoak direnez, ez da urik galtzen landare-fatxadaren barrualdetik; beraz, ez da beharrezkoa horma iragazgaiztea. Era berean, % 100eko estaldura duenez, ez da beharrezkoa horma entokatzea, egitura fatxadaren ainguratu baitaiteke zuzenean.



1-4 BW

- 5. Aire-ganbera aireztatua (5 cm)
- 6. Moduluen barnealdea
- 7. Substratua eta ureztatze-sistema (8 cm)
- 8. Moduluen kanpoaldea
- 9. Zuhaixka iraunkorra

4. irudia. Aztertutako MLWaren xehetasuna eta eraikuntza-sistemaren irudikapena.



a)



b)



c)



d)

5. irudia. (a) moduluen barnealdearen xehetasuna, (b) landareak erabat garatuta dituzten moduluak, (c) moduluaren atzealdeko xehetasuna, ainguraketa-egiturari eusteko kakoarekin (d) landaredun fatxadaren xehetasuna.

Barrualdean polietilenoazko bereizgailuak daude, barneko substratua homogeneoki zatituta dagoela bermatzeko. Modulu bakoitzak 5 kg-ko pisua du hutsik, 11 kg-ra iristen da substratua eta landareak lehorrean daudenean, eta 21 kg-raino, saturazio-egoeran daudenean.

2.2. Datuen eta sentsoreen eskuratzea

Proba honetan benetako ezaugarri klimatikoen erako eraiketa esperimentala egin da. Aukera ematen du tenperatura kontrolatuen eta bero neurtuaren bidez MLW soluzioen errendimendu termikoa aztertzeko. Literaturaren arabera [20], eraikuntzan energia aurrezteko tresna pasiboa kalkulatzeko eta alderatzeko parametro nagusia kanpoko fatxadaren azaleko tenperaturaren portaera termikoa da.

Ikerketa honetan aurkezten den ikuskapen-kanpaina bi fasetan egin zen; lehenengoa 2012ko ekainean egin zen (A datu-multzoa). Aldi horretan, orri bikoitzeko horma bertikala muntatu eta ikuskatu zen. Bigarrenik, 2014. urtean MLWaren instalazioa egin zen oinarritzko horman, eta bertan egin zen monitorizazioa (B datu-multzoa).

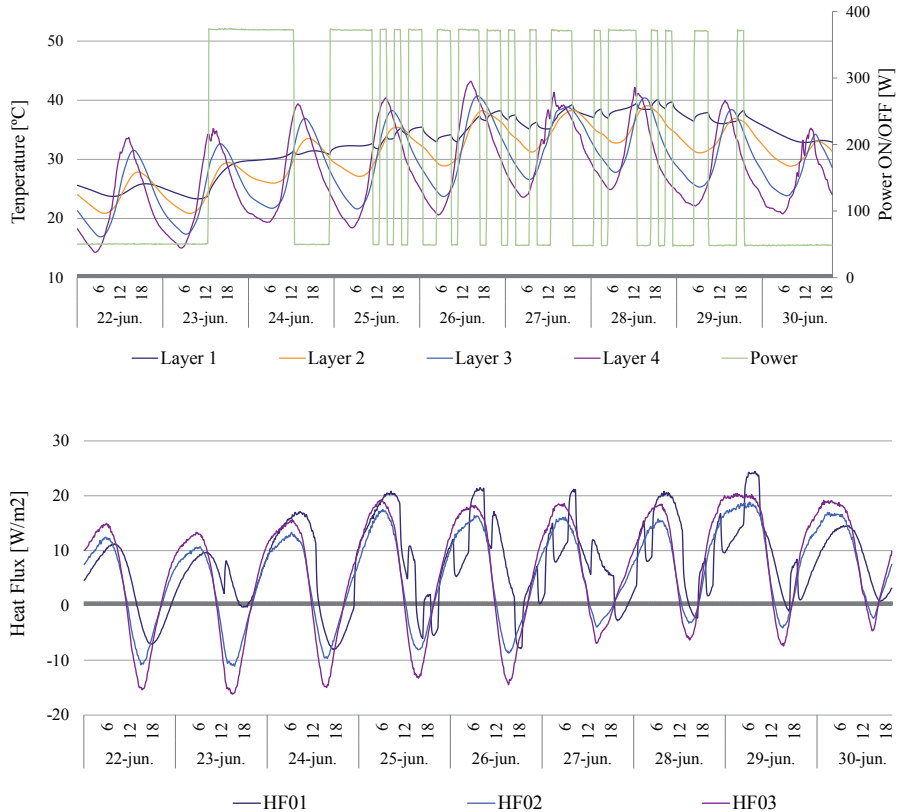
Paslink zelda datu-bilketaren instrumentazioa eta kontrola Paslink zelden neurketa- eta kalibrazio-eskuliburuetan ezarritako eskakizunen arabera egin dira [21-23]. Era berean, beharrezko sentsore guztiak instalatu dira (tenperatura, bero-fluxua, eguzki-erradiazioa, airearen tenperatura eta airearen abiadura) Paslink eskuliburuetakoz zehaztapenak betetz. Paslink zelda baterako sentsore estandarrak erabili ziren proba honetan, eta 1 minutuko tartearekin erregistratu ziren.

Erabilitako sentsoreak hauek dira: geruzaren tenperatura; platinozko lau termoresistantziarekin neurtu zen Pt100 (neurketaren zehaztasuna ± 0.1 °C); analisi honetarako lau seinale horien batez bestekoa $T_{\text{surf-out}}$ gisa hartu da. MLWaren aurreko aire-tenperatura; platinozko termoresistantzia batekin neurtzen zen Pt100 (neurketaren zehaztasuna ± 0.1 °C), erradiaziotik babestuta eta mekanikoki aireztatuta. Hezetasun erlatiboa; MLWaren aurrean neurtu zen AHLBORN FHA 646 E1 sentsore batekin (neurketaren zehaztasuna $\pm \% 2$). Azkenik, MLWaren eguzki-erradiazio bertikalaren gertaera; Kipp & Zonen CM11-P piranometro bat erabiliz erregistratu zen (neurketaren zehaztasuna $\pm \% 3$).

2.2.1. BWarene bero-fluxua eta klima-profilak (A datu multzoa)

Aurreko irudiei erreparatuz gero, hainbat alderdi zehaztu daitezke; batetik, lehenengo geruzan, tenperaturak erantzun azkarra ematen die laginketa-sekuentzian egindako potentzia-zikloei. Oinarri-horma osatzen duten geruzek (Geruza 1etik Geruza 4ra) joera bera dute, baina kanpoko geruzek antzeko tenperatura-oszilazioak dituzte egunez/gauez, kanpoan gertatutako

temperatura-aldaketekin alderatuta, eta aldaketa horiek eguzki-erradiazioa-
 rekin lotuta daude.



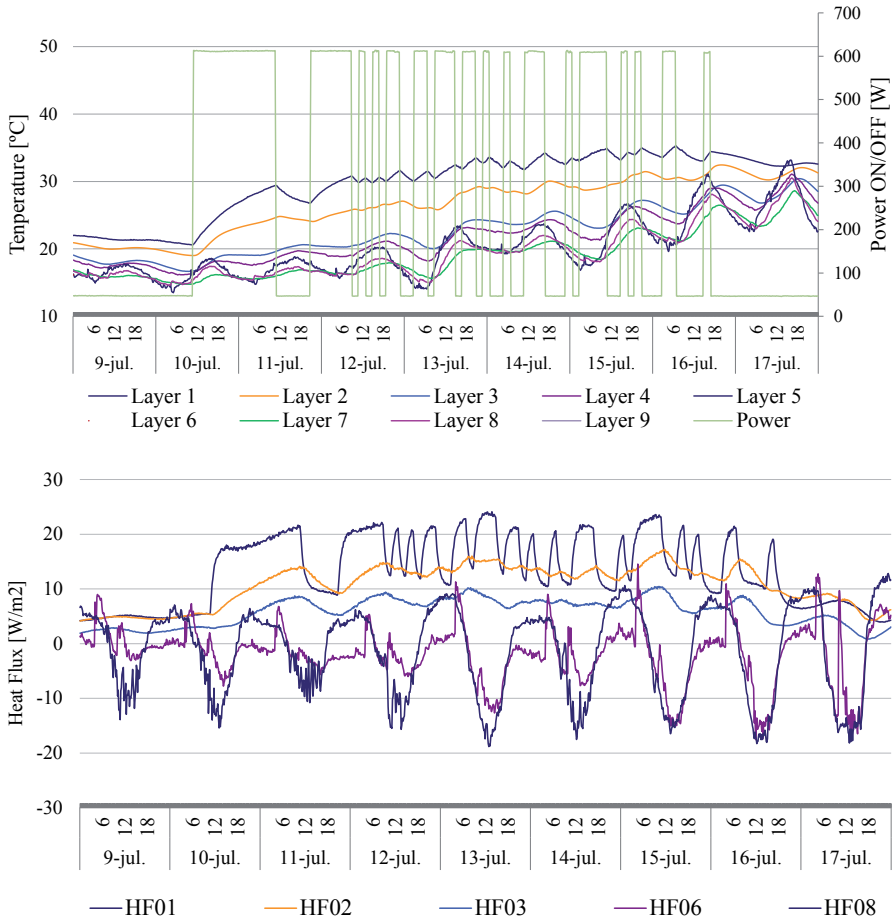
6. irudia. PRBS sekuentziak BWan eginak. Goian: laginaren geruzetako tenpe-
 raturen eboluzioa. Azpian: bero-fluxu sentsoeen eboluzioa laginaren geruzetan
 (1HFTO1-Geruz 1; 1HFTO2-Geruz 2; 1HFTO3-Geruz 3) PRBS sekuentzian
 zehar (ekaina).

Oinarrizko fatxadatik sartzen den bero-fluxua -15 W/m^2 -ko balioetara
 iristen da egunaren erdiko orduetan, eta eguzki-erradiaziorik ez dagoen or-
 duetan, hau da, gaueko orduetan, positibo bihurtzen da balio hori.

2.2.2. MLWaren bero-fluxua eta klima-profilak (B datu multzoa)

Landaredun-sistema bertikalak kanpoko gainazalean duen ondorioe-
 tako bat da eguzki-erradiazioa hormara iristea eragozten duela. Gainaza-
 leko temperatura ez handitzea ziurtatzen du horrek. Efektu hau 7. irudian

ikus daiteke, non kanpoko eta barruko azaleko tenperaturak agertzen diren airezko tenperaturarekin alderatzen diren.



7. irudia. PRBS sekuentziak MLWan egindako sekuentziak. Goian: laginaren geruzetako tenperaturen eboluzioa. Azpian: Bero-fluxu sentsoreen eboluzioa laginaren geruzetan (1HFTO1-Geruzeta 1; 1HFTO2-Geruzeta 2; 1HFTO3-Geruzeta 3; 1HFTO6-Geruzeta 6; 1HFTO8-Geruzeta 8 PRBS sekuentzian zehar (uztaila).

Lehen esan bezala, argi dago BWko azken geruzan tenperatura MLWko kanpoko geruzaren tenperatura baino handiagoa dela. 24 orduko aldietan erregistratutako tenperatura maximoa BWan (40-43 °C) altuagoa da MLWarekin erregistratutako tenperatura maximoa baino (31-34 °C), kanpoko airearen tenperaturaren (31-34 °C) eta eguzki-erradiazioaren maximoaren (500 W/m²) balio berean.

MLWaren eta BWaren arteko alderaketak erakusten duenez, kanpoko airearen temperatura berean (31-34 °C) MLWak horien azpiko balioak ditu, 32 °C gainditu gabe, eta adreiluzko fatxadak, berriz, 40 °C. Argi dago MLWko temperatura kanpoko airekoa baino baxuagoa dela egunez. Fatxada berdeak eragindako tenperatura-jaitsierak nabarmenagoak dira bero-ordu gorenetan. Gainera, kanpoko gainazaleko tenperatura kanpoko airearen tenperatura baino baxuagoa da beti. Azaleko tenperaturaren beherakada hau lurruntzearen, eguzki-babesaren eta substratuaren eta landare-fatxadak eskaintzen duen aire-geruzaren erresistentzia termiko gehigarriaren ondorio konbinatuen ondorioa da ziurrenik.

3. METODOLOGIA

Paslink metodologia fisikoki interpretatutako eredu bat lortzeko erabiltzen da, identifikazio-sistema termikorako tresna estatistikoak erabiltziz [49]. Abiapuntua RC greybox edo kutxa grisaren eredu kontzentratu bat da, denbora jarraituko ekuazio diferentzial arrunten multzo bat lotzen duena denbora diskretuko uneetan lortutako neurketa datu multzo batekin.

Saio honetan Paslink zeldetan bildutako datuen erabilera aurkezten da RC sare batean oinarritutako MLW sistema pasibo bertikaletarako kutxa grisaren eredu definitzeko. Estatuko espazio-ereduak: fatxada osatzen duten elementuak erresistentzien eta kapazitateen bidez irudikatzea, eraikin baten dinamika termikoa denbora inbarianteko sistema lineal gisa modelatzeko. Kutxa grisak modelatzea prozedura iteratiboa da, eredu sinpleago batetik hasi eta gero eta konplexuagoa, eredu on bat lortu arte. Geruza antzeko inguratzaila bi erresistentzia termikok, kondentsadore batek eta barne-nodo batek soilik defini dezakete [24].

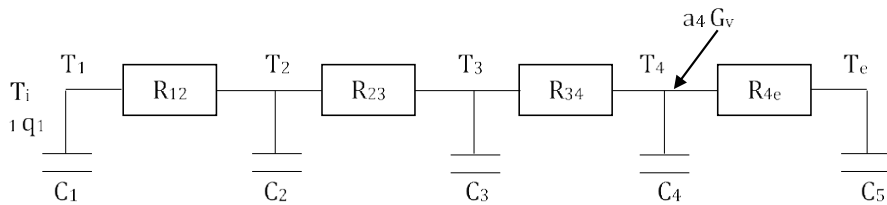
Fatxada pasiboaren muntaia esperimentalak BWan eta Paslink zelda berean tenperatura eta bero-fluxua kontrolatzeko probak ahalbidetzen ditu. Neurketa aktiboak egiteko, karga termiko artifizial bat aplikatu behar zaio Paslink zeldari. Batez besteko tenperatura-aldea 20 °C-koa izan behar da, gutxi gorabehera, probatutako osagaiaren barnealdearen eta kanpoaldearen artean, datu multzo fidagarriak lortzeko, eta ondoren datuak analizatzeko. Paslink zelden saiakuntza-gelan sortzen diren berotze- edo hozte-seinaleek ez dute kanpoko tenperaturarekin erlazionatuta egon behar; bestela, neuritutako datu dinamikoak aztertzean, datuen analisi-teknikek ezin izango dute aztertutako osagaien tenperatura-portaera termikoa behar bezala karakterizatu.

Horregatik guztiagatik, PRBS (PseudoRandom Binary Sequence) seinaleak [25] maiztasun baxuko errutina, berokuntza edo hozte-seinale gisa erabili dira 60 minutuko urratseko probetan.

Eraikuntza-soluzioak osatzen zituzten geruza bakoitzaren erresistentzia termikoa ezaugarritu zen. Erresistentzia termikoa eroankortasun termikoa-
ren eta geruza bakoitzaren lodieraren arabera da; geruzan zehar bero-
fluxuarekiko erresistentzia-indizea da. Zenbat eta geruzak erresistentzia ter-
miko handiagoa izan, orduan eta isolamendu-ahalmen handiagoa izango du.

3.1. BWko RC sare termikoa (A datuak)

Garatutako RC eredu BWaren portaera termikoa erreproduzitzeko gai da. Eredua garatzeko, Paslink sareak deskribatutako parametroak modela-
tzeko teknikak erabili ziren (parametroen identifikazio teknika), eta pro-
zesu iteratibo baten bidez aplikatu ziren. RC eredu lortu ondoren, zenba-
kizko eredu bihurtu zen, eta horrek BW kalkulatzeko ahalbidetu zuen aldi
bakoitzeko. Azkenean, zenbakizko eredu hau udako girorako monitorizatu-
tako geruza guztien informazioarekin balioztatu zen. Beraz, BWraiko azken
eredua RC sareak irudikatu zuen.



8. irudia. RC sarea, BWaren ezaugarri termikoak zehazteko.

Jarraian, 1 geruzan gertatzen den bero-transferentziako prozesuaren ekuazio diferentzial estokastikoak agertzen dira. Ekuazio honek berogai-
luaren eta eguzki-erradiazioaren bero-sarrera hartzen du kontuan, bai eta
1 geruzaren barnealdetik datorren bero-fluxua ere (eroalea).

$$dT_1 = \left(\frac{1}{C_1 \cdot R_{12}} (T_2 - T_1) + \frac{a_1 \cdot q_1}{C_1} \right) dt \quad \text{Ek. 1}$$

$$dT_2 = \left(\frac{1}{C_2 \cdot R_{12}} (T_1 - T_2) + \frac{1}{C_2 \cdot R_{23}} (T_3 - T_2) \right) dt \quad \text{Ek. 2}$$

$$dT_3 = \left(\frac{1}{C_3 \cdot R_{23}} (T_2 - T_3) + \frac{1}{C_3 \cdot R_{34}} (T_4 - T_3) \right) dt \quad \text{Ek. 3}$$

$$dT_4 = \left(\frac{1}{C_4 \cdot R_{34}} (T_3 - T_4) + \frac{1}{C_4 \cdot R_{4e}} (T_e - T_4) + \frac{a_4 \cdot G_v}{C_4} \right) dt \quad \text{Ek. 4}$$

$$dT_e = \left(\frac{1}{C_5 \cdot R_{4e}} (T_4 - T_e) \right) dt \quad \text{Ek. 5}$$

Sistema jarraituaren ekuazioak ekuazio diferentzial estokastiko akoplatuak dira. Neurtutako balioak honako hauek dira: T_1 eta T_4 arteko temperatura geruzak, 1 geruzako bero fluxua (q_1), erradiazio bertikal globala (G_v) eta kanpoko aire temperatura (T_e). Ondorioz, hormako erresistentzia terminoak (R_{12} , R_{23} , R_{34} eta R_{4e}) eta kapazitantziak (C_1 , C_2 , C_3 , C_4 eta C_5) kalkula daitezke.

q_1 , G_v eta T_e aldagaiak modeloarentzako datuak dira eta denbora-tarte gutzietarako ezagutzen dira, neurtutako balioak baitira.

LORD programaren denbora-tarteetarako datuak erabiliz, gainerako temperaturak kalkulatu dira. Softwareak, irteerako aldagaiak definitu ondoren, sistemaren parametroen balioak kalkulatu ditu eta funtzio objektiboak minimizatzea lortzen duen arte erabiltzen ditu.

Horregatik, kutxa griseko modeloak denbora espazioaren eredu linealean formulatzeber dira eta bero-transferentzia deskribatzen dute zenbait eraikuntza-sistemaren bidez (BW eta MLW). Eredu estokastiko bat lortzen da; izan ere, zaratatzen jotzen diren efektuak ez dira ematen aipatutako eredu akusatiboan. Kasu honetan, egindako neurrien errorea edo zarata honela adieraziko litzateke:

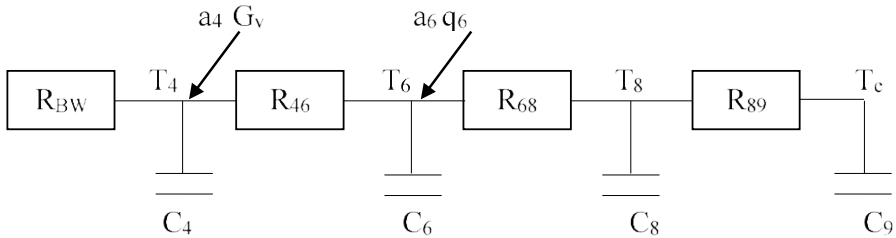
Izan ere, zaratatzen hartzen diren efektuak ez dira aipatzen eredu akusatibo horretan.

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\varepsilon_k(\theta)\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left((T_{\text{Layer1,obs}} - T_{\text{Layer1,calc}}) \right)^2 \quad \text{Ek. 6}$$

Atal honetan erabilitako prozedura berari jarraituz (RC eredu), oinarriko horma osatzen duten osagai edo geruzen bero-transferentziako parametroak kalkulatu dira, hau da, 2. geruzatik 3. geruzara eta 3. geruzatik 4. geruzara. Horrela, osagai horiek ezaugarritzen dituzten gainerako parametroak kuantifika daitezke.

3.2. MLWko RC sarea (B datuak)

2014ko uztailearen 8tik 16ra egindako PRBS sekuentziak erabili ziren MLWaren parametro termikoak kalkulatzeko.



9. irudia. RC sarea, MLWaren ezaugarri termikoak zehazteko.

Lehenik eta behin, beroa transferitzeko prozesua arautzen duten ekuazioak 9. irudian aurkezten dira (ekuazioaren unitate guztiak $[W/m^2]$ -tan daude).

$$dT_4 = \left(\frac{1}{C_4 \cdot R_{46}} (T_6 - T_4) + \frac{a_4 \cdot G_v}{C_4} \right) dt \quad \text{Ek. 7}$$

$$dT_6 = \left(\frac{1}{C_6 \cdot R_{46}} (T_4 - T_6) + \frac{1}{C_6} (T_8 - T_6) \frac{a_6 \cdot q_6}{C_6} \right) dt \quad \text{Ek. 8}$$

$$dT_8 = \left(\frac{1}{C_8 \cdot R_{68}} (T_6 - T_8) + \frac{1}{C_8 \cdot R_{89}} (T_9 - T_8) \right) dt \quad \text{Ek. 9}$$

$$dT_e = \left(\frac{1}{C_9 \cdot R_{89}} (T_8 - T_e) \right) dt \quad \text{Ek. 10}$$

Non q_6 (kasu honetan HF06) eta $T_9 = T_e = \text{ATE01}$ eta G_v , T_4 (4. geruzako tenperatura) irteera gisa hartuko den. LORD softwareak sarrera eta irteera horiek erabiliko ditu kasu bakoitzerako parametroak identifikatzeko.

Kontutan hartu behar da q_6 , G_v eta T_9 aldagaiak modeloarentzako datuak direla eta denbora-tarte guztietarako ezagutzen direla, neurtutako balioak baitira.

Sarrerako datuak $k = 1$, N denbora-tarteetarako erabiliz, LORD softwareak gainerako tenperaturak kalkulatu ditu. Irteerako aldagaiak definitu ondoren, softwareak ekuazio-sistemaren parametroen balioak kalkulatu ditu, funtzio objektiboa minimizatzea lortu arte. Kasu honetan, honela adieraziko litzateke:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\varepsilon_k(\theta)\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left((T_{Layer4, obs} - T_{Layer4, calc}) \right)^2 \quad \text{Ek. 11}$$

4. EMAITZAK

Lan honen helburua izan da garatutako metodologiaren eraikuntzako soluzio bertikal pasibo baten errendimendu termikoa ebaluatzea, Paslink zelda batean neurtutako datuetan oinarrituta, eta hainbat agertoki alderatzea (BWareen birgaikuntzaren aurretik eta ondoren).

Atal honen xede nagusia da azterlan honetan aurkeztutako fatxadak osatzen dituzten elementuen ezaugarri diren parametro termikoak deskribatzea. Horretarako, aurreko puntuan deskribatutako oinarrizko hormaren eta birgaitze-elementu pasiboaren erresistentzia termikoa eta gaitasun termikoa kalkulatu dira, Eraikuntzaren Kode Teknikoak (CTE) [26] E eranskinean ezarritako baldintzetan.

4.1. BWareen ezaugarri termikoak

Oinarrizko horma osatzen duten eraikuntza-elementuen parametroen identifikazioaren emaitzak honako taulan (Ikusi 1. taula) ikus daitezke:

1. taula. BWareen RC ereduaren emaitzak osatzen dituzten geruzen emaitza termikoa:

Geruza	U [W/°C m²]	R [°C m²/W]	C [kJ/°C m²]	Hondarra
Geruza 1-2 Zementu-morteroa 1.5 cm + adreilu huts bikoitza 6.4 cm	3.84	0.26	153.74	0.18
Geruza 2-3 aire-ganbera ez aireztatua 10 cm	2.70	0.37	0.00	0.19
Geruza 3-4 bistako adreilua 10.5 cm	8.33	0.12	65.40	0.18
∑ Geruza 1-4	1.33	0.75	219.14	—

1. taulan ikus daitekeenez, zementuzko morteroz eta adreilu bikoitz hutsez osatutako BW osatzen duen lehen geruzak 0.26 °C m²/W-ko erresistentzia termikoa du. Bigarren geruzaren balioa (non – aireztatutako gabeko aire-ganbera) 0.37 °C m²/W-ko erresistentzia termikoa du. Azkenik,

aurrealdeko bistako adreiluz osatutako geruzak gainerako osagaien erresistentzia termikoaren heren bat du.

Kanpo-soluzio konstruktiboaren eguzki-irradiazioak sortzen duen bero-fluxua ez da berehala eraikinaren barruko airera eramaten, lehenik geruzan edo eraikuntza-elementuan biltegitratzen da eta ondoren askatu egingo da, elementuaren kapazitatearen arabera.

4.2. MLW ezaugarri termikoen neurketa

Landaredun fatxada osatzen duten elementu eraikitzaileen parametroen identifikazioaren emaitza hurrengo taulan aurki daiteke (ikusi 2. taula):

2. taula. MLWren RC ereduaren emaitzak osatzen dituzten geruzen emaitza termikoa:

Geruza	U [W/°C m ²]	R [°C m ² /W]	C [kJ/°C m ²]	Hondarra
Geruza 1-4 (BW)	1.33	0.75	205.56	0.94
Geruza 4-6: aire-ganbera aireztatua 5 cm	10.00	0.10	0.00	—
Geruza 6-8: MLW modulua+substratua 8 cm	4.34	0.23	96.12	0.26
Geruza 8-9: landareak 50 cm	7.14	0.14	12.03	0.64
∑ Geruza 1-9 (MLW)	0.82	1.22	313.71	—

2. taulan MLW osatzen duten geruzen parametro termikoak agertzen dira. Aire-ganbera aireztatuak (Geruza 4-6) 0.10 °C m²/W-ko erresistentzia termikoa du, landare-moduluak 0.23 °C m²/W-koa eta, azkenik, landaretzak 0.14 °C m²/W-koa. Beraz, eraikuntza-soluzioaren isolamenduan duen eragin positiboa MLWari esker gauzatzen da, eraikuntza-elementu hau gehitzeak hasierako BWaren isolamendua hobetzen baitu.

Udako urtaroen kasuan lortutako balioak aztertuta, momentu honetan, fatxadak erradiazio handiena eta kanpoko tenperatura maximoa jasotzen dituenean, une honetan erosotasunaren interesa kanpoko geruza hoztean datza. Hormaren tenperatura murriztea landare-fatxadak eragiten du, eta horrek tenperatura modu pasiboan murrizteko gailu egokiak bihurtzen ditu fatxadak. Itxitura bat berritu nahi bada bero-galerak murrizteko, komeni da isolamendu-geruza bat gehitzea oinarrizko horman, landaredun fatxadaren aurretik.

MLWan hobekuntzak erakusten dituzte ezaugarri termikoek. Kasu honetan, oinarrizko hormaren 0.75 W/(m² °C)-tik 1.22 W/(m² °C)-ko transmi-

sio termikoko balioetara igaro zen, isolatzeko ahalmenaren % 30ko igoera, alegia.

5. ONDORIOAK

Birgaitze termikoa landare-fatxada modular baten bitartez egin zen, aukeratutako landare-fatxada isolatzailerik gabe eraiki zen, hau da, landare-moduluak, substratua eta landareetatik kanpo ez zen elementu isolatzailerik jarri, modu honetan landare-fatxadaren zeharkako bero-fluxuak hobekien ezaugarritzeko.

Erosotasun termikoa handitzeak esan nahi du kanpoko muturreko tenperaturek (udakoek zein negukoek) eraikinaren barruko tenperaturan duten eragina murriztea, eta, horrela, energia-beharrak murriztea, barneko tenperatura egonkor mantentzeko, dela hoztearen edo dela berokuntzaren bidez. Erresistentzia termikoaren (R) balioa nabarmen hobetu da hasierako horma bikoitzaren $0.75 \text{ }^\circ\text{C m}^2/\text{W}$ -ko balioekin alderatuta, landare-fatxadaren akoplamenduari esker $1.22 \text{ }^\circ\text{C m}^2/\text{W}$ -ra hobetu baita.

Datu esperimentalek erakusten dute landaredun horma modularrak eraikinaren kanpoko geruzaren tenperatura murrizten duela, eta batez ere eguneko beroketa murrizten duela. Landaredun fatxada modularraren gainazaleko tenperaturari dagokionez, emaitzek baieztatzen dute esanguratsua dela gainazal begetatuaren ondoriozko hozte-efektu potentziala. Tenperatura $10 \text{ }^\circ\text{C}$ jaisten da udako egunez. Hozte horren bitartez egiazta daiteke landaredun fatxada modularraren hozte-ahalmena. Horregatik, landaretzaren eta eraikuntzako isolamendu-materialen erabilera komunak azalerak hozteko sistemak garatu ditzake, biztanleen erosotasun termikoa eta energia aurrezteko helburu dutenak. Landaretzaren efektua aztertuz gero, gainazaleko tenperaturetan gauzatzen da eta landareen itzalaren ondorioz gertatzen da. Gainazalekin kontaktuan dagoen airea babesturik gelditzen da eta ez da berotzen.

Eraikuntza-soluzio hori erabiltzeak eraikinen tenperatura jaitea ekarriko luke bero-garaian; horrez gain, erabiltzaileen erosotasuna handituko luke eta energia-eskaera murriztu. Hotz garaian, aldiz, hozte pasiboaren efektua negatiboa izango litzateke, baina kontuan izan behar da neguan txikiagoak direla eguzki-erradiazioa eta tenperatura, eta, beraz, landareen ebapotranspirazio ahalmena ere murriztu egiten dela. Saiakuntza horretatik ondorioztatzen da posible dela landare-fatxadaren portaera energetikoa hobea izatea isolatzaile bat instalatuta jatorrizko fatxadaren eta landare-fatxadaren artean. Horrek hobetu egingo luke haren portaera termikoa, bai udan bai neguan.

ESKER ONAK

Proiektu hau Eusko Jaurlaritzaren eta Euskal Herriko Unibertsitatearen (UPV/EHU) arteko hitzarmenari esker gauzatu da, Eusko Jaurlaritzako Eraikuntza Kalitatearen Kontrolerako Laborategiko Termika Arloa (LCCE) kudeatu eta garatzeko ENEDI ikerketa-taldearen bitartez.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BANO P, DERVISHI S. The impact of vertical vegetation on thermal performance of high-rise office building facades in Mediterranean climate. *Energy Build* 2021;236:110761.
- [2] AZKORRA-LARRINAGA Z, ERKOREKA-GONZÁLEZ A, FLORES-ABASCAL I, PÉREZ-IRIBARREN E, ROMERO-ANTÓN N. Defining the cooling and heating solar efficiency of a building component skin: application to a modular living wall. *Appl Therm Eng* 2022;210:118403.
- [3] VIECCO M, JORQUERA H, SHARMA A, BUSTAMANTE W, FERNANDO HJS, VERA S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Build Environ* 2021;204:108120.
- [4] MARCHI M, PULSELLI RM, MARCHETTINI N, PULSELLI FM, BASTIANONI S. Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. *Ecol Model* 2015;306:46-56.
- [5] YSEBAERT T, KOCH K, SAMSON R, DENYS S. Green walls for mitigating urban particulate matter pollution—A review. *Urban Forestry & Urban Greening* 2021;59:127014.
- [6] AZKORRA Z, PÉREZ G, COMA J, CABEZA LF, BURES S, ÁLVARO JE *et al.* Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Appl Acoust* 2015;89:46-56.
- [7] BERTHON K, THOMAS F, BEKESSY S. The role of ‘nativeness’ in urban greening to support animal biodiversity. *Landscape and urban planning* 2021;205.
- [8] COLLINS R, SCHAAFSMA M, HUDSON MD. The value of green walls to urban biodiversity. *Land Use Policy* 2017;64:114-23.
- [9] EUMORFOPOULOU EA, KONTOLEON KJ. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Build Environ* 2009;44:1024-38.
- [10] VOX G, BLANCO I, CONVERTINO F, SCETTINI E. Heat transfer reduction in building envelope with green façade system: A year-round balance in Mediterranean climate conditions. *Energy Build* 2022;274:112439.
- [11] WONG I, BALDWIN AN. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region. *Build Environ* 2016;97:34-9.

- [12] PÉREZ G, RINCÓN L, VILA A, GONZÁLEZ JM, CABEZA LF. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Appl Energy* 2011;88:4854-9.
- [13] AHSAN MM, CHENG W, HUSSAIN AB, CHEN X, WAJID BA. Knowledge Mapping of Research Progress In Vertical Greenery Systems (VGS) From 2000 To 2021 Using CiteSpace Based Scientometric Analysis. *Energy Build* 2021:111768.
- [14] ABDUL NASIR MH, HASSAN AS. Thermal performance of double brick wall construction on the building envelope of high-rise hotel in Malaysia. *Journal of Building Engineering* 2020;31:101389.
- [15] AZKORRA-LARRINAGA Z, ERKOREKA-GONZÁLEZ A, MARTÍN-ESCUADERO K, PÉREZ-IRIBARREN E, ROMERO-ANTÓN N. Thermal characterization of a modular living wall for improved energy performance in buildings. *Build Environ* 2023:110102.
- [16] SUSOROVA I, ANGULO M, BAHRAMI P, Brent Stephens. A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Build Environ* 2013;67:1-13.
- [17] STEC WJ, VAN PAASSEN, A. H. C., MAZIARZ A. Modelling the double skin façade with plants. *Energy Build* 2005;37:419-27.
- [18] KOYAMA T, YOSHINAGA M, HAYASHI H, MAEDA K, YAMAUCHI A. Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Build Environ* 2013;66:96-103.
- [19] JIMÉNEZ MJ, MADSEN H. Models for describing the thermal characteristics of building components. *Build Environ* 2008;43:152-62.
- [20] COMA J, PÉREZ G, DE GRACIA A, BURÉS S, URRESTARAZU M, CABEZA LF. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Build Environ* 2017;111:228-37.
- [21] VAN DER LINDEN, G. P, VAN DIJK, H. A. L, LOCK AJ, VAN DER GRAAF F. COMPASS Installation guide HFS Tiles for the PASSYS Test cells. 1995DOI.
- [22] PASSYS Operations Manual. 1993DOI.
- [23] VAN DIJK, H. A. L, VAN DER LINDEN, G. P. PASLINK Calibration and Component Test Procedures., 1995DOI.
- [24] RAMALLO-GONZÁLEZ AP, EAMES ME, COLEY DA. Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions. *Energy Build* 2013;60:174-84.
- [25] LETHERMAN KM, PALIN CJ, PARK PM. The measurement of dynamic thermal response in rooms using pseudo-random binary sequences. *Build Environ* 1982;17:11-6.
- [26] CTE. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. Documento Básico HE 1. Ahorro de energía. *BOE* 25/01/200. DOI.