

Altzairu-egur petral hibridoen optimizazioa

(Optimisation of Hybrid Steel and Wood Purlins)

Juan Luis Osa¹, Harkaitz García^{2*}, Mikel Zubizarreta³, Jesus Cuadrado⁴

¹ Ingeniaritza Mekanikoa Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Eibar

² Ingeniaritza Mekanikoa Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Donostia

³ Enpresen Antolakuntza Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Donostia

⁴ Ingeniaritza Mekanikoa Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Bilbo

LABURPENA: Lan honetan altzairu-egur petral hibrido (*steel-wood purlins*, SWP) baten egiturazko tipologia berri bat aurkezten da, CF (*cold-formed*) motako hotzeko konformazio altzairuz eta egur laminatu errektangularrez osatua. Horrela, egurrezko petralak altzairuzko zati batzuekin indartuz, hobekuntza nabarmenak lortzen dira zabalduen dauden altzairuzko petralekiko. Egurrezko sekzioa ahulagoa izan arren eta altzairuak baino modulu elastiko baxuagoa duen arren, SWPren dimentsioa ez da CF motako altzairuzko petralarena baino handiagoa izango. Altzairuzko aldean, SWP petralek mantenu-lan gutxiago dutenez eta arinagoak direnez, eraikinaren egitura nagusiak ere material gutxiago beharko du. Material bakoitzak egituraren duen disposizioaren arabera portaera mekanikoan duen eragina aztertzen da, argia eta diseinu karga aintzat hartuta. Horretarako, tentsio normala eta geziaren diseinu-irizpideak aztertzen dira argi bakoitzean material bakoitzaren luzeraren arabera. SWPren kalkuluan hurbilpen analitikoak erabili da, zeinak bete egiten baitituen diseinu-eskakizun teknikoak.

HITZ GAKOAK: jasangarritasuna, egurrezko egiturak, altzairuzko egiturak, diseinu-gida.

ABSTRACT: A new structural typology of a hybrid purlin, made of type CF cold-formed steel and rectangular laminated wood (*steel-wood purlins*, SWP) is presented in this paper. As a result, improvements on the most commonly used steel purlins are achieved, by reinforcing wood purling with steel sections in certain zones. Although the wooden section is weaker and has a lower elastic modulus than the steel, the overall dimensions of the SWP are no larger than the type C steel purlin. In comparison with the steel ones, SWP purlins achieve a far better performance in terms of sustainability and are of lower weight, so less material will be needed for the main structure of the building. The behaviour of each material in its position and the improvements in terms of sustainability and lower weight are analysed as a function of span length and design load. To do so, the influence of both tensile stress and deformation design criteria in each section and the influence of those criteria on the choice of material and the lengths of each section are all examined. An analytical approach has been used in the design of the SWPs which fulfils the technical requirements.

KEYWORDS: sustainability, wooden structures, steel structures, design guide.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Harkaitz García. Ingeniaritza Mekanikoa Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Europa 1 (20018 Donostia). – arkaitz.garcia@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-4963-638X>.

Nola aipatu / How to cite: Osa, Juan Luis; García, Harkaitz; Zubizarreta, Mikel; Cuadrado, Jesus (2022). «Altzairu-egur petral hibridoen optimizazioa»; *Ekaia*, ale berezia 2022, 109-130. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.23168>).

Jasotze-data: 2021, azaroak 9; Onartze-data: 2022, urtarrilak 27

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2022 UPV/EHU



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

1. SARRERA

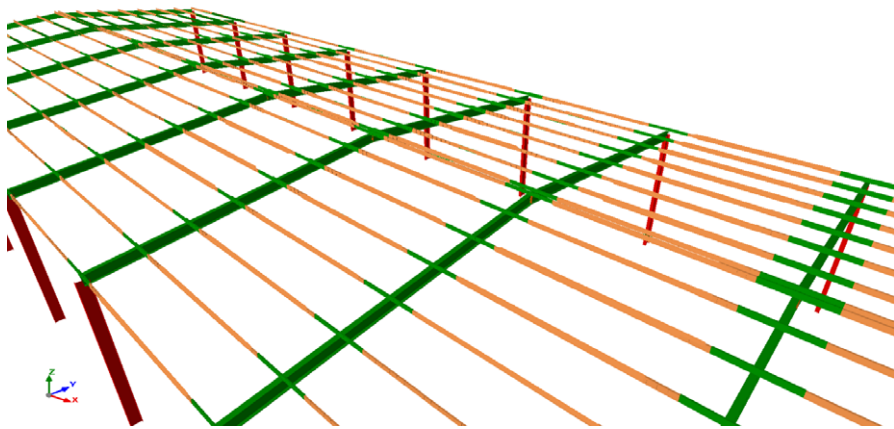
Eraikuntzaren sektorea baliabide naturalen eta energiaren kontsumitzaile nagusietako bat da; berotegi-efektuko gasen herena sortzen du, eta energia osoaren % 40 kontsumitzen [1]. Munduko baliabideen % 30 eta ur-baliabideen % 12 xahutzen du sektore horrek, eta, gainera, zabortegetan amaitzen duten hondakinen % 30-40ren erantzule da. Sektore horretara bideratutako hainbat ekintzak jasangarritasun handiagoko materialen erabilera ipini dute arreta, hau da, birziklagarriak, berrerabilgarriak edo berez berriztagarriak diren materialetan, hala nola jatorria basoetan duten materialetan [2]. Denbora beharko da ohiko eraikuntza-materialak ordezkatzeko. Nahiz eta tekniken garapena geldiezina izan, lobbyak aldaketen aurka daude berehalako etekin ekonomikoak profitatzeko. Enpresek, hala ere, gizartearen eskaerak entzun beharko lituzkete, gure atzetik datozei etorkizun duina bermatu ahal izateko [3, 4].

Hainbat eredu garatu dira eraikinen eta horiek osatzen dituzten materialen eta osagaien jasangarritasuna aztertzeko. Era berean, hainbat lan aurkeztu dira eraikinen ohiko egituren (hormigoia, altzairua eta egurra) jasangarritasun globala eta kostuak ebaluatzeko. Horien artean, Caruso *et al.*-ek bizi-zikloaren azterketan oinarritutako eraikuntzen ingurumen-jasangarritasunaren ebaluazio konparatua egiteko metodologia proposatzen dute [5]. Horrela gaur egun, material jasangarri gisa egurra erabiltzeko joera dago eraikuntza-industrian [6, 7, 8], eta gobernuen araudiak egurrezko egituren erabilera bultzatzen dute ingeniariaren eta arkitektoen artean [9]. Gainera, hainbat lanek frogatu dute karbono emisioen murrizketak lehenago lortzen direla egurrezko eraikuntza-tipologiak garapen-plangintzan barneratuta dauzkaten hirietan [10, 11].

Egurra material natural ezaguna da. Arbolek, beren hazkundera, fotosintesiaren bidez oxigenoa askatzen dute zuntz egitura molekularrak dituen material solidoa sortzeko [12]. Hau da, naturak eguzkiarekiko eta urarekiko erreakzio kimikoengatik sortzen duen materiala da egurra, non CO₂-a (berotegi-efektuaren eragile nagusienetakoa) egurrean metatuz hazten den heinean xurgatzen duen. Arbola batek, fotosintesiaren bidez, metro kubikoko CO₂ tona baliokide bat xurgatzen du, batez beste. Arbola baten bizitzan sortutako eta prozesatutako egurrean gordetako CO₂-a da atmosferaren hustuleku nagusia. Horrela, egurrak ingurumenerako onuragarria den karbono-aztarna negatiboa du. Arbolen bizitza amaitzean, eraikuntza-lehengai erakargarri bihurtzen da sortu duen egurra, hala nola atea, leihoak eta egitura-elementuak egiteko [13]. Hala ere, eragotzi egin behar da egur ez-berrerabilgarriaren deskonposizioa, partikula-tauletan berrerabiliz, pellet moduan erregai gisa edota kogenerazio-zentroetan errausketa bidez energia lortzeko [14, 15].

Egurrezko egitura duten eraikuntzek, nahiz eta ingurumen-jasangarritasunaren ikuspuntutik egokienak izan, muga dimentsionalak dituzte diseinuan. Gainera, diziplina anitzeko ikerketa gehiago bultzatu behar dira egurraren ezagutzan dauden hutsuneak argitzeko [16]. *Tackle Climate Change-Use Wood* liburuak material-aurrezpena eta basoko produktu jasangarrien erabilera zabaltzeko ikuspuntua lantzen du [17]. Egileek egitura-materialen konbinazio hibridoen kontzeptua eta horren aplikazio posibleak proposatzen dituzte, jasangarritasunaren ikuspuntutik abiatuta geometriak konbinatuz. Hortik dator lan honetan egurrezko petralak altzairuzko sekzioekin indartzeko proposatzen den ideia.

Eraikin baten egitura nagusiak (zutabeak, habeak eta harlauzak) aurreztertzean ondorioztatzen da egur-altzairu konbinaketak erabiltzean egurrak oraindik ere dimentsio desproporzionatuak izango lituzkeela [18]. Hau da, araututako kalkuluek zehaztutako egurrezko sekzioak altzairuzkoak baino askoz handiagoak izango lirake. Beraz, kontzeptu berria egitura-elementu nagusietan erabiltzea zentzuzkoa ez dela ondorioztatu da. Hala ere, estalki arinetako petralen gisako bigarren mailako elementuetan dimentsio antzekotasun gehiago dago bi materialen artean. Elementu hibridoak ideia altzairuzko eta egurrezko sekzioak konbinatuz aplikatu zaie SWP petralei, 1. irudiko adibidean ikus daitekeen bezala.



1. irudia. SWP petralen aplikazioa pabiloi industrial baten estalki arinean: berdez altzairu-egurrezko zatiak eta laranja egurrezkoak.

Eraikuntza bat diseinatzean, garrantzitsua da, beste faktore batzuen artean, egiturak suaren aurrean izango duen babesa aurreikustea. Gaur egun pil-pilean dago egur-altzairu bikoteak suaren aurrean duen portaera aztertzea [19], ez baita ongi ezagutzen. Diseinu-baldintzek hala eskatzen, egurrarentzat berriaz garatutako araudi teknikoei jarraitu behar zaie [20].

Horiek egitura igeltsu-geruzez estaltzea agintzen dute material ez-sukoiek lortzen dituzten babes denborak berdintzeko. Hala ere, SWP petralen erabilera zabalduz gero, esperimentalki egiaztatu beharko litzateke horiek suaren aurrean duten portaera.

Lan hau García *et al.*-en lanaren jarraipena da [21]. Bertan egileek altzairua eta egurra tartekatzen dituzten petralak garatu dituzte eta sekzioak egurrezko zatietan murriztu daitezke. Lan honetan, SWP kontzeptua sinplifikatzeko asmoz, sekzioa konstante mantendu da petral osoan, eta egurrezko petrala luzera osoan dago ipinita; altzairuzko CF profila, berriz, soilik makurdurak sortutako tentsioak handiak diren guneeetan eta petrala zurruntzean gezia murrizteko erabili da (2. irudia). Horrela, alde batetik, murriztu egiten da beharrezko egur-sekzioa, altzairuaren erabilera minimizatu egiten da, eta, beste aldetik, petrala egitura elementuaren jasangarritasun-eskakizun berrietara moldatzen da. Bien arteko lotura sendoa eta zurruna da, eta multzoaren jarraitutasuna bermatzen du. Diseinu berriak, gainera, arindu egiten ditu mantenu-lanak, garbitasunarekin lotutakoak batez ere, bere geometria itxiak joera txikiagoa baitu zinkinkeria pilatzeko.



2. irudia. SWPren adibidea: CF120x40 altzairuzko profilean barneratutako egur laminatuzko langaluzek osatzen du petrala.

Ondoren, SWP petral tipologia berriak lortzen duen pisu-murrizpena aztertu da, aplikatutako zamaren eta euskarrien arteko distantziaren arabera. Pisua murriztea garrantzitsua da SWP petralak erabiliko dituzten egiturentzat, estalkiaren pisua murrizteak zuzenean eragiten baitu egitura nagusian erabili beharreko material kantitatean. Hirugarren eta azken pausoen, SWP petralekin ingurumen-jasangarritasunaren ikuspuntutik lortutako hobekuntzen analisia egiten da, aplikatutako zamaren eta euskarrien arteko distantziaren arabera. Horretarako, Cuadrado *et al.*-ek [22] zehaztutako irizpideak erabili dira.

2. MATERIALAK ETA METODOLOGIA

Atal honetan, lan honetan aztertuko diren egituren ezaugarriak eta erabiliko diren materialak deskribatzeaz gain, garatuko den metodologia zehazten da.

2.1. Proiektuaren helmena

Gaur egun, altzairuzko egituretan eta egurrezko egituretan antzekoa da portikoen arteko distantzia; normalean ez dira 6,5 m baino txikiagoak izaten, ezta 8,5 m baino handiagoak ere. Nahiz eta estalkien maldak askotarikoa izan, kasu gehienetan ez dira 35° baino gehiagokoak izaten. Horrez gain, estalkiko petralen arteko banaketa estalkiaren erresistentziaren eta karga-hipotesien arabera izaten da. Petralen arteko tartea 1,25-2,5 m artekoa izan ohi da.

Estalkiko panelen pisuak, xafla soilen 90 N/m²-tik *sandwich* panelen 200 N/m²-ra bitartekoak izan daitezke. Espainiako eremu geografiko gehienean, estalki arinetako karga biziak elurra (lan honetan 700 N/m² artekoa) eta haizea (1.000 N/m² artekoa) dira nagusiki [23]. 400 N/m²-ko gainkarga suposatuta da mantentzeko elur gutxi eta haizerik ez duten erremuetarako, beste karga batzuekin konbinatu ez dena [23]. Aipatutakoa kontuan hartuta, lan honetan honako ezaugarriak dituzten petraletara mugatu da azterketa: 6,5 m, 7,5 m eta 8,5 m arteko luzera, % 0ko malda duten estalkiak, eta 800 N/m² eta 3.600 N/m² arteko kargak 400 N/m² tarreetan.

2.2. Materialak eta profilak

Estalki arinetako petral metalikoak beroan ijeztutako IPE profilak edota hotzean konformatutako C edo Z profilak izan ohi dira. Biek antzeko ezaugarriak dituzte [24]. Lan honetan proposatutako SWP tipologian hotzean konformatutako CF petralak erabiltzea erabaki da, geometrikoki egokienak direlako egur listoia bertan barneratzeko. Haien egitura irekiak jarraitatuz eskaintzen die altzairu-egur zatiei.

Gure azterketan, *Pinus radiata* espezieko egur laminatu kolatua edo *glulam* (*glued-laminated timber*) hautatu da, inguruan eskuragarria eta ezaguna den ohiko produktua. Zehazki, GL36h erresistentzia-maila duen laminatua aukeratu da —36 zenbakiak makurduran lan egiteko duen erresistentzia zehazten du, N/mm²-tan—. Altzairuak, berriz, ez ditu hain eskakizun estuak, haren funtzio nagusia petrala zurruntzea izango baita. Lan honetan, S235 altzairua aukeratu da azterketa aurrera eramateko. 1. taulak egur laminatuaren eta altzairuaren propietate mekanikoak aurkezten ditu. Bertan ohartzen gara altzairuak egurrak baino 6,5 aldiz erresistentzia handiagoa duela eta 17 aldiz zurrunagoa dela. Baina egurra altzairua baino

17 aldiz arinagoa denez, bere erresistentzia/pisua ratioa ia hiru aldiz handiagoa da.

1. taula. Egur laminatuaren (GL36h) eta altzairuaren (S235JR) propietate mekanikoak. Egur laminatuaren datuak 5. pertzentilari dagozkie.

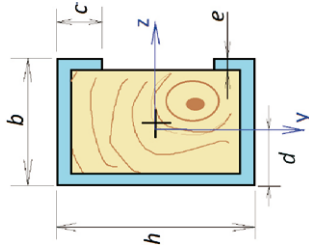
	Tentsio onargarria s_{onarg} (MPa)	Elastikotasun modulua E (GPa)	Dentsitatea r (kg/m ³)
Egur laminatua	36 (betarekiko paraleloan)	11,6 (betarekiko paraleloan)	410
Altzairua	235	200	7.850

Propietate mekanikoez gain, inertzia-momentua da tentsioetan eta gezia gehien eragiten duen ezaugarria. Proposatutako SWPak egurrezko sekzio errektangularrakin eta altzairu-egur sekzioekin tartekatzen dira. Bigarren horiek habe heterogeneoak dira [25]. Horien kalkuluan, bi materialen artean lotura perfektua dagoela suposatuko dugu, hau da, elkarren artean ez dago labainketarik. Hipotesi hori onartuz, deformazioen diagrama lineala izango da, baina ez elastikotasun-moduluaren menpe dagoen tentsioen banaketa. Kalkuluak egiteko, sekzio transformatuaren metodoa erabili da, sekzioa material bakarrak osatzen duela suposatzen duena [25]. Lan honetan, egurra aukeratu da egur-altzairu profil konbinatua ordezkatzeko, horrela petral osoa egurrezkoa dela suposatzen baita. 2. taulak biltzen ditu lan honetan erabili diren sekzioen ezaugarriak. CF profilen eta egurrezko langan ertz borobilduak zorrotzak direla suposatu dira.

CF profilek dimentsio normalizatuak dituzte, UNE 36573:1979 arauari jarraituz [26]. b zabalera berdinentzat hainbat h altuera daude. Eta b eta h konbinazio bakoitza, hau da, profil-tamaina jakin bat, bi edo hiru e lodieratan eskaintzen da. CF profilaren helburua egurrezko petrala indartzea denez, SWPren diseinuan lodierarik txikiena erabiltzea erabaki da. Egurraren eta altzairuaren artean lotura sendoa behar du: perdoi estuak bermatu behar dira lasaierak saihesteko, baina, aldi berean, ez du eragozpenik sortu behar egurra altzairuan barneratzeko. Behin altzairua egurrean sartuta, bi profilak torlojuz josiko dira.

2. taula. SWP profilen dimentsioak, azalerak (*A*), inertzia-momentuak (*I*) eta masa-zentroaren posizioak (*d*). Sekzio transformatu egurrezkoa dela suposatzen da (I_{LN}).

	CF140.2.0	CF160.2.0	CF180.2.0	CF200.2.0	CF225.2.5	CF250.2.5	CF275.2.5	CF300.2.5
<i>h</i> (mm)	140	160	180	200	225	250	275	300
<i>b</i> (mm)	50	60	60	60	80	80	80	80
<i>c</i> (mm)	20	20	20	20	25	25	25	25
<i>e</i> (mm)	2	2	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5
<i>A</i> (mm ²)	532	612	652	692	1050	1110	1170	1230
$I_{z,cf}$ (mm ⁴)	$1,56 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	$3,16 \cdot 10^6$	$4,06 \cdot 10^6$	$8,06 \cdot 10^6$	$10,3 \cdot 10^6$	$12,9 \cdot 10^6$	$15,9 \cdot 10^6$
$I_{z,w}$ (mm ⁴)	$11,43 \cdot 10^6$	$20,5 \cdot 10^6$	$29,16 \cdot 10^6$	$40 \cdot 10^6$	$75,9 \cdot 10^6$	$104,2 \cdot 10^6$	$138,6 \cdot 10^6$	$180 \cdot 10^6$
I_{LN} (mm ⁴)	$37,23 \cdot 10^6$	$60,16 \cdot 10^6$	$81,41 \cdot 10^6$	$107,1 \cdot 10^6$	$209,2 \cdot 10^6$	$274,5 \cdot 10^6$	$351,9 \cdot 10^6$	$442,9 \cdot 10^6$
<i>d</i> _{st} (mm)	16	18,6	17,5	16,6	23,8	22,5	21,4	20,4
<i>d</i> (mm)	20,48	24,63	24,23	23,92	32,63	32,20	31,85	31,55
$EL_{z,cf}$ (Nmm ²)	$3,28E+18$	$5,04E+18$	$6,64E+18$	$8,53E+18$	$16,9E+18$	$21,6E+18$	$27,1E+18$	$33,4E+18$
$EL_{z,w}$ (Nmm ²)	$1,45E+18$	$2,60E+18$	$3,70E+18$	$5,08E+18$	$9,64E+18$	$13,2E+18$	$17,6E+18$	$22,9E+18$
$EL_{z,swp}$ (Nmm ²)	$4,73E+18$	$7,64E+18$	$10,3E+18$	$13,6E+18$	$26,6E+18$	$34,9E+18$	$44,7E+18$	$56,3E+18$



2.3. Petralen portaera mekanikoa

Petralak habe jarraitu gisa egiten du lan. Makurdura momentua da tentsio normalen eta geziaren erantzule. Nonnast-ek [27] erakusten du lau argi edo gehiagoko karga banatuen pean dauden habe jarraituetan, tarteko argietan sortzen diren indar ebakitzailen, makurdura-momentuen eta deformazioen artean ez dagoela aldageta nabarmenik. Beraz, kalkuluetan lau argiko petrala soilik aztertzean ez da zehaztasuna galtzen, eta emaitzak erabilgarriak dira lau argi baino gehiagoko egiturentzat. Simetria baliatuz, 3. taulak lau argi dituen petral baten barne-indarren funtzioak biltzen ditu x posizioarekiko.

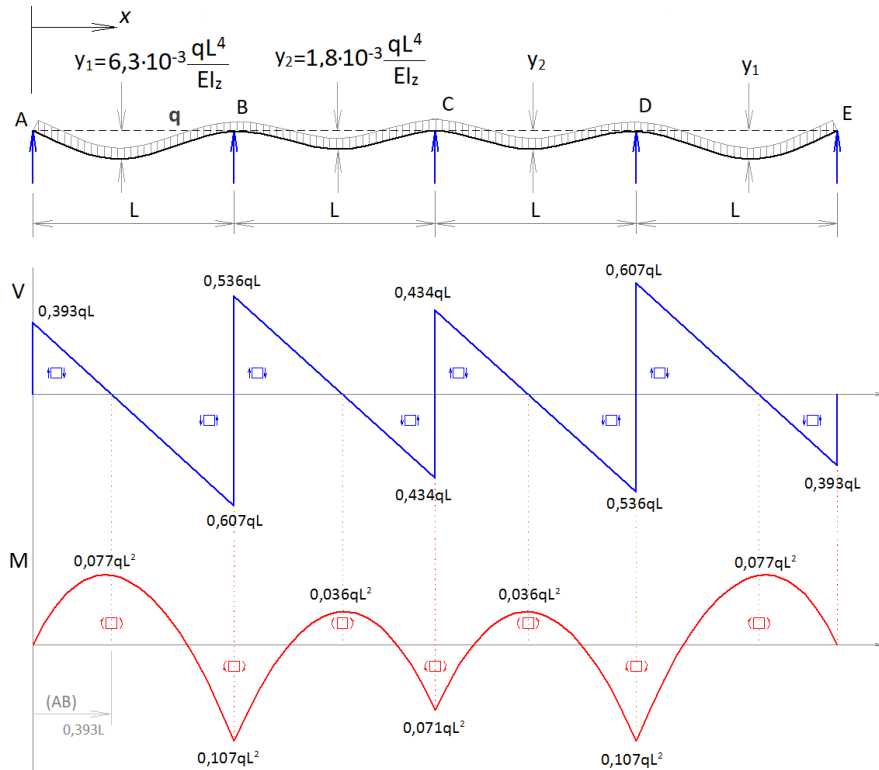
3. taula. Lau argiko petral baten funtzioak x posizioarekiko.

1. argia, $x \in (0, L)$	2. argia $x \in (L, 2L)$
$V_{AB}(x) = A - qx = 0,393qL - qx$	$V_{BC}(x) = B' - qx = 0,536qL - qx$
$M_{AB}(x) = Ax - q\frac{x^2}{2} = 0,393qLx - q\frac{x^2}{2}$	$M_{BC}(x) = B'x - q\frac{x^2}{2} + k = 0,536qLx - q\frac{x^2}{2} + 1,036$

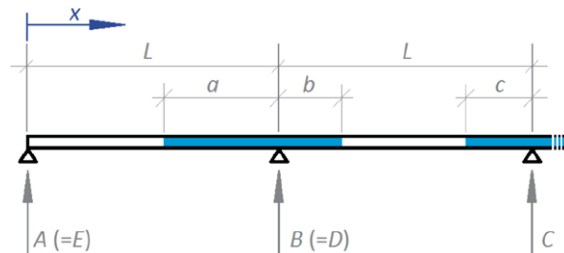
3. irudiak lau argiko petral baten barne-indarren diagrama aurkezten du [27]. Ertzetako bermapuntuetan makurdura-momentua zero da. Momentu maximoak, alde handiz, ertzetakoetan ez, baizik eta haien alboan dauden bermapuntuetan agertzen dira, eta horiek erdiko bermapuntuan baino % 40 txikiagoak dira. Argien erdian momentu maximoa baino % 40 txikiagoak diren momentuak agertzen dira ertzetako argietan; tartekoetan, % 70raino murrizten da. Makurdura-momentuak q karga banatuaren eta L argiaren luzeraren karratuaren arabekoak dira kasu guztietan. Erresistentziaren ikuspuntutik, makurdura-momentu altuko guneak SWPrekin indartzeak egurrezko petralaren sekzioa zuzenean murriztea dakar, hain kargatuak ez dauden tartekak egurrezko sekzioekin arinduz. Deformazioaren ikuspuntutik, ertzetako bi argiak dira kritikoak, ertzetako bermapuntuak aske biratzen uzten baitio. Haien gezia tarteko argiena baino hiru aldiz handiagoa da. SWPak habea zurruntzeko funtzioa hartuko du zati horietan.

Indarrean dagoen Eraikingintzaren Kode Teknikoa aintzat hartuz [28], petralek bi baldintza bete behar dituzte: profilaren erresistentzia maximoa ez gainditzea eta gezia argiaren luzera baino 300 aldiz txikiagoa izatea ($L/300$). 4. irudiak SWP diseinatzeko erabili den lau argiko konfigurazioa aurkezten du. Egur-altzairuzko zatien luzerak a , b eta c aldagaiek definitzen dituzte; c luzera tarteko bermapuntuetan aplikatuko da argi kopurua lau baino handiagoa izanda ere. Diseinuaren helburua ahalik eta egur-profil txikiena ahalik eta altzairu gutxiena erabiliz ($a+b+c$ minimoa) konbinaketa definitzea da, kargaren eta argiaren luzeraren arabera. Konfigurazioen tentsio maximoak eta geziak era diskretuan kalkulatu dira, hau da, a , b eta

c aldagaiak ez dira jarraituak, diskretuak baizik. Aldagai horien balioak d_p diskretizazio-faktorearen multiploak dira. Kalkuluak *Scilab 6.0.2* zenbakizko analisirako softwarearekin egin dira.



3. irudia. Luzeran uniformeki banatutako q kargaren pean dagoen lau argiko habe jarraituaren barne-indarren diagrama: V indar ebakitzaila eta M makurdura-momentua (moldataua [27]).



4. irudia. SWP petralen dimentsionatzean erabilitako lau argiko petrala. Habea eta kargak simetrikoak direnez lehen bi argiak soilik erakusten dira irudian. Altzairuzko profila (urdinez) B eta C bermapuntuetan a , b eta c luzeretan erabiltzen da.

Diskretizazio-luzeraren tamainak emaitzaren zehaztasuna eta aztertu beharreko konbinazio kopurua baldintzatzen ditu. Diskretizazio-luzeraren sentikortasuna petral jakin batean ($L = 6,5$ m) zortzi q karga banatu jakinekin (800, 1.200, 1.600, 2.000, 2.400, 2.800, 3200 eta 3.600 N/mL) aztertu da $L/300$ deformazio-baldintza betetzen duen a , b eta c konbinazioa diskretizazio-luzera $d_p = 0,1$ m definituz. Emaitza optimoa bat eta bakarra dela suposatuz, eta errearen margen maximoa d_p dela jakinda, $d_p = 0,1$ m emaitzak ($a_{0,1}$, $b_{0,1}$, $c_{0,1}$) erreferentziatzen hartuta, d_p ezberdinetarako (0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 eta 0,6 m) a , b eta c parametroak definitu dira, horiek posizio diskretu jakin bat baitute. d_p luzeraren tamainak eragindako e errore koadratikoa n_q karga kasu kopuruarekin batezbestekoa eginuz kalkulatu da.

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{q=80}^{360} (a_{dp} - a_{0,1})^2}{n_q}} + \sqrt{\frac{\sum_{q=80}^{360} (b_{dp} - b_{0,1})^2}{n_q}} + \sqrt{\frac{\sum_{q=80}^{360} (c_{dp} - c_{0,1})^2}{n_q}}$$

Tentsioaren magnitudeak Navier-en adierazpenaren bidez kalkulatu dira [25], arreta bereziki bi puntutan ipiniz: bigarren bermapuntuan (B eta D) eta lehen argian momentua maximoa den posizioan ($x_{AB} = 0,393L$). Bermapuntuan momentua maximoa da eta egurra CF profilarekin indartuta egongo da. Lehen argian x_{AB} posizioan, berriz, petrala soilik egurrezkoa izango da. Sekzio transformatuaren metodoa aplikatuz, egurra erreferentziatzen hartuz ($n = E_{st}/E_w$), tentsioak formula hauekin kalkulatu dira:

$$\text{Egurra: } \sigma_w = \frac{M y}{I_{ln}} \quad \text{Altzairua: } \sigma_{st} = n \sigma_w = \frac{E_{st}}{E_w} \frac{M y}{I_{ln}}$$

Geziak momentuen funtzioak bitan integratuz eta jarraitutasun-baldintzak aplikatuz kalkulatu dira. 4. taulak θ maldaren eta y geziaren funtzioak biltzen ditu x posizioarekiko.

q karga banatu eta L argi-luzera bakoitzerako petralaren kalkuluak honako pauso hauek jarraitu ditu. Lehenik, (1) petralak osorik egurrezkoa eta altzairuzkoa balitz beharko lituzkeen sekzioak kalkulatu dira, erresistentzia- eta deformazio-baldintzen arabera. SWPren profil optimoaren dimentsioak bi emaitza horien artean daude. Ondoren, (2) altzairuzko sekzioaren neurritik hasita, a , b eta c aldagaien (3.irudia) konbinaketa posible guztietarako tentsio eta deformazio maximoak kalkulatu dira. a , b eta c aldagaiak d_p diskretizazio-luzeraren multiploak dira, eta, bideragarriak izateko, luzera-muga hauek inposatu dira: $a_{\max} = L/2$, $b_{\max} = L/3$, eta $c_{\max} = L/3$. Kasu bakoitzerako emaitza optimoak, (3) tentsio- eta deformazio-baldintzak betetzeaz gain, altzairu kantitate gutxiena beharko du. Bukaeran (4), kasu guztien emaitzak taula batean bilduz, SWP soluzioa egituretan inplementatzeko diseinu-gida lortzen da.

4. taula. 4. irudiko petralaren maldaren (θ) eta geziaren (y) funtzioak x posizioa-
rekiko 3.taulako $M(x)$ momentuen diagrama integratuz.

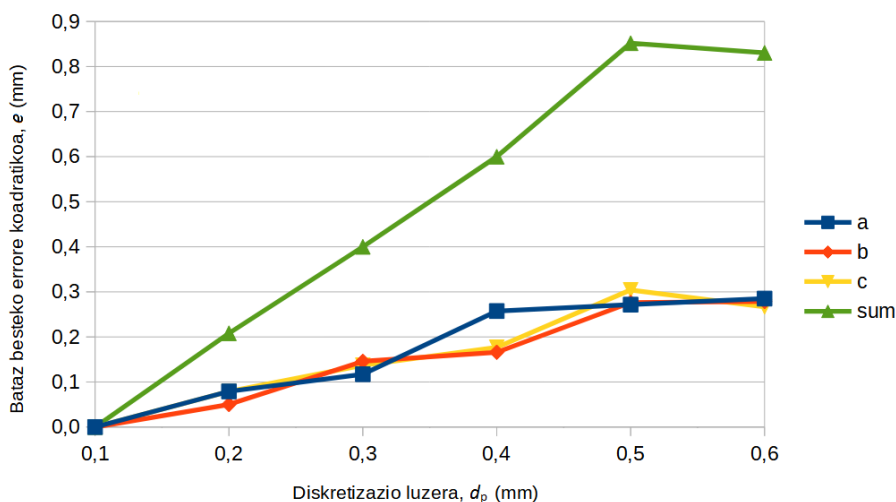
Malda (θ) $M(x)$ integratuz	
1. argia, $x \in (0, L)$	2. argia $x \in (L, 2L)$
$\theta(0,a) = \frac{1}{E_w I_w} \left(A \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_1 \right) =$ $= \frac{1}{E_w I_w} \left(0,3929qL \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_1 \right)$ $\theta(a,L) = \frac{H}{E_w I_w} \left(A \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_2 \right) =$ $= \frac{0,3071}{E_w I_w} \left(0,3929qL \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_2 \right)$	$\theta(L,L+b) = \frac{H}{E_w I_w} \left(B' \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_3 \right) = \frac{0,3071}{E_w I_w} \left(0,5357qL \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_3 \right)$ $\theta(L+b,2L-c) = \frac{1}{E_w I_w} \left(B' \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_4 \right) = \frac{1}{E_w I_w} \left(0,5357qL \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_4 \right)$ $\theta(2L-c,2L) = \frac{H}{E_w I_w} \left(B' \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_5 \right) = \frac{0,3071}{E_w I_w} \left(0,5357qL \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + k_5 \right)$
Gezia (y) $\theta(x)$ integratuz	
1. argia, $x \in (0, L)$	2. argia $x \in (L, 2L)$
$y(0,a) = \frac{1}{E_w I_w} \left(A \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_1 x + k_6 \right) =$ $= \frac{1}{E_w I_w} \left(0,393qL \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_1 x + k_6 \right)$ $y(a,L) = \frac{H}{E_w I_w} \left(A \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_2 x + k_7 \right) =$ $= \frac{0,307}{E_w I_w} \left(0,393qL \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_2 x + k_7 \right)$	$y(L,L+b) = \frac{H}{E_w I_w} \left(B' \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_3 x + k_8 \right) =$ $= \frac{0,307}{E_w I_w} \left(0,536qL \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_3 x + k_8 \right)$ $y(L+b,L-c) = \frac{1}{E_w I_w} \left(B' \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_4 x + k_9 \right) =$ $= \frac{1}{E_w I_w} \left(0,536qL \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_4 x + k_9 \right)$ $y(2L-c,2L) = \frac{H}{E_w I_w} \left(B' \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_5 x + k_{10} \right) =$ $= \frac{0,307}{E_w I_w} \left(0,536qL \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + k_5 x + k_{10} \right)$
Jarraitutasun-baldintzak	
$\theta(a), \theta(L), \theta(L+b), \theta(2L-c), \theta(2L) = 0$	
$y(0) = 0, y(a), y(L) = 0, y(L+b), y(L-c), y(2L) = 0$	

3. EMAITZAK ETA EZTABAIDA

3.1. Diskretizazio-luzeraren sentikortasun-analisia

d_p diskretizazio-luzeraren sentikortasuna q karga banatu kasu guztietarako (guztira $n_q = 8$) aztertu da $L = 6,5$ m petralean, $0,1$ m-tik hasi eta $0,1$ m-ko tarteekin. 5. irudiko grafikoak d_p bakoitzarentzat SWP petrale-tan lortutako a , b eta c aldagaien balioen batez besteko errore koadratikoen (e) emaitzak aurkezten ditu, hau da, petralek beharko duten altzairu-egur

luzera d_p -ren funtzioan. Emaitza antzekoak lortu dira lehen lau kasuetan (0,1etik 0,25era). $d_p = 0,1$ m erreferentziatzen hartuta, errore koadratikoak d_p -rekiko erlazio lineala duela erakusten du grafikoak, eremu osoan $d_p = 0,6$ m kasuan izan ezik. Emaitzak diskretuak direnez, aztertutako petralean emaitzak zoriz 0,6ren multiploetatik gertuago erortzen direla adierazten du beherakadak; kasu gehiago aztertuz gero, erroreak goranzko joera erakutsiko luke [21]. Batez besteko altzairu-egur luzera 4,75 m izanik, $d_p = 0,2$ m denean kalkuluetan errore erlatiboa % 4,3 da, % 5 baino txikiagoa. Beraz, SWP petralak diseinatzean zehaztasunaren eta konputazio kostu minimoaren arteko oreka mantendu nahian, $d_p = 0,2$ m elementuetan diskretizatzea erabaki da, % 5 zehaztasuna bermatuz.



5. irudia. Diskretizazio-luzeraren sentikortasun-azterketa: a , b eta c aldagaietan izandako batez besteko errore koadratikoa, diskretizazio-luzeraren arabera.

3.2. SWPren diseinua

Behin d_p finkatuta, petral-konfigurazio posible guztien a , b eta c aldagaiak kalkulatu dira 4. irudiko lau argiko petralarentzat. 5., 6. eta 7. taulek 6,5 m, 7,5 m eta 8,5 m-ko argiko petralentzako beharrezko profil-neurriak aurkezten dituzte, hurrenez hurren, bi diseinu-irizpideen arabera: erresistentzia eta gezi maximoa. Bietan, petralak luzera osoan altzairuzkoak (CF), egurrezkoak (W) edo altzairu-egurrezkoak (SWP) izanez gero beharko litzuzkeen profil-neurriak kalkulatu dira. lehendabizi Ondoren, emaitza horiek erreferentziatzen hartuta, petrala d_p tamainaren arabera diskretizatuz, SWP petrala optimizatu da, a , b eta c zatien luzera minimoen konbinaketa posible guztiak aztertuz.

5. taula. $L = 6,5$ m argiko petralen profilen tamainak.

Karga	Erresistentzia-irizpidea (M_{max} eta s_{omng})				Deformazio-irizpidea, y_{max} ($L/300 < 21,7$ mm)				SWP optimizatua			
	M_{max}^B (Nm)	M_{max}^{AB} (Nm)	Altzairua CF	Egurra W	SWP osoa	Altzairua CF	Egurra W	SWP osoa	W + SWP	a (m)	b (m)	c (m)
800	3.617	2.603	CF140.2.0	W140.50	SWP140	CF160.2.0	W200.60	SWP140	SWP160	1,8	1,4	1,0
1.200	5.425	3.904	CF140.2.0	W140.50	SWP140	CF180.2.0	W225.80	SWP160	SWP180	1,4	1,6	1,2
1.600	7.233	5.205	CF160.2.0	W160.60	SWP140	CF200.2.0	W225.80	SWP180	SWP200	2,2	1,6	1,2
2.000	9.042	6.507	CF200.2.0	W160.60	SWP160	CF225.2.5	W250.80	SWP200	SWP225	2,6	1,8	1,4
2.400	10.850	7.808	CF225.2.5	W180.60	SWP160	CF225.2.5	W250.80	SWP200	SWP225	1,8	1,4	1,2
2.800	12.658	9.109	CF225.2.5	W180.60	SWP180	CF225.2.5	W275.80	SWP225	SWP225	2,2	1,6	1,2
3.200	14.466	10.410	CF225.2.5	W200.60	SWP200	CF225.2.5	W275.80	SWP225	SWP225	2,8	1,8	1,4
3.600	16.275	11.712	CF225.2.5	W200.60	SWP225	CF250.2.5	W300.80	SWP225	SWP250	1,8	1,6	1,2

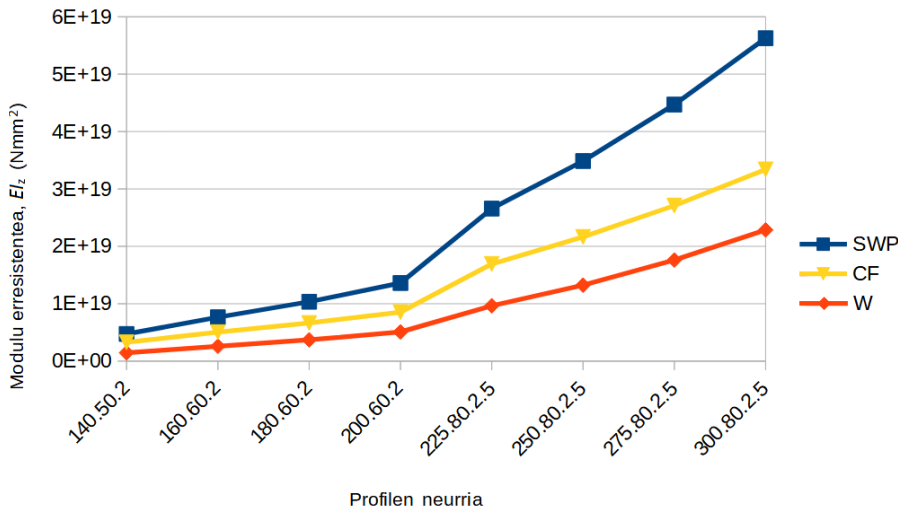
6. taula. $L = 7,5$ m argiko petralen profilen tamainak. Baliorik gabeko gelaxketako emaitzek gainditu egiten dituzte azterketan ezarritako profil-tamaina maximoen gaitasunak.

Karga	Erresistentzia-irizpidea (M_{max} eta s_{omng})				Deformazio-irizpidea, y_{max} ($L/300 < 25,0$ mm)				SWP optimizatua			
	M_{max}^B (Nm)	M_{max}^{AB} (Nm)	Altzairua CF	Egurra W	SWP osoa	Altzairua CF	Egurra W	SWP osoa	W + SWP	a (m)	b (m)	c (m)
800	4.815	3.465	CF140.2.0	W140.40	SWP140	CF180.2.0	W225.80	SWP160	SWP180	1,8	1,6	1,2
1.200	7.223	5.198	CF160.2.0	W160.60	SWP140	CF225.2.5	W225.80	SWP180	SWP200	2,2	1,8	1,4
1.600	9.630	6.930	CF200.2.0	W160.60	SWP160	CF225.2.5	W250.80	SWP200	SWP225	2,2	2,0	1,4
2.000	12.038	8.663	CF225.2.5	W180.60	SWP180	CF225.2.5	W275.80	SWP225	SWP225	2,8	2,2	1,6
2.400	14.445	10.395	CF225.2.5	W200.60	SWP200	CF250.2.5	W300.80	SWP225	SWP250	2,0	1,4	1,2
2.800	16.853	12.128	CF225.2.5	W225.80	SWP225	CF275.2.5	W300.80	SWP225	SWP250	2,4	1,8	1,4
3.200	19.260	13.860	CF250.2.5	W225.80	SWP225	CF275.2.5	—	SWP225	SWP275	3,0	2,0	1,6
3.600	21.668	15.593	CF275.2.5	W225.80	SWP225	CF300.2.5	—	SWP250	SWP300	2,2	1,6	1,2

7. taula. $L = 8,5$ m argiko petralen profilen tamainak. Baiorik gabeko gelaxketako emaitzek gairiditu egiten dituzte azterketan ezarritako profil-tamaina maximoen gaitasunak.

q (N/m)	Erresistentzia-irizpidea (M_{max} eta S_{omg})				Deformazio-irizpidea, y_{max} ($L/300 < 28,3$ mm)				SWP optimizatua			
	M_{max}^B (Nm)	M_{max}^{AB} (Nm)	Altzairua CF	Egurra W	SWP osoa	Altzairua CF	Egurra W	SWP osoa	W + SWP	a (m)	b (m)	c (m)
800	6.185	4.451	CF160.2.0	W140.40	SWP140	CF225.2.5	W225.80	SWP180	SWP200	2,8	2,2	1,4
1.200	9.277	6.676	CF200.2.0	W160.60	SWP160	CF225.2.5	W275.80	SWP225	SWP225	2,4	2	1,4
1.600	12.369	8.901	CF225.2.5	W180.60	SWP180	CF250.2.5	W300.80	SWP225	SWP225	3,0	2,2	1,6
2.000	15.462	11.127	CF225.2.5	W200.60	SWP200	CF275.2.5	—	SWP225	SWP250	2,4	2,2	1,4
2.400	18.554	13.352	CF250.2.5	W225.80	SWP225	CF300.2.5	—	SWP250	SWP250	2,8	2,2	1,8
2.800	21.646	15.577	CF275.2.5	W225.80	SWP225	CF300.2.5	—	SWP250	SWP275	2,8	2,0	1,4
3.200	24.738	17.802	CF300.2.5	W225.80	SWP225	—	—	SWP275	SWP300	3	2,4	1,8
3.600	27.831	20.028	—	W250.80	SWP225	—	—	SWP275	SWP300	3,4	2,8	2,2

Erresistentziaren eta gezi maximoaren irizpideei erreparatuz, tauletan argi ikusten da kasu guztietan $L/300$ geziaren irizpidea zorrotzagoa dela momentu maximoarena baino, profil-tamaina txikiagoa behar baitute. Petralaren luzera osoan profil berdina dutenen emaitzak aztertzean, oro har SWP profilek betetzen dituzte eskakizunak profil-tamaina txikienarekin, altzairuzko CFk baino hobek. Emaitza on horiek profil-tamaina berarentzat EI_z makurdura zurruntasun handiagoa izateari zor dizkio (ikusi 2. taula). Egurrezko profilaren EI_z erreferentziatzat hartuz, altzairuarena % 46 eta % 125 handiagoa da; SWPrena, berriz, % 145 eta % 225 handiagoa da (6. irudia). Makurdura zurruntasunen arteko aldeak handiagoak dira profil-tamaina txikietan. Makurdura zurruntasunean, jauzi nabarmena dago 200 eta 225 neurrien artean: zabalera handitzeaz gain (60 mm-tik 80 mm-ra), CF profila ere 0,5 mm loditzen da.



6. irudia. Egurrezko (W), altzairuzko (CF) eta altzairu-egurrezko (SWP) profilen makurdura zurruntasunak, profil-tamainaren arabera.

Hala ere, SWPa luzera osoan erabiltzeak xahutu egiten du materiala, eta hainbat eremutan profilaren gaitasunak azpierzaitza daude, ahal dutena baino karga gutxiago jasaten dutela. Optimizazioan lortutako profilarak SWP eta CF profilen artean daude, eta hainbat kasutan berdindu ere egiten dira. Emaitza optimoek, a , b eta c aldagaien batura txikiena izateaz gain, horietan ipinitako mugak ere betetzen dituzte ($a_{\max} = L/2$, $b_{\max} = L/3$, eta $c_{\max} = L/3$). a_{\max} -aren baldintzak kasu askotan profil optimizatuak luzera osoko SWP profilarak baino tamaina handiagoa behar izatea dakar. Emaitza guztietan, a parametroa da luzeena, eta gertutik jarraitzen dio b -k. a eta b parametroek era bateratuan egiten dute lan, petralaren bi aldeetan gezi

orekatzeko. Muturrean dagoen argiaren gezi handiena a aldagaiak luzera handiagoa hartzen du. c aldagaiak, berez, luzera bikoitza du, tarteko berrmapuntuen bi aldeetan zabaltzen baita. Petrala habe jarraitua denez, tarteko argiak zurrundu egiten dira elkarren artean, gezia murriztuz; horrela, c aldagaiak balio txikiagoak behar ditu. Lau argiko petralak tarteko berrmapuntu bakarria du, baina c emaitza baliagarria da argi gehiago dituzten petralen tarteko berrmapuntuetan aplikatzeko [27].

8., 9. eta 10. taulek, erreferentziatzen luzera osoan altzairuzko CF petralen pisua hartuz, luzera osoan egurrezko eta SWP petralen pisuak konparatzen dituzte. Era berean, SWP optimizatuen pisua ere alderatzen dute, bai era bateratuan eta bai altzairua eta egurra era banatuan ipiniz ere. 7. irudiak SWP optimizatuari dagozkion emaitzak era grafikoan aurkezten ditu. Luzera osoan egurrezko profila altzairuzkoarekin alderatuz, kasuaren arabera pisua gainditu edota murriztu egiten da, eta zenbaitetan nabarmena da alde. Profilen gaitasunak diskretuak direnez, portaera diskretua dute kalkuletan ere, jausiak agertuz. Fenomeno hori García *et al.*-ek [21] ere antzeman zuten. Luzera osoan SWP profilak erabiltzean, berriz, joera garbia da: pisua igo egiten da kasu guztietan, % 15 eta % 90 artean. Erabiltzen duten altzairuaren pisuari erreparaturik, kasu gehienetan murriztu egiten da, % 5 eta % 38 artean. Murrizten ez den kasuetan, alde % 0 da, hau da, SWPak eta altzairuzkoak CF profil-tamaina berdina darabilte. Beraz, kasu gutxi horietan (4 kasu 24tik), SWPak ez dakar inongo hobekuntzarik.

SWP optimizatuari dagokionez, hiru kasutan izan ezik, beste guztietan CF petraleko pisua % 20 eta % 40 artean handitu da. Murriztu den hiru kasuetan, SWP profilaren tamaina txikiagoa da CF profilarena baino. SWP optimizatuak eta soilik W egurrez osatutako petralak alderatzean, aldeak estuagoak izan arren, neurrien arteko jausi diskretuek gorabeherak sortzen dituzte. Kasu guztietan, SWP optimizatuak W egurrezkoak baino tamaina txikiagoko profila behar du, eta beharrezko egur kantitatea % 10 eta % 40 artean murrizten du (bi kasutan, % 55 arte). $a+b+c$ CF profil zatiak dira murrizpen horren erantzuleak. Zati horiek CF petral osoarekiko altzairu-aurrezen nabarmena suposatzen dute, % 60tik gorakoa kasu gehienetan.

8. taula. $L = 6,5$ m argiko petralen alderaketak pisuan CF altzairuzko petralekiko.

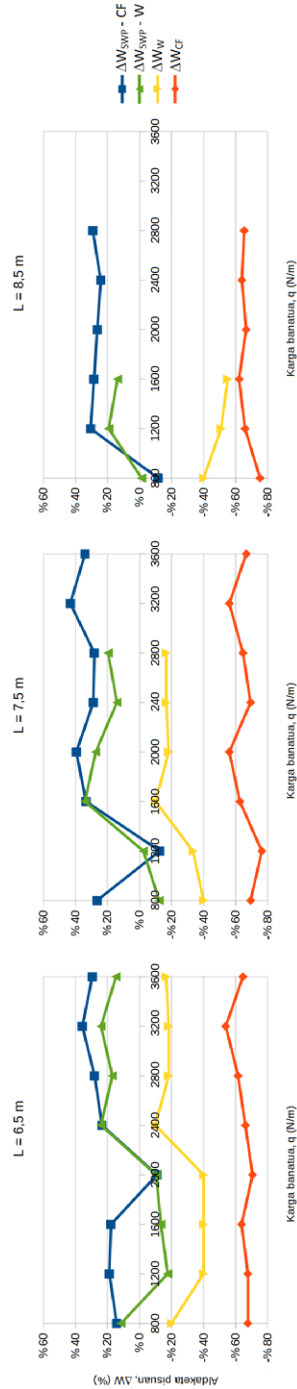
Karga	Egurra			SWP osoa			SWP optimizatua		
	CFrekiko DW _W -CF	CFrekiko DW _{SWP} -CF	Altzairu-aurrezpena DW _{CF}	CFrekiko DW _{SWP} -CF	Altzairu-aurrezpena DW _{CF}	Wrekiko DW _{SWP} -W	Altzairu-aurrezpena DW _{CF}	Egur-aurrezpena DW _W	
q (N/m)									
800	% 2,4	% 46,7	-% 13,1	% 46,7	-% 13,1	% 11,5	-% 67,7	-% 20,0	
1.200	% 44,2	% 70,7	-% 6,1	% 70,7	-% 6,1	-% 17,6	-% 67,7	-% 40,0	
1.600	% 35,9	% 75,7	-% 5,8	% 75,7	-% 5,8	-% 13,3	-% 63,8	-% 40,0	
2.000	-% 0,5	% 25,6	-% 34,1	% 25,6	-% 34,1	-% 10,4	-% 70,6	-% 40,0	
2.400	-% 0,5	% 25,6	-% 34,1	% 25,6	-% 34,1	% 24,0	-% 66,2	-% 10,0	
2.800	% 9,4	% 89,5	% 0,0	% 89,5	% 0,0	% 17,0	-% 61,5	-% 18,2	
3.200	% 9,4	% 89,5	% 0,0	% 89,5	% 0,0	% 24,0	-% 53,8	-% 18,2	
3.600	% 12,9	% 79,3	-% 5,4	% 79,3	-% 5,4	% 14,7	-% 64,6	-% 16,7	

9. taula. $L = 7,5$ m argiko petralen alderaketak pisuan CF altzairuzko petralekiko.

Karga	Egurra			SWP osoa			SWP optimizatua		
	CFrekiko DW _W -CF	CFrekiko DW _{SWP} -CF	Altzairu-aurrezpena DW _{CF}	CFrekiko DW _{SWP} -CF	Altzairu-aurrezpena DW _{CF}	Wrekiko DW _{SWP} -W	Altzairu-aurrezpena DW _{CF}	Egur-aurrezpena DW _W	
q (N/m)									
800	% 44	% 70,7	-% 6,1	% 70,7	-% 6,1	-% 12,3	-% 69,3	-% 40,0	
1.200	-% 10	% 15,8	-% 37,9	% 15,8	-% 37,9	-% 2,4	-% 76,3	-% 33,3	
1.600	-% 1	% 25,6	-% 34,1	% 25,6	-% 34,1	% 34,1	-% 62,7	-% 10,0	
2.000	% 9	% 89,5	% 0,0	% 89,5	% 0,0	% 27,4	-% 56,0	-% 18,2	
2.400	% 13	% 79,3	-% 5,4	% 79,3	-% 5,4	% 14,1	-% 69,3	-% 16,7	
2.800	% 7	% 70,1	-% 10,3	% 70,1	-% 10,3	% 19,7	-% 64,6	-% 16,7	
3.200	—	% 70,1	-% 10,3	% 70,1	-% 10,3	—	-% 56,0	—	
3.600	—	% 75,2	-% 9,8	% 75,2	-% 9,8	—	-% 66,7	—	

10. taula. $L = 8,5$ m argiko petralen alderaketak pisuan CF altzairuzko petralekiko.

Karga (N/m)	Egurra		SWP osoa		SWP optimizatua			
	CFrekiko DW_W -CF	CFrekiko DW_{SWP} -CF	Altzairu-aurrezpena DW_{CF}	Altzairu-aurrezpena DW_{CF}	Wrekiko DW_{SWP} -W	Altzairu-aurrezpena DW_{CF}	Egur-aurrezpena DW_W	
800	-% 10	-% 15,8	-% 37,9	-% 11,6	-% 1,3	-% 75,2	-% 40,0	
1.200	-% 9	-% 89,5	-% 0,0	-% 30,5	-% 19,3	-% 65,9	-% 50,9	
1.600	-% 13	-% 79,3	-% 5,4	-% 28,5	-% 13,8	-% 62,2	-% 55,0	
2.000	—	-% 70,1	-% 10,3	-% 26,4	—	-% 66,5	—	
2.400	—	-% 75,2	-% 9,8	-% 24,2	—	-% 63,9	—	
2.800	—	-% 75,2	-% 9,8	-% 29,2	—	-% 65,3	—	
3.200	—	—	—	—	—	—	—	
3.600	—	—	—	—	—	—	—	



7. irudia. SWP optimizatuen pisu-alderaketa CF altzairuzko petralekiko (DW_{SWP} -CF) eta W egurrezko (DW_{SWP} -W) petralekiko, eta SWP optimizatuen material-aurrezpena osagaia egurrean W petralekiko (DW_W) eta altzairuan CF petralekiko (DW_{CF}).

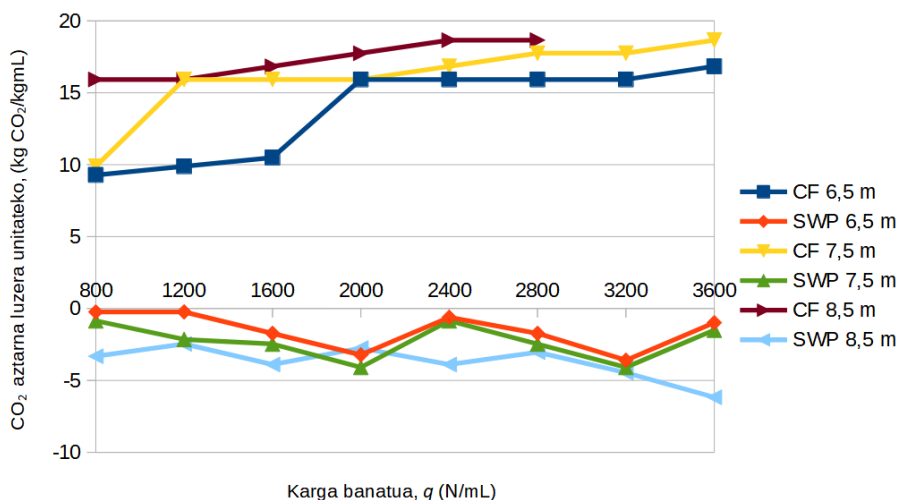
3.3. Jasangarritasun-analisisa

Proposatutako petral hibridoak ingurumenari egiten dion inpaktua karbono-aztarnaren arabera ebaluatu da [22]. SWPren diseinuan erabilitako *Pinus radiata* espeziearen metro kubiko bakoitzeko karbono-aztarna negatiboa da ($-781,96 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$) [14], egurra ingurunetik CO_2 -a xurgatzen eta atxikitzen duen materiala baita. Bere dentsitatea $410 \text{ kg}/\text{m}^3$ dela jakinda, bere karbono-aztarna $-1,907 \text{ kg CO}_2/\text{tn}$ da. Altzairuak, berriz, karbono-aztarna positiboa du, $1,932 \text{ kg CO}_2/\text{tn}$ [29].

Bi datu horiekin, CF altzairuzko petralak eta SWP optimizatuak metro bateko luzeran duten karbono-aztarna estimatu da. 10. taulak eta 8. irudiak aurkezten dituzte lortutako balioak. Aztertutako kasu guztietan SWPek neutralizatu egiten dute altzairuaren karbono-aztarna, gehienetan balio negatiboak lortuz, gainera (ia $-5 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$). Karga txikienetarako, zenbat eta argi luzeagoa izan, orduan eta murriztapen handiagoak lortzen dira karbono-aztarnan.

11. taula. CF altzairuzko petralen eta SWP optimizatuaren karbono-aztarnak luzera unitateko ($\text{kg CO}_2/\text{kg m}$), karga banatuaren eta argi-luzeraren arabera.

q (N/m)	$L = 6,5 \text{ m}$		$L = 7,5 \text{ m}$		$L = 8,5 \text{ m}$	
	CF	SWP	CF	SWP	CF	SWP
800	9,28	-0,24	9,89	-0,85	15,92	-3,32
1.200	9,89	-0,24	15,92	-2,15	15,92	-2,47
1.600	10,50	-1,73	15,92	-2,47	16,83	-3,89
2.000	15,92	-3,22	15,92	-4,09	17,74	-2,75
2.400	15,92	-0,61	16,83	-0,85	18,65	-3,89
2.800	15,92	-1,73	17,74	-2,47	18,65	-3,04
3.200	15,92	-3,60	17,74	-4,09	—	-4,46
3.600	16,83	-0,98	18,65	-1,50	—	-6,18



8. irudia. CF eta SWP optimizatuaren karbono-aztarna petral luzera-unitateko.

4. ONDORIOAK

Lan honek estalkietako petralen egitura-tipologia berri bat aurkeztu du, non egurrezko petraletan barne-indarrak handien diren guneak altzairuzko CF profilekin indartu diren, aldi berean zurruntasuna hobetuz. Horrela, apurtu egin da egitura-elementu horrek altzairuarekiko duen menpekotasuna, eta desabantailak horiek saihestuz, jasangarriagoa den egurra erabiltzen da. Aukera honek egurra batez ere karga handiak eta argi luzeak dituzten petraletan erabiltzeko ateak irekitzen ditu, sekzio-tamaina onargarriak erabiliz. Gainera, soluzio berri honek deuseztatu egiten du altzairuzko petralen karbono-aztarna, eta negatiboa ere bihurtzen du, gaur egungo gizartearen eskariei erantzun irmo eta berritzailea eskainiz alde batetik, eta betiko egurrezko egitura-elementu zaharretara begiz joz bestetik. Horrela, ingeniarien eta arkitektoen eskuetan geratzen da metodologia hau aplikatzeko aukera, kode teknikoaren xedapenak eta diseinu-eskakizunak betetzen dituen ziurtasun osoarekin eta, gainera, egituraren jasangarritasuna nabarmen hobetuko dela bermatuz. Lan honetan, honako ondorio hauek lortu dira:

- Tipologia berriarekin, petral arinagoak lortzen dira; horrela, murriztu egiten da egitura nagusiak beharko duen material kantitatea ere.
- SWP profilarren makurdura zurruntasunak ia bikoiztu egiten du dimentsio berdineko altzairuarena, eta hirukoiztu egurrarena. Eskakizunak betetzeko beharrezkoa den altzairu kantitate minimoa soilik erabiliz, zentzuzkoak bihurtzen dira egurrezko profilen tamaina neurrigabeak.

- Konbinaketak desagerrarazi egiten du altzairu-egur petralen karbono-aztarna, eta horrek soluzio soluzio bideragarri eta erakargarria bihurtzen ditu eraikuntza jasangarrirako.
- Ohiko egitura-elementuen optimizazioa aurrera eramateko, kalkulu metodologia analitikoa erabili da. Funtzioak ezagunak direnez, etorkizunean kalkuluetan optimizazio-algoritmoak inplementatzeko bidea ireki du lan honek, eta antzeko irizpideak aplikatuz erabili ahal izango da gainerako egitura-elementuetan.

BIBLIOGRAFIA

- [1] GAN, V.J., CHAN, C.M., TSE, K., LO, I.M. eta CHENG, J.C., 2017. «A comparative analysis of embodied carbon in high-rise buildings regarding different design parameters». *J. Clean. Prod.* **161**, 663-675.
- [2] UPTON, B., MINER, R., SPINNEY, M. eta HEATH, L.S., 2008. «The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States». *Biomass Bioenergy* **32**, 1-10.
- [3] LI, S., WU, H. eta DING, Z., 2018. «Identifying Sustainable Wood Sources for the Construction Industry: A Case Study». *Sustainability* **10**, 139.
- [4] HAFNER, A., 2018. «How building with wood can be linked to sales of building plots: Results from an exemplary site development in Munich, Germany». *Sustainability* **9**, 947.
- [5] CARUSO, M.C., MENNA, C., ASPRONE, D., PROTA, A. eta MANFREDI, G., 2017. «Methodology for Life-Cycle Sustainability Assessment of Building Structures». *ACI Struct. J.* **114**, 323.
- [6] PADILLA-RIVERA, A., AMOR, B. eta BLANCHET, P., 2018. «Evaluating the Link between Low Carbon Reductions Strategies and Its Performance in the Context of Climate Change: A Carbon Footprint of a Wood-Frame Residential Building in Quebec, Canada». *Sustainability* **10**, 2715.
- [7] ŠVAJLENKA, J. eta KOZLOVSKÁ, M., 2018. «Perception of User Criteria in the Context of Sustainability of Modern Methods of Construction Based on Wood». *Sustainability* **10**, 116.
- [8] ZHANG, X., SHAHNEWAZ, M. eta TANNERT, T., 2018. «Seismic reliability analysis of a timber steel hybrid system. *Eng. Struct.*» **167**, 629-638.
- [9] MARSONO, A.K.B. eta BALASBANEH, A.T., 2015. «Combinations of building construction material for residential building for the global warming mitigation for Malaysia». *Constr. Build. Mater.* **85**, 100-108.
- [10] WANG, L., TOPPINEN, A. eta JUSLIN, H., 2014. «Use of wood in green building: A study of expert perspectives from the UK». *J. Clean. Prod.* **65**, 350-361.
- [11] STOCCHERO, A., SEADON, J.K., FALSHAW, R. eta EDWARDS, M., 2017. «Urban Equilibrium for sustainable cities and the contribution of timber buildings to balance urban carbon emissions: A New Zealand case study». *J. Clean. Prod.* **143**, 1001-1010.

- [12] HAAPIO, A. eta VIITANIEMI, P., 2008. «A critical review of building environmental assessment tools». *Environ. Impact Assess. Rev.* **28**, 469-482.
- [13] WOODARD, A. eta MILNER, H., 2016. *Sustainability of timber and wood in construction. In Sustainability of Construction Materials* (2nd ed.). Elsevier, Amsterdam.
- [14] BUCHANAN, A., JOHN, S. eta LOVE, S., 2013. «Life cycle assessment and carbon footprint of multistorey timber buildings compared with steel and concrete buildings». *N. Z. J. For.* **57**, 9-18.
- [15] JAKES, J.E., ARZOLA, X., BERGMAN, R., CIESIELSKI, P., HUNT, C.G., RAHBAR, N., TSHABALALA, M., WIEDENHOEFT, A.C. eta ZELINKA, S.L. 2016. «Not just lumber—Using wood in the sustainable future of materials, chemicals, and fuels». *JOM* **68**, 2395-2404.
- [16] PEREZ-GARCIA, J., LIPPKE, B., BRIGGS, D., WILSON, J.B., BOWYER, J. eta MEIL, J. 2007. «The environmental performance of renewable building materials in the context of residential construction». *Wood Fiber Sci.* **37**, 3-17.
- [17] WARD, R., 2009. *Tackle Climate Change, Use Wood*. BC Forestry Climate Change Working Group, Victoria (Canada).
- [18] CANTO-PERELLO, J., MARTINEZ-GARCIA, M.P., CUIEL-ESPARZA, J. eta MARTIN-UTRILLAS, M., 2015. «Implementing sustainability criteria for selecting a roof assembly typology in medium span buildings». *Sustainability* **7**, 6854-6871.
- [19] LE, T.D.H. eta TSAI, M.T., 2019. «Experimental assessment of the fire resistance mechanisms of timber–steel composites». *Materials* **12**, 4003.
- [20] ÖSTMAN, B., 2021. «National fire regulations for the use of wood in buildings—worldwide review 2020». *Wood Material Science & Engineering* **8**, 1-4.
- [21] GARCÍA, H., ZUBIZARRETA, M., CUADRADO, J., eta OSA J.L. 2019. «Sustainability Improvement in the Design of Lightweight Roofs: A New Prototype of Hybrid Steel and Wood Purlins». *Sustainability* **11**, 1-17.
- [22] CUADRADO, J., ZUBIZARRETA, M., PELAZ, B. eta MARCOS, I., 2015. «Methodology to assess the environmental sustainability of timber structures». *Constr. Build. Mater.* **86**, 149-158.
- [23] CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. DB_SE AE: Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación 2006. Real Decreto, 314. Madril.
- [24] ACCESS-STEEL A. 2012. *SS053-Proyecto Básico: Diseño de Estructura de Correas*. ASCEM, Madrid. Spain, 2012.
- [25] ANSOLA, R., 2005. *Elastikotasunaren teoria eta materialen erresistentzia*. Udako Euskal Unibertsitatea, Eibar.
- [26] UNE 36573:1979 *Productos de acero. Perfiles abiertos conformados en frío. Perfil CF. Medidas*. AENOR, Madril.
- [27] NONNAST, R., 1987. *El proyectista de estructuras metálicas Vol. 1*. Paraninfo, Madrid.
- [28] *Código Técnico de la Edificación. DB-SE: Seguridad Estructural*. 2006. Real Decreto, 314. Madril.
- [29] MPA. 2016. *Whole-life Carbon and Buildings*. The Concrete Centre, London.