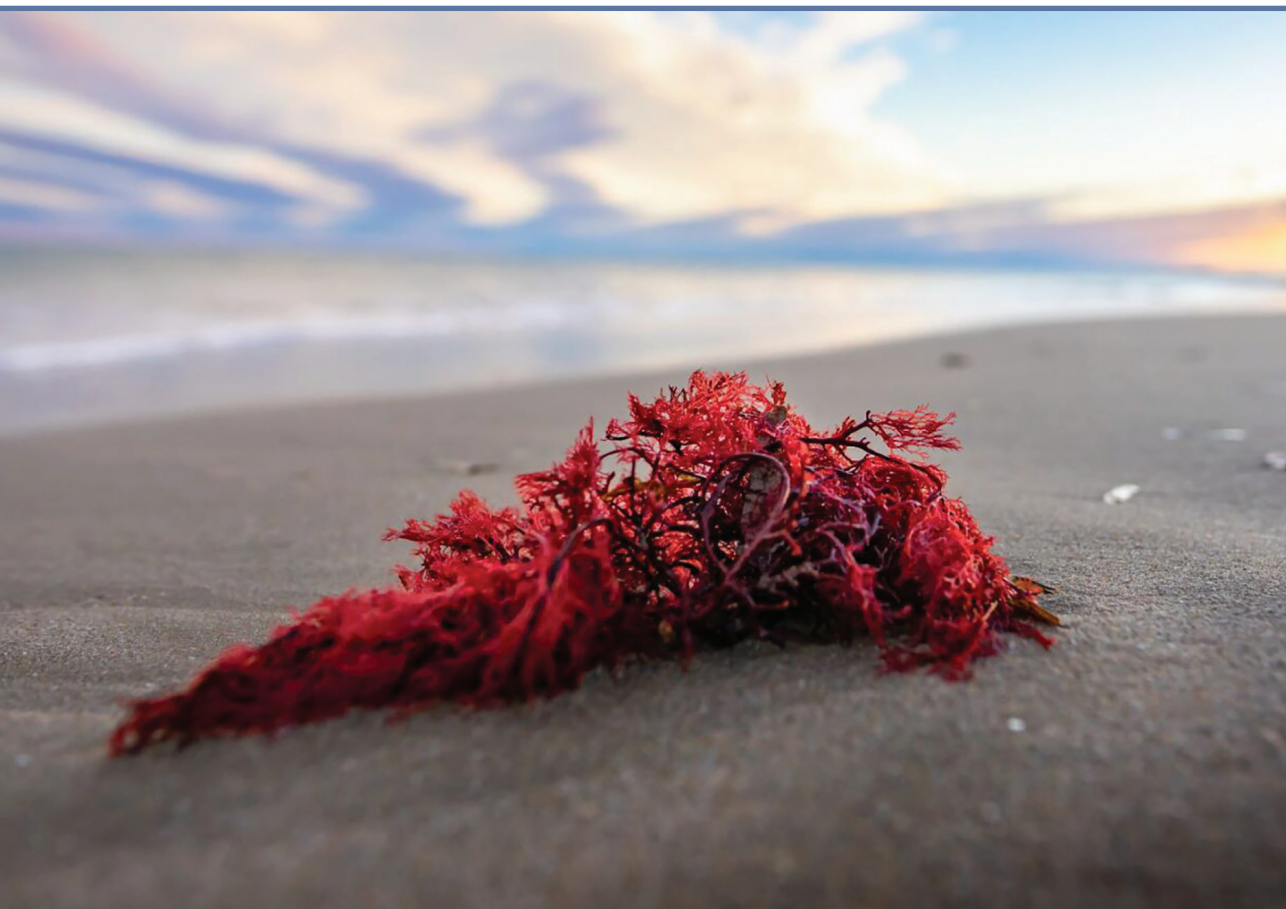


Riccardo Paoli

**JAUNS KASKĀDES BIORAFINĒRIJAS KONCEPTS
FURCELLARIA LUMBRICALIS PIELIETOJUMAM:
PĒTĪJUMS, BALSTĪTS DZĪVES CIKLA ILGTSPĒJAS
NOVĒRTĒJUMĀ**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Riccardo Paoli

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorants

JAUNS KASKĀDES BIORAFINĒRIJAS KONCEPTS *FURCELLARIA LUMBRICALIS* PIELIETOJUMAM: PĒTĪJUMS, BALSTĪTS DZĪVES CIKLA ILGTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
profesors *Dr. sc. ing.*
FRANCESCO ROMAGNOLI
docents *Dr. sc. ing.*
MAKSIMS FEOFILOVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Paoli, R. Jauns kaskādes biorafinērijas koncepts *Furcellaria Lumbricalis* pielietojumam: pētījums, balstīts dzīves cikla ilgtspējas novērtējumā. Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. 82 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2025. gada 24. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 225.

Vāka attēls no “*TACO Algae*” projekta.

<https://doi.org/10.7250/9789934372049>
ISBN 978-9934-37-204-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 11. septembrī plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore *Dr. sc. ing.* Anna Kubule,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesore *Dr. sc. ing.* Elisabetta Palumbo,
Bergamo Universitāte, Itālija

Profesors *Dr. sc. ing.* Timo Laukkanen,
Ålto Universitāte, Somija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts citā universitātē.

Riccardo Paoli (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, 57 attēli, 50 tabulu un divi pielikumi; kopējais lappušu skaits 185. Literatūras sarakstā ir 235 nosaukumi.

SATURS

Ievads	5
Doktora disertācijas mērķis un uzdevumi	6
Disertācijas hipotēze	6
Doktora disertācijas zinātniskā nozīme.....	7
Doktora disertācijas praktiskā nozīme	8
Pētniecības metodoloģija.....	9
Apētījuma rezultātu apstiprināšana.....	10
Citi zinātniskie izdevumi.....	11
Ziņojumi zinātniskajās konferencēs.....	12
Doktora disertācijas struktūra.....	12
1. JAUNĀKO ZINĀTNISKO ATZIŅU ANALĪZE.....	13
1.1. Makroaļģu biorafinērijas sistēma.....	13
1.2. Galvenie secinājumi	17
2. METODOLOĢIJA	20
2.1. <i>F. lumbricalis</i> biorafinērijas tehnoloģiskie risinājumi	20
2.2. Vides dzīves cikla novērtējums	25
2.3. Dzīves cikla izmaksu analīze (LCC).....	35
2.4. Sociālais dzīves cikla novērtējums (S-LCA).....	38
2.5. Dzīves cikla ilgtspējas novērtējums (LCSA).....	45
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	48
3.1. Vides rezultāti	48
3.2. Ekonomiskie rezultāti.....	57
3.3. Sociālās ietekmes rezultāti.....	62
3.4. Gala ilgtspējas indekss	69
SECINĀJUMI UN IETEIKUMI.....	73
ATSAUCES	77

IEVADS

Makroaļģes arvien biežāk tiek atzītas par daudzpusīgu un ilgtspējīgu resursu bioekonomikā, pateicoties to unikālajām īpašībām un straujajam augšanas potenciālam. Šie jūras organismi pārstāv visstraujāk augošo biomasu [1] un pilda nozīmīgas ekoloģiskās funkcijas jūras ekosistēmās, tostarp izšķīdušo barības vielu absorbciju [2] un biotopa struktūras veidošanu [3]. Turklāt makroaļģes veicina piekrastes aizsardzību, mazinot bīstamo viļņu ietekmi [4], un tām ir būtiska nozīme oglekļa sekvencē [5].

Makroaļģu bioķīmiskais sastāvs ir īpaši daudzveidīgs, ietverot plašu bioaktīvo savienojumu spektru, piemēram, fitopigmentus (piemēram, karotinoīdus), polinepiesātinātās taukskābes, fenola savienojumus, tanīnus, peptīdus, lipīdus, enzīmus, vitamīnus, ogļhidrātus un terpenoīdus [6]. Jāatzīmē, ka šie savienojumi bieži ir vieglāk pieejami nekā tie, kas sastopami sauszemes biomasā, galvenokārt makroaļģu zemā lignīna satura dēļ [7]. Šīs atšķirīgās īpašības ir veicinājušas makroaļģu integrēšanu dažādās komerciālās lietojumprogrammās. Īpaši Eiropā šo lietojumu attīstību ir sekmējuši politikas pasākumi, kuru mērķis ir veicināt ilgtspējīgu ekonomiku, jo īpaši Eiropas Komisijas Zaļā kursa ietvaros [8]. Zaļā kursa mērķi – panākt klimatneitralitāti, saglabāt bioloģisko daudzveidību un attīstīt ilgtspējīgu pārtikas ražošanu līdz 2050. gadam – uzsver makroaļģu biorafinēriju būtisko lomu. Viens no nozīmīgiem pārvērtieniem šajā kontekstā ir ES aļģu iniciatīvas [9] pieņemšana 2022. gadā, kas izvirza stratēģisko ietvaru ar 23 mērķtiecīgām darbībām, lai veicinātu aļģu ražošanu, vienkāršotu normatīvos procesus un palielinātu sabiedrības izpratni par to ieguvumiem. Šo iniciatīvu papildina platforma *EU4Algae* [10], kas darbojas kā interaktīvs centrs sadarbības un zināšanu apmaiņas veicināšanai Eiropas aļģu nozarē. Papildu ieguldījumu ir sniegušas Kopīgā pētniecības centra izstrādātās vadlīnijas ilgtspējīgai Eiropas jūraszāļu akvakulturai [11], kuru mērķis ir apmierināt pieaugošo globālo biomasas pieprasījumu, vienlaikus nodrošinot vides ilgtspēju. Neraugoties uz regulatīvajiem panākumiem, makroaļģu potenciāla pilnīga atklāšana prasa standartizētu procesu izstrādi visos darbības posmos – no biomasas audzēšanas vai ievākšanas līdz ķīmiskajai ekstrakcijai biorafinērijas ietvarā [12].

Pirms makroaļģu biorafinēriju ieviešanas plašā mērogā ir jāatrisina vairāki izaicinājumi. Pašlaik pētniecības un komerciālās iniciatīvas lielākoties atrodas attīstības stadijā, koncentrējoties uz viena produkta iegūšanu un trūkstot visaptverošiem pētījumiem, kas atvieglotu pāreju uz liela mēroga lietojumiem [13]. Lielākajā daļā pētījumu galvenokārt ir aplūkots makroaļģu enerģijas atgūšanas potenciāls, nevis holistisku vērtības palielināšanas pieeja. Makroaļģu unikālais sastāvs prasa pielāgotas apstrādes metodes, kas atšķiras no tradicionālās lignocelulozes biomasas apstrādes [14]. Šobrīd pētniecības centieni galvenokārt koncentrējas uz ekstrakcijas metodoloģiju pilnveidošanu, mazāk pievēršoties praktiskai ieviešanai tirgū un ilgtspējas kvantificēšanai. Lai gan pēdējos gados ir palielinājusies izpratne par vides un ekonomisko analīžu nozīmi, sociālie aspekti joprojām ir maz izpētīti. Tas norāda uz nepieciešamību pēc patiesi ilgtspējīgas pieejas, kas līdzsvaroti integrē visus trīs ilgtspējas pīlārus: vides, ekonomisko un sociālo [15]. Dzīves cikla domāšanas (*Life Cycle Thinking* – *LCT*) pieeja nodrošina visaptverošu ietvaru ilgtspējas novērtēšanai, ņemot vērā visa produkta vai procesa dzīves ciklu – no izejvielu ieguves līdz to iznīcināšanai dzīves cikla beigās [16].

Tāpēc šis promocijas darbs ir veltīts dzīves cikla ilgtspējas novērtējuma (*Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA*) izstrādei novatoriskai kaskādes tipa biorafinērijai, kuras pamatā ir sarkanā makroaļģe *Furcellaria lumbricalis*, kas plaši sastopama Baltijas jūras reģionā [17]. *LCSA* integrē vides dzīves cikla novērtējumu (*Life Cycle Assessment – LCA*), dzīves cikla izmaksu analīzi (*Life Cycle Costing – LCC*) un sociālo dzīves cikla novērtējumu (*Social Life Cycle Assessment – S-LCA*), lai sniegtu pilnīgu novērtējumu par makroaļģu biorafinēriju sistēmu ilgtspēju.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Šī promocijas darba mērķis ir novērtēt kaskādes tipa biorafinērijas, kuras pamatā ir sarkanā makroaļģe *Furcellaria lumbricalis*, ilgtspēju, izmantojot kvantitatīvu dzīves cikla ilgtspējas novērtējumu *LCSA*. Izstrādātā sistēma paredz atgūt vērtīgus savienojumus, piemēram, pigmentus, olbaltumvielas un karaginānu, vienlaikus valorizējot atlikušās biomasas plūsmas. Lai sasniegtu šo vispārējo mērķi, pētījums ir strukturēts, balstoties uz turpmāk minētajiem galvenajiem jautājumiem.

- Kāds ir pašreizējais makroaļģu biorafinēriju attīstības stāvoklis?

Šī uzdevuma mērķis ir izvērtēt un definēt jaunākos sasniegumus makroaļģu biorafinēriju jomā, iezīmējot galvenos izaicinājumus un iespējas.

- Kādi ir iespējamie *F. lumbricalis* biorafinērijas dizaini?

Šis uzdevums paredz izstrādāt pielāgotu kaskādes tipa biorafinērijas modeli *F. lumbricalis* sugas apstrādei, lai maksimāli palielinātu biomasas vērtību ilgtspējas kontekstā. Modelis tiks salīdzināts ar alternatīviem etalonmodeļiem, kas identificēti literatūras pārskatā.

- Kāda ir *F. lumbricalis* biorafinērijas sistēmas ietekme uz vidi?

Lai kvantificētu izstrādātās biorafinērijas vides ietekmi, tiks veikts dzīves cikla novērtējums (*LCA*), nosakot kritiskos procesus un parametrus, kas jāuzlabo, lai nodrošinātu vides ilgtspēju.

- Kāda ir *F. lumbricalis* biorafinērijas ekonomiskā dzīvotspēja?

Tiks veikta dzīves cikla izmaksu analīze (*LCC*), lai novērtētu sistēmas finansiālo dzīvotspēju un ekonomisko ilgtspēju.

- Kādas ir sociālās sekas, ieviešot *F. lumbricalis* biorafinēriju?

Tiks veikts sociālais dzīves cikla novērtējums (*S-LCA*), analizējot sociālo ietekmi, kas saistīta ar biorafinērijas ieviešanu dažādos mērogos makroaļģu vērtību ķēdē.

- Vai kaskādes biorafinērija ir ilgtspējīgākā pieeja *F. lumbricalis* valorizēšanai?

Noslēguma posmā tiks integrēti *LCA*, *LCC* un *S-LCA* rezultāti kopējā ilgtspējas indeksā, lai noteiktu visilgtspējīgāko biorafinērijas modeli *F. lumbricalis* apstrādei.

Promocijas darba hipotēze

Šajā promocijas darbā izvirzīta šāda hipotēze:

“Kaskādes tipa biorafinērijas pieejas izstrāde, kas ir īpaši pielāgota sarkanajai makroaļģei *Furcellaria lumbricalis*, nodrošina ilgtspējīgu, aprītē balstītu un efektīvu biomasas

izmantošanu, garantējot vides ieguvumus, ekonomisko dzīvotspēju un paaugstinātu sabiedrības izpratni, salīdzinot ar citiem biorafinērijas dizainiem.”

Šī hipotēze tiks pārbaudīta, vispusīgi novērtējot izstrādāto kaskādes tipa biorafinērijas modeli un salīdzinot tā veiktspēju ar alternatīviem biorafinērijas dizainiem. Salīdzinošajā analizē tiks iekļauti vides, ekonomiskās un sociālās ilgtspējas kritēriji, nodrošinot pilnvērtīgu priekšrocību un ierobežojumu izvērtējumu. Integrējot datus no *LCA*, *LCC* un *S-LCA* pieejām, šī pētījuma mērķis ir sniegt kvantitatīvu un multidisciplināru skatījumu uz makroaļģu biorafinēriju dzīvotspēju un ietekmi bioekonomikas kontekstā.

Promocijas darba zinātniskā nozīme

Jūras biomasa, īpaši makroaļģes, piedāvā daudzsološu, taču vēl pilnībā neizmantotu resursu ilgtspējīgu biorafinēriju attīstībai. Tomēr pastāv izaicinājumi, kas saistīti ar šādu sistēmu vides ilgtspēju, ekonomisko dzīvotspēju un sociālo atbildību.

Šis promocijas darbs atrodas krustpunktā starp bioresursu valorizēšanu, dzīves cikla ilgtspējas novērtējumu (*LCSA*) un aprites bioekonomikas principiem, piedāvājot visaptverošu kaskādes tipa biorafinērijas pieejas izvērtējumu sarkanajai makroaļģei *Furcellaria lumbricalis* Baltijas jūras reģionā. Integrējot pilnīgu ilgtspējas novērtējumu, šis pētījums veicina makroaļģu biorafinēriju attīstību kā būtisku nākotnes ilgtspējīgas bioekonomikas sastāvdaļu.

Steidzamā nepieciešamība pēc standartizētiem ilgtspējas novērtējumiem biorafinēriju nozarē izceļ šī pētījuma zinātnisko nozīmīgumu. Lai arī makroaļģu biorafinērijas līdz šim pārsvarā tikušas aplūkotas tehnoloģiskā kontekstā, joprojām pastāv būtisks trūkums to vides, ekonomiskās un sociālās ilgtspējas kvantitatīvā novērtējumā, izmantojot dzīves cikla pieeju. Turklāt Eiropas politikas uzsver nepieciešamību izveidot ilgtspējīgas un mērogojamas makroaļģu nozares, tomēr pašreizējās metodes nespēj nodrošināt vienotu pieeju ilgtspējas izvērtēšanai. Šis promocijas darbs veicina makroaļģu biorafinēriju zinātnisko attīstību trīs inovatīvos virzienos.

1. Integrēta ilgtspēja. Pētījums iekļauj visus trīs ilgtspējas pīlārus (t. i., vides, ekonomisko un sociālo) kvantitatīvā *LCSA* pieejā, kas pielāgota Baltijas jūras reģiona kontekstam. Apvienojot *LCA*, *LCC* un *S-LCA*, tiek nodrošināts spēcīgs ietvars makroaļģu biorafinēriju novērtēšanai, pārsniedzot tradicionālos vides ietekmes analīzes rīkus.
2. Inovācijas *S-LCA* jomā. Pētījums attīsta sociālā dzīves cikla novērtējuma (*S-LCA*) metodoloģiju, īpaši makroaļģu sektorā, kur sociālās ietekmes joprojām ir maz izpētītas. Analizējot makroaļģu biorafinēriju sociālekonomisko ietekmi dažādos mērogos, pētījums veicina izpratni par šo sistēmu potenciālo ieguldījumu piekrastes kopienų attīstībā, darba vietu radīšanā un ieinteresēto pušu iesaistē.
3. Sadarbības ietekme. Šis promocijas darbs kā daļa no Eiropas projekta *TACO Algae* [18] stiprina starpdisciplināru sadarbību starp pētniecības institūcijām, universitātēm un nozares partneriem, veicinot zināšanu apmaiņu un ilgtspējīgu biorafinērijas koncepciju praktisku ieviešanu. Sadarbojoties ar industriju, tiek

sekmēta risinājumu attīstība, kas atbilst Eiropas ilgtspējas politikas un bioekonomikas stratēģiju mērķiem.

Promocijas darbā izstrādātie un piemērotie koncepti un rezultāti ir publicēti recenzētos zinātniskos rakstos un prezentēti starptautiskās konferencēs, apliecinot to zinātnisko jaunradi un nozīmīgumu.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Šī promocijas darba rezultāti ir būtiski visām ieinteresētajām pusēm makroaļģu nozarē, tostarp nozares profesionāļiem, politikas veidotājiem un pētniekiem, kas izstrādā ilgtspējīgus bioekonomikas risinājumus.

Pieaugot globālajam pieprasījumam pēc atjaunojamiem biomasas resursiem, makroaļģu biorafinērijas piedāvā videi draudzīgu, ekonomiski dzīvotspējīgu un sociāli atbildīgu alternatīvu tradicionālajai biomasas pārstrādei. Tomēr to ieviešana lielā mērogā joprojām ir apgrūtināta tehnisko, ekonomisko un regulatīvo izaicinājumu dēļ. Šis pētījums piedāvā strukturētu pieeju šo izaicinājumu pārvarēšanai, integrējot *LCSA* kaskādes tipa biorafinērijas dizainā.

Izmantojot integrētu ilgtspējas izvērtējuma ietvaru, pētījums sniedz kvantitatīvu ieskatu, kas atbalsta lēmumu pieņemšanu makroaļģu nozarē, politikas plānošanā un akadēmiskajā vidē.

Pētījuma praktiskā nozīme īpaši izpaužas trīs galvenajās jomās.

1. Lietojums industrijā. Pētījums sniedz tehniskus ieskatus, kas ir tieši piemērojami makroaļģu nozares dalībniekiem, tostarp biorafinēriju operatoriem, investoriem un politikas veidotājiem. Izvērtējot dažādus biorafinērijas dizainus, šis pētījums kalpo kā etalons labajai praksei, palīdzot ieinteresētajām pusēm izvēlēties visefektīvākās, ilgtspējīgākās un mērogojamākās pieejas *F. lumbricalis* valorizēšanai.
2. Dzīvotspējas analīze. Pētījums identificē galvenos izaicinājumus, kas ietekmē makroaļģu biorafinēriju vides un ekonomisko dzīvotspēju. Izmantojot salīdzinošo analīzi un ilgtspējas etalonvērtēšanu, tiek precizēti vājie posmi apstrādē, piegādes ķēdes ierobežojumi un finanšu šķēršļi, kas jārisina, lai nodrošinātu ilgtermiņa dzīvotspēju. Papildus *LCC* integrācija ļauj izcelt izmaksu ziņā efektīvas stratēģijas ekonomisko risku samazināšanai komerciālās ieviešanas gadījumā.
3. Izpratne un dzīves cikla domāšana. Izmantojot dzīves cikla domāšanas (*LCT*) pieeju, šis pētījums veicina ilgtspējā balstītu skatījumu uz makroaļģu izmantošanu, akcentējot nepieciešamību vērtēt biorafinērijas sistēmas ne tikai pēc ekonomiskās efektivitātes. *S-LCA* pievienošana veicina izpratni par makroaļģu biorafinēriju sociālekonomisko ietekmi, rosinot diskusijas par resursu taisnīgu pārvaldību, vietējām nodarbinātības iespējām un nozares sadarbības stiprināšanu.

Tādējādi šis promocijas darbs pārvar plaisu starp zinātnes sasniegumiem un industrijas pielietojumu, piedāvājot ar datiem pamatotu ietvaru, ko iespējams tieši integrēt makroaļģu vērtības ķēdes attīstībā reģionālā, nacionālā un Eiropas līmenī. Šajā pētījumā izstrādātās metodoloģijas ir pārnesamas arī uz citām bioekonomikas nozarēm, sniedzot atbalstu politikas izstrādei, investīciju stratēģijām un ilgtspējīgām inovācijām jūras biotehnoloģijā. Risinot

tehniskos, ekonomiskos un sociālos aspektus, šis promocijas darbs sniedz praktisku ceļa karti pārejai uz ilgtspējīgām makroaļģu biorafinērijām, sekmējot aprites bioekonomikas attīstību un atbalstot Eiropas Savienības Zaļā kursa mērķus.

Pētniecības metodoloģija

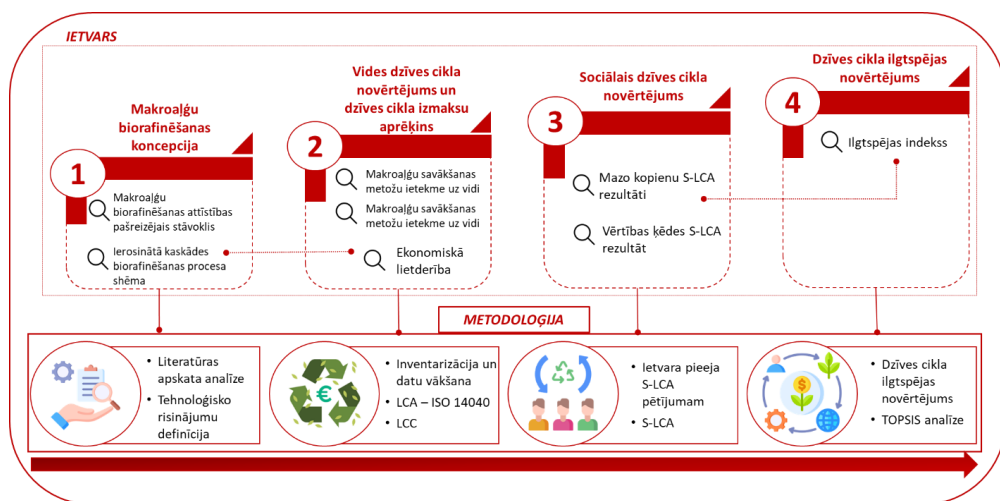
Izmantotā pētniecības ietvara struktūra parādīta 1. att. Metodoloģija apvieno gan kvalitatīvas, gan kvantitatīvas pētniecības metodes, tostarp literatūras analīzi, datu vākšanu un analīzi, eksperimentālu datu iegūšanu, gadījuma izpēti definēšanu, modelēšanu programmatūrā un statistisko analīzi. Pētījums īstenots strukturētā, secīgā veidā, lai nodrošinātu visaptverošu un sistemātisku makroaļģu biorafinērijas sistēmu novērtējumu.

1. solis. Literatūras pārskats un biorafinērijas sistēmas definēšana. Pirmajā posmā veikts plašs literatūras pārskats, lai analizētu pašreizējo situāciju makroaļģu biorafinērijas sistēmās, identificējot galvenos ierobežojumus un iespējas nozarē. Šī soļa mērķis ir izveidot visaptverošu zināšanu bāzi optimālas biorafinērijas sistēmas izstrādei. Balstoties uz literatūras atziņām un projekta partneru (*TACO Algae* projekta) ieguldījumu, formulēts kaskādes tipa biorafinērijas modelis *F. lumbricalis* apstrādei. Definēti alternatīvi etalonmodeļi, lai veiktu salīdzinošu analīzi.

2. solis. Datu vākšana un vides un ekonomiskais novērtējums. Šajā posmā īstenota tiešas datu vākšanas stratēģija, izmantojot primāros datus no *TACO Algae* projekta partneriem. Gadījumos, kad dati nav pieejami, izmantoti nozares un literatūras dati, lai nodrošinātu datu pilnīgumu. Pēc inventarizācijas analīzes izveides, aptverot galvenos parametrus, piemēram, izejvielu patēriņu, enerģijas izmantošanu, atkritumu rašanos un emisijas, veikts *LCA*. Sākotnēji šī analīze koncentrēsies uz dažādu makroaļģu ievākšanas un audzēšanas metožu vides ietekmes novērtēšanu, kas ir būtiska biomasas sagatavošanas ilgtspējības izvērtēšanai. Pēc tam novērtēta dažādu biorafinērijas dizainu vides ietekme, kā noteikts 1. solī. Pēc *LCA* veikšanas veikta *LCC* analīze, kurā inventarizācijas datiem tiks piešķirtas monetāras vērtības, ļaujot ekonomiski salīdzināt dažādās biorafinērijas konfigurācijas.

3. solis. *S-LCA* izstrāde un analīze. Tā kā *S-LCA* metodoloģijas makroaļģu sistēmām ir maz attīstītas, šis solis sākas ar pielāgota *S-LCA* ietvara definēšanu. Veikta divlīmeņu sociālā analīze: 1) vērtību ķēdes līmeņa analīze, kurā identificēti sociālie karstpunkti makroaļģu ražošanas sistēmā; 2) kopienų un uzņēmumu līmeņa analīze, kurā novērtēta iespējamā sociālā ietekme lokālā mērogā, koncentrējoties uz mazajām kopienām un uzņēmumiem makroaļģu pārstrādē.

4. solis. *LCSA* un gala ilgtspējas indekss. Noslēdzošajā posmā veikts pilns dzīves cikla ilgtspējas novērtējums (*LCSA*), integrējot 2. soļa (*LCA* un *LCC*) un 3. soļa (*S-LCA*) rezultātus. Piemērota daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze (*TOPSIS* metodoloģija), lai aprēķinātu gala ilgtspējas indeksu, nodrošinot kvantitatīvu salīdzinājumu starp ierosinātajiem biorafinērijas dizainiem. Šī pieeja ļaus noteikt visilgtspējīgāko konfigurāciju *F. lumbricalis* biorafinērijai, balstoties uz vides, ekonomiskajiem un sociālajiem ilgtspējas rādītājiem.



1. att. Promocijas darba pētniecības metodoloģija.

Pētījuma rezultātu apstiprināšana

Autora pētījuma rezultāti ir prezentēti un apspriesti četrās zinātniskajās konferencēs un publicēti piecos recenzētos zinātniskajos žurnālos.

1. N. Ferronato, **R. Paoli**, F. Romagnoli, G. Tettamanti, D. Bruno, and V. Torretta. Environmental Impact Scenarios of Organic Fraction Municipal Solid Waste Treatment with Black Soldier Fly Larvae based on a Life Cycle Assessment. *Environmental Science and Pollution Research* (2023), vol. 30, no. 1, pp. 1–19.
2. **R. Paoli**, B. Bjarnason, T. Ilmjärv, and F. Romagnoli. Off-Shore and On-Shore Macroalgae Cultivation and Wild Harvesting: an LCA-Based Evaluation from Baltic Sea Region Case Studies. *Environmental and Climate Technologies* (2023), vol. 27, no. 1, pp. 606–626.
3. F. Romagnoli, F. Spaccini, A. Boggia, **R. Paoli**, M. Feofilovs, B. Ievina, and L. Rocchi. Microalgae Cultivation in a Biogas Plant: Environmental and Economic Assessment through a Life Cycle Approach. *Biomass and Bioenergy* (2024), vol. 182, pp. 1–13.
4. F. Romagnoli, **R. Paoli**, A. Arias, E. Entrena-Barbero, T. Ilmjärv, K. Elvevold, and M. T. Moreira. *Furcellaria lumbricalis* macroalgae cascade biorefinery: a Life Cycle Assessment study in the Baltic Sea Region. *Journal of Cleaner Production* (2024), vol. 478, 143861.
5. A. Arias, E. Entrena-Barbero, T. Ilmjärv, **R. Paoli**, F. Romagnoli, G. Feijo, and M. T. Moreira. Conceptual design and environmental evaluation of the Biorefinery approach for R-phycoerythrin extraction and purification. *New Biotechnology* (2025), vol. 86, pp. 73–86.

Citi zinātniskie izdevumi

1. F. Diaz, J. A. Vignati, B. Marchi, **R. Paoli**, S. Zanoni, and F. Romagnoli. Effects of Energy Efficiency Measures in the Beef Cold Chain: A Life Cycle-based Study. *Environmental and Climate Technologies* (2021), vol. 25(1), pp. 343–355.
2. F. Romagnoli, A. Arachchige, **R. Paoli**, M. Feofilovs, and B. Ievina. Growth Kinetic Model for Microalgae Cultivation in Open Raceway Ponds: A System Dynamics Tool. *Environmental and Climate Technologies* (2021), vol. 25(1), pp. 1317–1366.
3. **R. Paoli**, M. Feofilovs, A. Kamenders, and F. Romagnoli. Peat Production for Horticultural Use in the Latvian Context: Sustainability Assessment through LCA Modeling. *Journal of Cleaner Production* (2022), vol. 378.
4. A. Pettinaroli, S. Susani, R. Castellanza, E. Collina, M. Pierani, **R. Paoli**, and F. Romagnoli. A Sustainability-Based Approach for Geotechnical Infrastructure. *Environmental and Climate Technologies* (2023), vol. 27(1), pp. 738–752.
5. A. Pettinaroli, S. Susani, R. Castellanza, E. Collina, M. Pierani, **R. Paoli**, and F. Romagnoli. The Impact of a Permeation Grouting Technique Quantitatively Assessed Through a Process-Focused Life Cycle Assessment. *Environmental and Climate Technologies* (2023), vol. 27(1), pp. 797–812.
6. V. Mezzanotte, S. Venturelli, **R. Paoli**, E. Collina, and F. Romagnoli. Life Cycle Assessment of an industrial laundry: A case study in the Italian context. *Cleaner Environmental Systems* (2025), vol. 16, 100246.

Zinātniskās publikācijas, kas iesniegtas zinātniskajos žurnālos, bet vēl nav publicētas

1. **R. Paoli** and F. Romagnoli (2025). A Review on Macroalgae Biorefineries: Technological Pathways and Life Cycle Assessment Perspectives. Iesniegts *Environmental and Climate Technologies*.
2. **R. Paoli**, C. Foiadelli, M. Traversi, G. Tomasoni, and F. Romagnoli (2025). Economic Feasibility of *Furcellaria lumbricalis* Biorefinery Designs: A Life Cycle Cost Approach. Iesniegts *Sustainable Production and Consumption*.
3. **R. Paoli**, J. S. Pechsiri, A. Souza, and F. Romagnoli (2025). An Explorative Social Life Cycle Assessment for Wild Harvest and Cultivation of *F. lumbricalis* in the Baltic Sea Region. Iesniegts *Environmental and Climate Technologies*.
4. **R. Paoli**, F. Romagnoli, M. Carnevale Miino, A. P. D. Baltrocchi, and V. Torretta (2025). Cascade Biorefinery of *Furcellaria lumbricalis* Macroalgae: Social Impact and Integration into a Life Cycle Sustainability Assessment. Iesniegts *Environmental and Climate Technologies*.

Ziņojumi zinātniskajās konferencēs

1. R. Paoli, B. Bjarnason, T. Ilmjärv, and F. Romagnoli. LCA-based comparison of different macroalgae cultivation and wild harvesting systems. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2023. Riga, Latvia, May 10–12, 2023.
2. R. Paoli and F. Romagnoli. An overview of the technological and environmental state-of-the-art of macroalgae biorefineries. International Conference of Algal Biomass, Biofuels and Bioproducts. Hawaii, USA, June 12–14, 2023.
3. F. Romagnoli, R. Paoli, A. Arias, E. Entrena-Barbero, T. Ilmjärv, K. Elvevold, and M. T. Moreira. *Furcellaria lumbricalis* macroalgae cascade biorefinery: a Life Cycle Assessment study in the Baltic Sea Region. International Conference of Algal Biomass, Biofuels and Bioproducts. Hawaii, USA, June 12–14, 2023.
4. R. Paoli, F. Romagnoli, A. Arias, T. Ilmjärv, K. Elvevold, and M. T. Moreira. Techno and social assessment of a macroalgae biorefinery in the Baltic Sea Region. WasteEng24 International Conference. Sendai, Japan, August 20–23, 2024.

Promocijas darba struktūra

Šis promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā un sastāv no ievada, trim galvenajām nodaļām, secinājumiem un ieteikumiem, literatūras saraksta un diviem pielikumiem.

Ievads sniedz vispārējo pētījuma kontekstu un nozīmīgumu, izklāsta izvirzītos mērķus un izmantoto metodoloģiju, kā arī uzsver iegūto rezultātu nozīmi.

Pirmā nodaļa ietver makroaļģu biorafinērijas sektora jaunāko zinātnisko atziņu apskatu, identificējot pašreizējās iespējas un izaicinājumus. Tā ietver arī literatūras pārskatu par dzīves cikla novērtējuma (*LCA*) lietojumu makroaļģu sistēmās, īpaši pievēršoties ilgtspējas aspektiem un makroaļģu izcelsmes produktu lietojumiem.

Otrā nodaļa iepazīstina ar izstrādātās *F. lumbricalis* kaskādes tipa biorafinērijas tehnoloģisko dizainu, kā arī ar divām alternatīvām sistēmas konfigurācijām: viena produkta ekstrakcijas un trīs līniju ekstrakcijas modeļiem. Nodaļā detalizēti aprakstīti izmantotie metodoloģiskie ietvari vides, ekonomisko un sociālo ilgtspējas dimensiju novērtēšanai, izmantojot *LCA*, *LCC* un *S-LCA* pieejas. Nodaļa noslēdzas ar *TOPSIS* daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodes lietojumu saliktā ilgtspējas indeksa aprēķināšanai *LCSA* ietvarā.

Trešā nodaļa prezentē ilgtspējas novērtējumu (*LCA*, *LCC* un *S-LCA*) rezultātus dažādiem biorafinērijas dizainiem un to izvērtējumu jutīguma analīzēs. Tajā arī aplūkoti *TOPSIS* analīzes rezultāti, nosakot ilgtspējīgāko dizainu starp piedāvātajiem scenārijiem.

Secinājumu un ieteikumu nodaļa apkopo galvenos pētījuma rezultātus un sniedz stratēģiskus ieteikumus turpmākai nozares attīstībai.

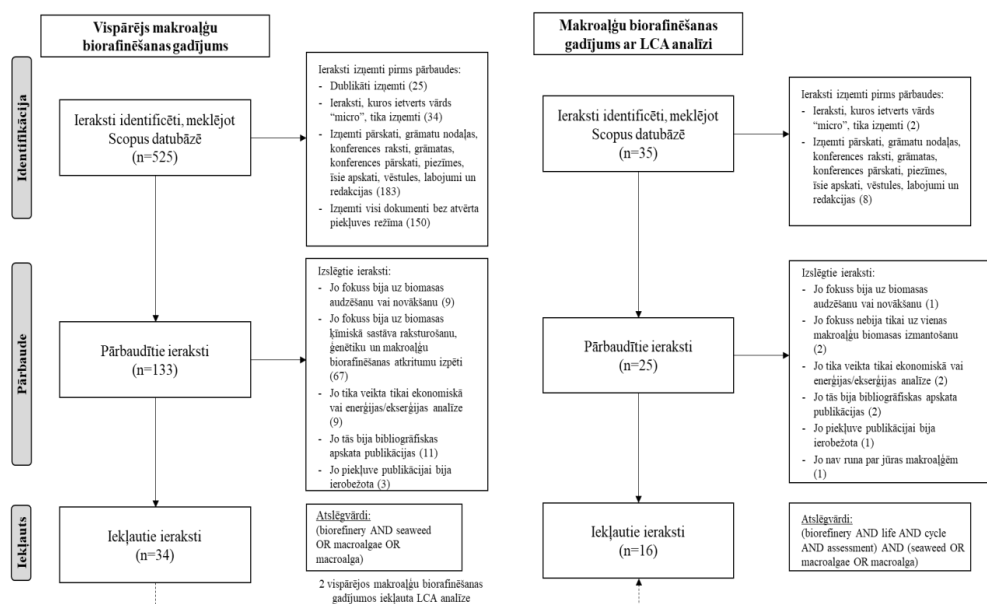
Pilnā doktora disertācija sastāv no 185 lappusēm, ietverot 50 tabulas, 57 attēlus, divus pielikumus un 235 atsaucis.

1. JAUNĀKO ZINĀTNISKO ATZIŅU ANALĪZE

Lai definētu jaunāko atziņu līmeni makroalģēs balstītu biorafinēriju jomā, tika veikts sistematisks literatūras pārskats, izmantojot *Scopus* datubāzi. Literatūras analīze aptvēra periodu no 2012. līdz 2024. gadam, koncentrējoties gan uz tehnoloģisko attīstību, gan uz *LCA* metodoloģiju integrēšanu makroalģu biorafinērijas sistēmās. Metodoloģija tika izstrādāta atbilstoši *PRISMA* (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) [19] vadlīnijām, lai nodrošinātu pārskatāmību un atkārtojamību.

Pētniecības ietvars (parādīts 1.1. att.) balstīts uz diviem galvenajiem izpētes virzieniem. Pirmais aptvēra makroalģu biorafinērijas vispārīgā nozīmē, izmantojot mērķtiecīgu meklēšanas stratēģiju, izslēdzot pētījumus, kas saistīti ar *LCA* un mikroalģēm. Otrs virziens mērķēts tieši uz pētījumiem, kuros *LCA* saistīts ar makroalģu biorafinērijām, vienlaikus izslēdzot mikroalģu tēmas, lai saglabātu tematisko fokusu.

Pētījumu atlasē process balstīts uz iepriekš noteiktiem iekļaušanas un izslēgšanas kritērijiem, kas dokumentēti *PRISMA* diagrammā. Galīgajā datu kopā iekļauti pētījumi, kas tika sistematiski analizēti, lai iegūtu ieskatu sugu klasifikācijā (brūnās, zaļās un sarkanās makroalģes), iegūtajos produktos un lietotajās biorafinērijas stratēģijās. Novērtējums ietvēra arī pārstrādes tehnoloģiju analīzi to veiktspējas, ierobežojumu un produkcijas ražības aspektos.



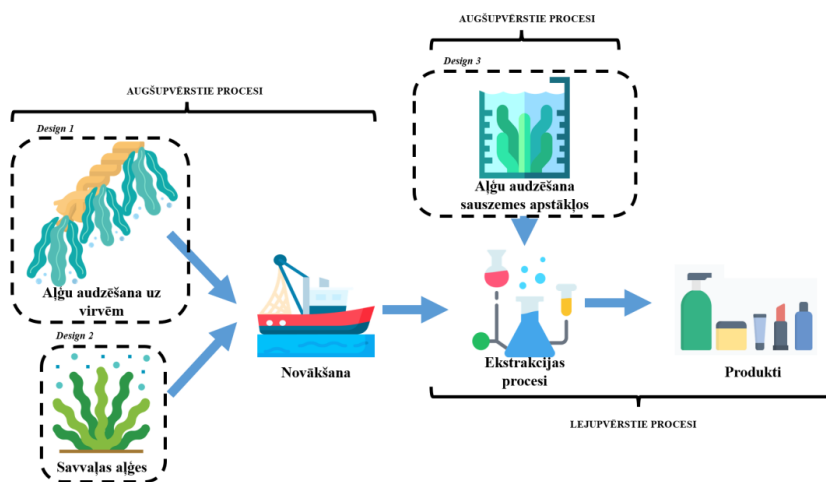
1.1. att. Metodoloģiskais ietvars. Informācijas plūsma caur dažādām sistematiskās literatūras analīzes fāzēm. Diagramma izveidota saskaņā ar *PRISMA* vadlīnijām.

1.1. Makroalģu biorafinērijas sistēma

Makroalģu biorafinērijas koncepta pamatā ir princips pārveidot jūras biomasu plašā tirgū pieprasītu produktu klāstā, veicinot aprites ekonomiku un ilgtspējīgu resursu izmantošanu. Tas

atbilst oficiālajai biorafinērijas definīcijai kā “ilgtspējīga biomasas pārstrāde tirgojamu produktu un enerģijas spektrā” [20]. Līdzīgi kā naftas pārstrādes rūpnīcas, kurās no jēlnaftas iegūst degvielu un ķīmiskas vielas, makroaļģu biorafinērijas darbojas ar atjaunojamiem bioloģiskiem izejmateriāliem, piemēram, jūraszālēm, lauksaimniecības atkritumiem un akvakultūras blakusproduktiem [21].

Šīs sistēmas ietver uzstraumes posmus (audzēšana un ievākšana) un lejasstraumes posmus (apstrāde un valorizācija) ar lielu uzsvaru uz piemērotas vietas izvēli, procesu integrāciju un ekoloģisko saderību. Labi izstrādāta makroaļģu biorafinērija ir paredzēta ne tikai, lai optimizētu efektivitāti un ražību, bet arī lai mazinātu ietekmi uz vidi un vienlaikus sniegtu sociālekonomiskus ieguvumus [22].



1.2. att. Hipotētiskas makroaļģu biorafinērijas shematisks attēlojums.

1.2. att. parādītas galvenās uzstraumes darbības, kuras ietver trīs galvenās biomasas iegūšanas metodes. 1. Audzēšana uz mākslīgām virsmām (atklātās jūras sistēmas). Makroaļģes tiek audzētas uz virvēm vai tīkla konstrukcijām [23], kas izvietotas jūras ūdeņos [24]. Šo metodi bieži izmanto tādu sugu kā *Laminaria digitata* un *Saccharina latissima* audzēšanai [25]. 2. Savvaļas makroaļģu ievākšana. Tādās teritorijās kā Ziemeļatlantijas reģions [3] dabīgās jūraszāļu audzes tiek ievāktas manuāli vai ar mehānizētu kuģu palīdzību [26]. Šī prakse jāveic atbilstoši ilgtspējas vadlīnijām un sezonālajiem ierobežojumiem, lai saglabātu jūras ekosistēmu līdzsvaru [[3], [27]. 3. Audzēšana sauszemē (zemes bāzētas sistēmas). Šo metodi parasti lieto zaļajām aļģēm (piemēram, *Ulva spp.*) [28], un to praktizē sauszemes tvertnēs vai kanālos (*raceways*), nodrošinot labāku kontroli pār augšanas apstākļiem [29].

Lejasstraumes posms ietver makroaļģu biomasas pārveidi pievienotās vērtības produktos. Šīs fāzes efektivitāti ietekmē tādi faktori kā sugu sastāvs, ekstrakcijas tehnoloģijas, ietekme uz vidi, ekonomiskā dzīvotspēja un tehnoloģiskās gatavības līmenis (TRL) [22]. Līdz šim lielākā daļa valorizēšanas centieni ir koncentrējušies uz viena produkta iegūšanu, piemēram, biometāna [30], bioetanola [31] vai butanola [32] ražošanu.

Tomēr šādas lineārās pieejas bieži ignorē makroaļģu pilno resursu potenciālu, kas var novest pie ekonomiskas neefektivitātes un vides problēmām.

Kā atbildreakcija ir attīstījies kaskādes biorafinērijas modelis, kas tiek uzskatīts par labāku alternatīvu [33]. Šī integrētā pieeja ietver makromolekulu secīgu ekstrakciju, galaproduktu diversifikāciju dažādos sektoros, resursu izmantošanas optimizāciju un atkritumu daudzuma samazināšanu. Šis daudzproduktu ekstrakcijas modelis iezīmē pāreju uz aprites un ilgtspējīgu biorafinērijas sistēmu [34]. Maksimizējot vērtību no katras biomasas vienības, kaskādes biorafinērijas piedāvā lielāku rentabilitāti un noturību, pozicionējot makroaļģes kā nozīmīgu komponentu pārejā uz bioekonomiku.

Makroaļģes piedāvā plašu bioaktīvo savienojumu un funkcionālo komponentu spektru, kas kļūst arvien nozīmīgāki tādās nozarēs kā pārtika, lauksaimniecība, farmācija, dzīvnieku barība un enerģētika. Daži piemēri sniegti turpmāk.

- Pārtikas rūpniecība.

Makroaļģu izmantošanu pārtikas sektorā veicina to uzturvērtība, kulinārā daudzveidība un pieaugošais patērētāju pieprasījums pēc ilgtspējīgiem augu bāzes produktiem [35]. Makroaļģes tiek patērētas svaigā, fermentētā veidā vai kā pulverveida uztura bagātinātāji [36]. Tās tiek iekļautas dažādos produktos, tostarp uzkodās (piemēram, jūraszāļu krekeros), dzērienos (piemēram, alus un bezalkoholiskie dzērieni) un funkcionālās pārtikas maisījumos [6]. To integrācija graudaugu produktos uzlabo to uzturvērtību, padarot makroaļģes par nozīmīgu komponentu veselību veicinošā uzturā [37].

- Lauksaimniecība un dārzkopība.

Makroaļģes jau vēsturiski izmantotas kā dabīgi mēslojumi, pateicoties to augstajam minerālvielu saturam un šķiedrainajai struktūrai, kas uzlabo augsnes kvalitāti un mitruma noturību. Mēslojumi tiek izmantoti gan cietā veidā (pulverveidīgi vai granulēti) [38], gan šķidrā veidā, piemēram, kā sula, kas iegūta, mehāniski spiežot [6]. Šie preparāti ir bagāti ar mikroelementiem, vitamīniem un augu augšanas regulatoriem, veicinot ražību un augu noturību pret stresu [39]. Papildus mēslojošajām īpašībām makroaļģu produkti ir uzrādījuši arī biofungicīdas īpašības [40]. Makroaļģu pārstrādes atlikumu integrācija lauksaimniecībā piedāvā ilgtspējīgu resursu aprites modeli. Tomēr būtiski ir uzraudzīt metālu uzkrāšanos un ķīmisko stabilitāti laika gaitā, lai nodrošinātu drošu lietojumu [41].

- Dzīvnieku barība.

Makroaļģes aizvien biežāk tiek izmantotas kā barības piedevas, pateicoties to augstajam vitamīnu, šķiedrvielu un minerālvielu saturam [42]. Īpaši *Ulva* sugas ir saistītas ar uzlabotu mājputnu veselību, olu kvalitāti [43] un antimikrobiālo iedarbību, tostarp efektivitāti pret *Nūkāslsas* slimību [44]. Brūnās makroaļģes ir uzrādījušas potenciālu svara pieauguma veicināšanā un mirstības samazināšanā mājputniem [45], bet sarkanās makroaļģes ir veicinājušas olu ražošanas pieaugumu paipalām [46]. Liellopiem *Undaria pinnatifida* piedevas uzlaboja teļu veselību un dzimšanas svaru [47]. Brūno aļģu (piemēram, kelpa, *Fucus*) kombinācijas ir uzlabojušas barības sagremojamību un barības vielu uzsūkšanos atgremotājiem [6]. Cūkām brūno aļģu atvasinātie alginātu oligosaharīdi uzrāda antibakteriālas [48] un prebiotiskas īpašības, veicinot zarnu veselību un imunitāti [49].

- Bioaktīvās vielas.

Lai izdzīvotu dinamiskajā jūras vidē, makroaļģes ir attīstījušas spēju ražot daudzveidīgas bioaktīvās molekulas. Šīs vielas tiek arvien vairāk novērtētas farmācijas, uztura bagātinātāju un kosmētikas nozarēs to antioksidantu, antimikrobiālo, pretiekaisuma un pretvīrusu īpašību dēļ [50]. 1.1. tabulā ir klasificēti galvenie bioaktīvie savienojumi pēc makroaļģu tipa, biofunkcionālajām īpašībām un to nozīmes attiecīgajās nozarēs.

1.1. tabula

Daži makroaļģu bioaktīvie savienojumi

Makroaļģu veidi	Skābās vielas	Bioaktīvā iedarbība	Atsauces
<i>Laminaria</i> (brūnās)	Sulfāta esterī	Audzēju kavējoša un antikoagulanta iedarbība	[51]
	Laminarīns	Antibakteriāla iedarbība un imūnsistēmas stiprināšana	[6]
<i>M. nitidum</i> (zaļās), <i>L. pinnatifida</i> (brūnās) <i>P. yezoensis</i> (sarkanās)	Polisaharīdi	Pret hipertensiju un hiperlipidēmiju	[52]
<i>Ulva spp.</i> (zaļās) <i>H banksia</i> (brūnās)	Taukskābes	Pretiekaisuma iedarbība	[53]
Brūnās mikroaļģes (vispārīgi)	Polifenoli	Antioksidanta un pretiekaisuma iedarbība	[54]
	Floroglucinols, fukoksantīns un fukoidāns	Pretvēža iedarbība krūts vēža gadījumā	[55]
	Polifenoli	Aizsardzība pret sirds-asinsvadu slimībām un diabētu	[56]
Sarkanās mikroaļģes (vispārīgi)	Fikobiliproteīni	Dabīgs krāsvielas avots pārtikai un kosmētikai	[57]
		Antimikrobiāla, antioksidanta, pretiekaisuma un neuroaizsargājoša iedarbība	[58]
<i>Ulva spp.</i>	Skābās vielas	Izmanto kosmētisko līdzekļu sastāvā	[59]
<i>E. cottonii</i> (sarkanās)	Florotannīni	Dabīgs tirozīnai inhibitors ādas balināšanai	[60]
<i>E. cava</i> (brūnās)	Florotannīni	Ādas iekaisuma dziedēšana	[61]

- Biodegviela un bioenerģija.

Makroaļģes ir daudzsoļošs biomasas avots atjaunojamās enerģijas ražošanai. To piemērotību biodegvielas ražošanai nosaka labvēlīgas īpašības, piemēram, zems lignīna saturs, sabalansēta oglekļa/slāpekļa (C/N) attiecība un daudzveidīgs ķīmiskais sastāvs. Pārvēršanas ceļi ietver anaerobo fermentāciju, fermentāciju, gāzifikāciju, pirolīzi un hidroapstrādi [62]. Biogāzes ražošana šobrīd ir viena no tehniski visreālāk īstenojamajām makroaļģu enerģijas iegūšanas metodēm, jo to var salīdzinoši viegli integrēt esošajās sistēmās [63]. Savukārt bioetanola un biobutanola ražošana saskaras ar izaicinājumiem, kuri saistīti ar makroaļģu augsto mitruma saturu, kas pasliktina apstrādes efektivitāti [64]. Termokīmiskās pārvēršanas tehnoloģijas arī cieš no ierobežojumiem, ko rada pelnu, metālu un zema lipīdu satura klātbūtne makroaļģēs, kas samazina to potenciālu biodīzeļdegvielas un bioeļļas ražošanā [65]. Būtiski tehniski un ekonomiski šķēršļi, īpaši saistīti ar liela mēroga audzēšanu, ūdens atdalīšanu un loģistiku, joprojām kavē plašāku makroaļģu izmantošanu bioenerģētikas jomā [63].

1.2. Galvenie secinājumi

Makroaļģu biorafinērijas sistēmu ierobežojumi

Sistemātiskais literatūras pārskats identificēja vairākus būtiskus izaicinājumus, kas kavē makroaļģu biorafinēriju attīstību un to ieviešanu lielā mērogā. Šīs nepilnības uzsver nepieciešamību pēc turpmākiem pētījumiem, tādiem kā šajā promocijas darbā paveiktais, lai risinātu gan tehnoloģiskos, gan vides izaicinājumus un virzītu ilgtspējīgu makroaļģu vērtību ķēžu attīstību. Identificēti trīs galvenie izaicinājumi, kas jāizvirza kā prioritātes turpmākajā pētniecībā un inovācijā makroaļģu biorafinērijas jomā.

- Tehnoloģiskā gatavība.

Daudzas makroaļģu biorafinērijas iniciatīvas joprojām atrodas agrīnajā izpētes vai pilotprojekta fāzē un nav gatavas pilnvērtīgai rūpnieciskai ieviešanai. Vērtīgo savienojumu, piemēram, peptīdu un polisaharīdu, iegūšana prasa specifiskām sugām pielāgotas metodes, kurām bieži vien trūkst mērogojamības. Turklāt pašreizējām pārvēršanas tehnoloģijām bieži raksturīga enerģijas neefektivitāte un zemā ražības optimizācija. Būtisks šķērslis progresam ir saistīts ar plaisu starp tehnoloģisko attīstību un vides novērtējumu. Kamēr pētījumi koncentrējas uz procesu efektivitātes uzlabošanu, *LCA* pētījumi atpaliek, kas rada novēlotas reakcijas uz vides kompromisiem. Šī neatbilstība kavē ilgtspējas rādītāju laicīgu integrāciju biorafinērijas projektēšanas un optimizācijas stratēģijās.

- Biomasas pieejamība un kvalitāte.

Makroaļģu biomasa pēc būtības ir mainīga, jo ir atkarīga no vides apstākļiem. Tādi faktori kā ūdens temperatūra, apgaismojums un barības vielu pieejamība mainās atkarībā no sezonas un ģeogrāfiskā reģiona, ietekmējot gan biomasas ražu, gan bioķīmisko sastāvu. Šīm svārstībām ir būtiska nozīme procesu projektēšanā un noturībā, īpaši tādās lietošanas jomās kā biodīzeļa ražošana, kur būtisks rādītājs ir lipīdu saturs. Šo izaicinājumu pārvarēšanai nepieciešama pielāgojamu apstrādes sistēmu izstrāde un noturīga izejvielu pārvaldības stratēģija. Pastāvīga biomasas pieejamība ar vienmērīgu kvalitāti ir būtiska makroaļģu biorafinēriju ekonomiskajai un operatīvajai dzīvotspējai.

- Vides ietekmes un ilgtspējas trūkumi.

Lai gan makroaļģu audzēšana bieži tiek reklamēta kā videi draudzīga alternatīva zemes izmantošanas efektivitātes un oglekļa piesaistes potenciāla dēļ, tās ieviešana lielā mērogā var radīt ekoloģiskus riskus. Tie ietver invazīvo sugu izplatību, biotopu traucējumus, barības vielu nelīdzsvarotību jūras ekosistēmās un eutrofikācijas risku barības vielu noplūdes rezultātā. Lai apstiprinātu makroaļģu biorafinēriju vides ieguvumus, jāpiemēro visaptverošs *LCA* visai vērtību ķēdei. Ir svarīgi izvairīties no “slodzes pārbīdes” – situācijas, kur siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājums tiek panākts uz citu vides problēmu rēķina. Tomēr šobrīd *LCA* pētījumi pārsvarā koncentrējas uz brūnajām makroaļģēm, bet zaļās un sarkanās sugas tiek aplūkotas minimāli. Šī nelīdzsvarotība būtiski ierobežo integrētās ilgtspējas novērtējuma iespējas un uzsver steidzamību paplašināt *LCA* pētījumus uz visām makroaļģu grupām.

Vajadzības un iespējas makroaļģu biorafinērijas sistēmu attīstībai

Balstoties literatūras analīzē iegūtajos secinājumos, šajā promocijas darbā izklāstīti vairāki stratēģiski ieteikumi makroaļģu biorafinēriju attīstības veicināšanai. Šie priekšlikumi risina pašreizējos tehnoloģiskos, ilgtspējas un politikas ierobežojumus, vienlaikus iezīmējot turpmākās pētniecības (t. sk. šī darba) un inovācijas virzienus, kas nepieciešami, lai attīstītu noturīgu un aprites bioekonomiku.

- Integrētas biorafinērijas pieejas.

Biomases vērtības maksimāla izmantošana, izmantojot integrētas apstrādes stratēģijas, ir būtiska ekonomisko šķēršļu pārvarēšanai makroaļģu nozarēs. Aprites modeļu ieviešana, kur atlikusī biomasas no primārajiem procesiem (piemēram, biodegvielas ražošana) tiek izmantota sekundāriem mērķiem, piemēram, biogāzes ražošanai vai lauksaimniecībā, uzlabo resursu efektivitāti un samazina atkritumus. Šī kaskādes pieeja ne tikai palielina ekonomisko atdevi, bet arī veicina plašākus vides ilgtspējas mērķus.

- Audzēšanas un ievākšanas metožu standartizācija.

Neskatoties uz ievērojamu progresu biomasas pārstrādes tehnoloģijās, makroaļģu audzēšanas un ievākšanas metodes joprojām nav pietiekami standartizētas. Sezonālās izmaiņas biomasas kvalitātē apdraud biorafinērijas stabilitāti un ražošanas konsekvenci. Kontrolētās vides sistēmas, tostarp sauszemes akvakultūra, piedāvā risinājumu, uzlabojot ražas un kvalitātes prognozējamību. Vienlaikus nepieciešamas jaunas ilgtspējīgas ievākšanas metodes, lai mazinātu ekosistēmas traucējumus. Precīzijas akvakultūras rīki, selektīvas ievākšanas stratēģijas un automatizācija var būtiski uzlabot biomasas piegādes ķēžu efektivitāti un vides rādītājus.

- *LCA* kā projektēšanas instruments.

LCA lomai jāpāriet no retrospektīvas analīzes uz proaktīvu procesu projektēšanas un optimizācijas rīku. Identificējot vides karstpunktus, *LCA* var vadīt uzlabojumus enerģijas izmantošanā, emisijās un resursu patēriņā. Reģionāli pielāgoti *LCA* modeļi ir īpaši nozīmīgi, ļaujot ņemt vērā specifisko vietu audzēšanas, apstrādes un transportēšanas apstākļus. Turklāt nepieciešams stingrāks zaļo tehnoloģiju vides kvantitatīvais novērtējums, tostarp energoefektīvu procesu, videi draudzīgu ekstrakcijas metožu un aprites ekonomikas principu vērtēšana, lai apstiprinātu apgalvoto ilgtspēju ar empīriskiem datiem.

- Tehnoloģiskā inovācija un mērogojamība.

Lai darbotos rūpnieciskā mērogā, jāievieš jaunas tehnoloģijas, kas uzlabo darbības efektivitāti. Ģēnu inženierija un selektīvā šķirņu attīstība var veicināt makroaļģu šķirņu izveidi ar augstāku ražu, noturību un uzlabotu biokīmisko sastāvu. Papildus tam automatizācijas, mākslīgā intelekta un reāllaika bioprocesu uzraudzības integrācija ļauj optimizēt biomasas ražošanu un pārstrādes procesus. Dato balstītas precīzas akvakultūras sistēmas var samazināt ekspluatācijas izmaksas, uzlabot produktivitāti un nodrošināt mērogojamas, adaptīvas reakcijas uz vides svārstībām.

- Politikas un normatīvais atbalsts.

Makroaļģu biorafinēriju attīstība ir atkarīga no atbalstošas politikas, kas mazina finanšu riskus un veicina ieguldījumus. Stimuli, piemēram, subsīdijas, nodokļu atvieglojumi un pētniecības finansējums, ir būtiski inovācijas un komercializācijas veicināšanai. Regulatīva

saskaņošana ar klimata mērķiem, piemēram, emisiju samazināšanu un atjaunojamās enerģijas mērķiem, var radīt makroaļģu produktiem labvēlīgus tirgus apstākļus. Jūras telpiskās plānošanas un akvakultūras normatīvajiem aktiem jānodrošina atbildīga okeāna resursu izmantošana, līdzsvarojot ekoloģisko integritāti ar rūpniecisko attīstību.

- Makroaļģu produktu tirgus attīstība.

Pieprasījuma paplašināšana pēc makroaļģu izcelsmes produktiem ir būtiska biorafinēriju ekonomiskajai dzīvotspējai. Tādas nozares kā bioplastmasa, farmācija, kosmētika un uztura bagātinātāji piedāvā ievērojamas izaugsmes iespējas. Tomēr pastāv šķēršļi saistībā ar konkurētspēju izmaksu ziņā, normatīvo apstiprinājumu un patērētāju informētību. Lai risinātu šīs problēmas, jāveicina sabiedrības informēšanas kampaņas, sadarbība starp industriju un zinātni, kā arī ilgtspējas sertifikācijas sistēmas. Ekomarķējuma iniciatīvas var palielināt pārredzamību un veicināt uzticību makroaļģēs balstītām alternatīvām.

- Integrācija ar *S-LCA*.

Sociālā ilgtspēja jāintegrē makroaļģu biorafinēriju attīstībā. Piekrastes kopienas, kuras bieži ir iesaistītas makroaļģu ievākšanā un apstrādē, var ievērojami iegūt, pateicoties jaunu darba vietu radīšanai, pārtikas drošības uzlabošanai un ekonomikas dažādošanai. *S-LCA* iekļaušana ļauj izvērtēt nodarbinātības un prasmju attīstības iespējas lauku un piekrastes reģionos, ietekmi uz tradicionālajiem iztikas avotiem un mazajiem zvejniekiem, ētisku izejvielu iegūšanu, godīgu tirdzniecību, sabiedrības iesaisti un ieinteresēto pušu līdzdalību. Lai nodrošinātu taisnīgu ieguvumu sadali, jāievieš līdzdalības pārvaldības modeļi, kopienu kopīgu pārvaldība un pārredzamas zināšanu apmaiņas platformas. Šie mehānismi var stiprināt vietējo īpašumtiesību izjūtu, mazināt konfliktus un nodrošināt iekļaujošu makroaļģu vērtību ķēžu attīstību.

2. METODOLOĢIJA

2.1. *F. lumbricalis* biorafinērijas tehnoloģiskie risinājumi

F. lumbricalis makroaļģe

F. lumbricalis (2.1. att.) ir sarkanā makroaļģe (*Rhodophyta*) [66], kas galvenokārt sastopama Ziemeļatlantijas un Arktikas okeānos, ievērojami izplatīta arī Baltijas jūras reģionā [67]. To uzskata par vienu no ekoloģiski dominējošajām sarkanajām aļģēm šajā reģionā, īpaši Igaunijas piekrastes ūdeņos. Šī suga izceļas ar augstu pielāgošanās spēju dažādiem biotopiem. Tā parasti aug uz cietām virsmām, piemēram, klintīm un akmeņiem, taču kolonizē arī mīkstākus jūras dibena substrātus, tostarp smilšainus un dūņainus apgabalus, kur veido blīvus, monodominējošus zemūdens pļavu masīvus [66].

Kā daudzgadīgs organisms *F. lumbricalis* var sasniegt 5 līdz 10 gadu dzīves ilgumu un spēj augt līdz pat 30 metru dziļumā. Tomēr optimālā augšana visbiežāk novērojama 8 līdz 12 metru dziļumā [68]. Ievērojami ir tas, ka šī suga demonstrē augstu tolerance pret zemsāļainu vidi, kas tai ļauj veiksmīgi attīstīties Baltijas jūras unikālajos apstākļos [66].

Šajā promocijas darbā analizētās biomasas ievākšanas vieta atrodas Kasari līcī, Igaunijā (58.805°N, 22.786°E), septiņu metru dziļumā. Šajā reģionā ir novērtēts, ka *F. lumbricalis* krājumi sasniedz aptuveni 140000 tonnu, no kurām lielākā daļa joprojām netiek izmantota. Tas pārstāv ievērojamu potenciālu ilgtspējīgas biorafinērijas attīstībai.



2.1. att. Sarkanā makroaļģe *F. lumbricalis* [69].

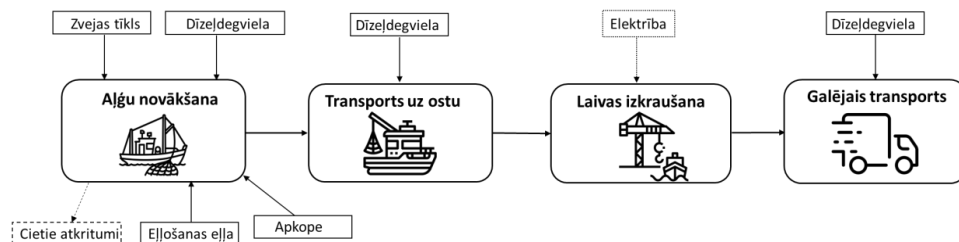
F. lumbricalis makroelementu sastāvs atklāj tās potenciālu daudzveidīgai valorizācijai: ogļhidrāti (39,82 %), lipīdi (30 %), olbaltumvielas (28,32 %) un pelni (1,86 %). Lai nodrošinātu skaidrību un konsekventi inventarizācijas datu interpretācijā un funkcionālās vienības aprēķinos, visā šajā darbā, jāņem vērā šāds pārrēķina koeficients: 1 tonna *F. lumbricalis* sausās masas (*DW*) atbilst 7,6 tonnām svaigās masas (*FW*). Šī attiecība piemērota visos atbilstošajos novērtējumos, lai nodrošinātu precīzu masas bilanci un salīdzinošo analīzi starp procesa posmiem.

Uzstraumes procesi (makroaļģu ievākšana)

Saskaņā ar pašreizējo industrijas praksi par galveno *F. lumbricalis* iegūšanas metodi šajā darbā izvēlēta savvaļas ievākšana (*WH – wild harvesting*). Lai gan viens eksperimentāls

pētījums ir analizējis mākslīgās audzēšanas iespējas, šī metode joprojām atrodas agrīnā attīstības stadijā un vēl nav komercializēta [70]. WH pieeja atspoguļo industriālā partnera *Vetik OÜ* [69] darbības modeli – uzņēmums ir nozīmīgs sadarbības partneris projektā TACO Algae. Uzņēmumam katru gadu tiek piešķirtas ievākšanas licences, kas atļauj līdz 1000 tonnu *F. lumbricalis* ievākšanu uz vienu licenci.

Šajā scenārijā aplūkotā ievākšana notiek Kasari līcī, Igaunijā. Operatīvā procesa struktūra ir parādīta 2.2. att., un tā sastāv no vairākiem atsevišķiem posmiem, kas detalizēti aprakstīti promocijas darbā. Šis ievākšanas modelis ne tikai atspoguļo reālo industrijas praksi, bet arī kalpo kā bāzes līmenis, lai novērtētu WH pieejas vides un ekonomisko veiktspēju makroaļģu biorafinērijas sistēmu kontekstā.



2.2. att. WH (savvaļas ievākšanas) procesa plūsmas diagramma. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71].

Ierosinātais kaskādes biorafinērijas dizains (lejasstraumes procesi)

Lai nodrošinātu pilnīgu *F. lumbricalis* valorizāciju, sadarbībā ar projekta TACO Algae partneriem *Vetik OÜ* un *Nofima AS* izstrādāts daudzproduktu kaskādes biorafinērijas koncepts. Piedāvātā biorafinērijas sistēma ļauj secīgi iegūt augstas pievienotās vērtības produktus (piemēram, pigmentus, olbaltumvielas un karaginānu), kamēr atlikusī biomasa tiek tālāk izmantota kā biostimulators lauksaimniecībā vai kā izejviela biogāzes ražošanai. Šis integrētais dizains nodrošina, ka visas makroaļģu biomasas frakcijas tiek pārveidotas pievienotās vērtības produktos. Biorafinērijas process shematiski parādīts 2.3. att.

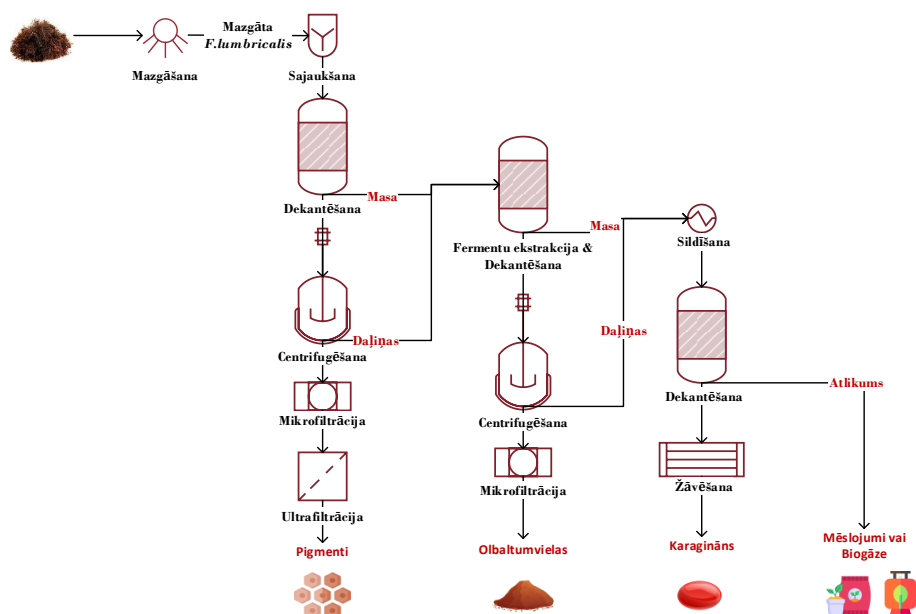
Biorafinērijas process sākas ar iepriekšēju apstrādi – biomasas skalošanu, kas ir būtisks posms, lai nodrošinātu tīrību pirms tālākas apstrādes lejasstraumē. Šajā posmā tiek ņemti smilšu graudi, jūras organismi un citi piemaisījumi. Kvalitātes prasību nodrošināšanai nepieciešami aptuveni 10 kubikmetri ūdens uz vienu tonnu svaigu jūraszāļu.

Pirmā valorifikācijas līnija ir pigmentu ekstrakcija, ņemot vērā šo savienojumu augsto komerciālo vērtību. Procesā tiek izmantota 1:1 attiecība starp ūdeni un biomasu, un atdalīšana tiek veikta ar centrifugām *Flottweg Z3E* un *Alfa Laval AFPX 810*. Pēc tam tiek veikta mikrofiltrācija un ultrafiltrācija, lai attīrītu pigmentu ekstraktu un uzlabotu produkta kvalitāti. Pārējā biomasa tiek novirzīta nākamajam ekstrakcijas posmam.

Otrajā posmā tiek veikta olbaltumvielu ekstrakcija, izmantojot enzīmu hidrolīzi. Biomasa tiek uzsildīta līdz 40 °C, pēc tam sajaukta ar ūdeni, enzīmu alkalāzi un kālija hidroksīdu, pastāvīgi maisot divas stundas. Pēc hidrolīzes olbaltumvielām bagātais šķīdums tiek atdalīts un attīrīts ar mikrofiltrācijas palīdzību, bet cietās atliekas tiek novirzītas karagināna iegūšanai.

Karagināna ieguve ietver atlikušās biomasas termisko apstrādi 95 °C temperatūrā, pievienojot ūdeni un kālija hidroksīdu. Pēc tam notiek fāzu atdalīšana ar trikantera sistēmu, un galaprodukta koncentrācija tiek veikta, izmantojot *Alfa Laval AlfaVap1* tehnoloģiju ar tvaika rekuperācijas sistēmu.

Atlikusī biomas, kas šajā posmā tiek uzskatīta par atkritumiem, kalpo kā ievade diviem iespējamajiem turpmākas izmantošanas ceļiem. Pirmajā gadījumā biomasu tiek pārstrādāta kā mēslojuma piedeva, pateicoties tās biostimulatora īpašībām. Tā minerāliem bagātais sastāvs veicina augu augšanu, augsnes veselību un ražas noturību, kā detalizētāk aplūkots 1.1. nodaļā. Alternatīvajā valorizācijas ceļā atlikusī biomasu tiek novirzīta biogāzes ražošanai. Pamatojoties uz *Fasahati et al. (2022) [72]* izklāstīto pieeju, šis ceļš ietver organisko atlieku anaerobo fermentāciju biogāzes iegūšanai, kam seko enerģijas reģenerācija ar katla un turboģeneratora sistēmu.



2.3. att. Kaskādes biorafinērijas dizaina diagramma. Pielāgots no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73].

Teorētiski piedāvātais kaskādes biorafinērijas modelis ir izstrādāts tā, lai no 1000 kg sausas *F. lumbricalis* biomasas iegūtu 20 kg pigmentu, 100 kg olbaltumvielu un 200 kg karagināna. Tomēr ir būtiski norādīt, ka šo vērtību pamatā ir procesu simulācijas un laboratorijas analīzes un tās vēl nav apstiprinātas rūpnieciskā mērogā.

Ir svarīgi atzīmēt, ka šajā promocijas darbā piedāvātā biorafinēšanas konfigurācija ir tikai viena no vairākām iespējamām dizaina pieejām. Konceptuālās izstrādes posmā tika apsvērti arī alternatīvi pigmentu ekstrakcijas paņēmieni, piemēram, ultraskaņas un enzīmu metodes, jo tām ir potenciāls uzlabot energoefektivitāti un kopējo procesa veiktspēju [74]. Galu galā tika izvēlēta ūdens bāzēta ekstrakcijas metode, galvenokārt tāpēc, ka bija pieejami uzticami un

konsekventi primārie dati, kas nodrošina precīzāku un ticamāku ilgtspējas novērtējumu. Tomēr šo alternatīvo metožu iespējamās vides un ekonomiskās priekšrocības aplūkotas un kritiski izvērtētas rezultātu nodaļā.

Alternatīvie biorafinērijas dizaini (lejasstraumes procesi)

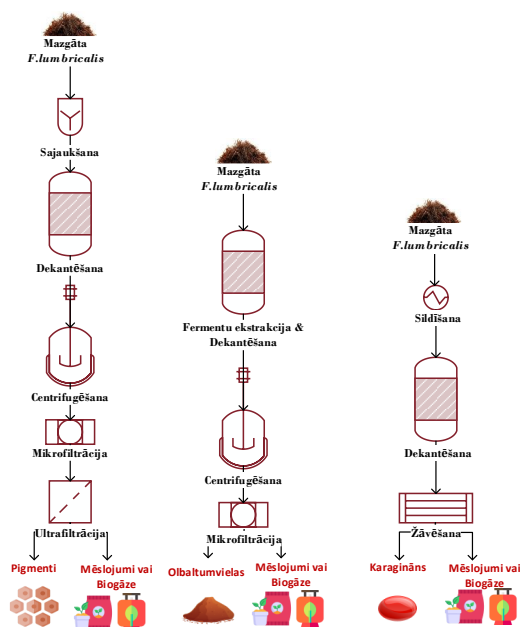
Šajā pētījumā izstrādātie alternatīvie biorafinērijas dizaini pārstāv divas tradicionālas pieejas, kas iepriekš aprakstītas zinātniskajā literatūrā un kontrastē ar iepriekš apskatīto kaskādes modeli (CB). Līdz iepriekšējai apstrādei visos dizainos tiek izmantots identisks tehnoloģiskais izkātojums, kas nozīmē, ka *F. lumbricalis* ievākšana un sākotnējā apstrāde tiek veikta pēc vienas procedūras. Tomēr būtiskās atšķirības parādās biorafinērijas ekstrakcijas posmos, proti, biomasas apstrādes metodēs, atlieku apsaimniekošanā un galaproduktu konceptualizācijā. Izstrādāti divi dizaini.

1. Vienas produkta ekstrakcija.

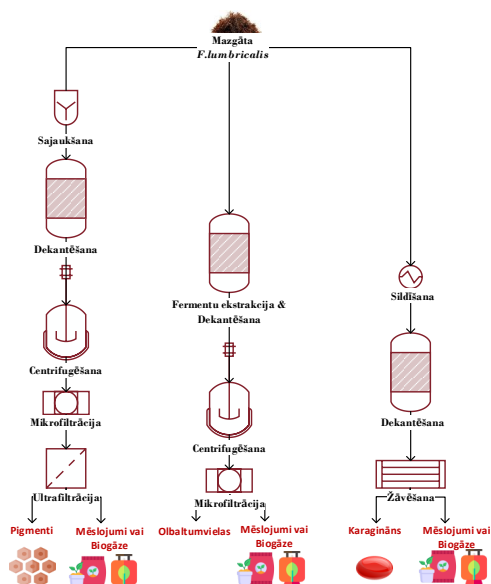
Vienas produkta ekstrakcija pārstāv visvienkāršāko biorafinērijas darbības scenāriju. Tā ir plaši lietota LCA pētījumos literatūrā, īpaši saistībā ar makroaļģu izmantošanu enerģijas ražošanā, piemēram, bioetanola un biogāzes iegūšanā [75]. Šie pētījumi ir vērtīgi, lai izprastu tehnoloģiskos procesus un noteiktu to efektivitāti, identificējot kritiskos parametrus un optimālās tehnoloģijas, kas maksimizē produktu ražu. Tomēr šī pieeja neatbilst aprites ekonomikas principiem, jo ekstrakcijas atkritumi netiek sistemātiski atkārtoti izmantoti. Rezultātā biomasu tiek izmantota tikai viena produkta ieguvei, atstājot citas vērtīgās vielas atlieku frakcijās. Tādēļ, lai iegūtu līdzvērtīgu vērtīgo savienojumu daudzumu kā kaskādes pieejā, nepieciešams ievērojami vairāk sākotnējās biomasas. Šajā pētījumā modelētajā sistēmā ir iekļautas atsevišķas ekstrakcijas līnijas pigmentiem, olbaltumvielām un karagīnam. Salīdzināmības nolūkos pieņemts, ka arī šajā scenārijā atkritumi tiek izmantoti mēslojuma vai biogāzes ražošanai. 2.4. att. parādīta šī dizaina tehnoloģiskā shēma.

2. Trīs līniju ekstrakcija.

Trīs līniju ekstrakcijas konfigurācija piedāvā alternatīvu kaskādes modelim, vienmērīgi sadalot sākotnējo biomasu starp trim atsevišķām apstrādes līnijām, kas katra paredzēta pigmentu, olbaltumvielu vai karagīna ekstrakcijai, kā parādīts 2.5. att. Lai gan ievades biomasas daudzums paliek tāds pats kā kaskādes modelī, šī pieeja noved pie ievērojami zemākas produktu atgūšanas efektivitātes, tādējādi samazinot kopējo *F. lumbricalis* valorizācijas efektivitāti. Galvenais šī modeļa trūkums ir bioaktīvo savienojumu nepietiekama izmantošana. Katra ekstrakcijas līnija apstrādā tikai vienu trešdaļu no kopējās biomasas, un atlikušās frakcijas, kas satur izmantojamus savienojumus, netiek tālāk apstrādātas. Tā vietā šie atlikumi tiek novirzīti sekundāriem lietojumiem, piemēram, biogāzes ražošanai vai mēslojumam, neizmantojot pilnībā biorafinērijas potenciālu. Šajā scenārijā viena tonna *F. lumbricalis* biomasas tiek vienādi sadalīta – 333,33 kg katrai ekstrakcijas līnijai. Tādējādi galaproduktu iznākums, salīdzinot ar kaskādes pieeju, ir ievērojami zemāks: iegūst tikai 13,33 kg pigmentu, 33,33 kg olbaltumvielu un 66,67 kg karagīna.



2.4. att. Viena produkta ekstrakcijas sistēmas dizaina diagramma. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73].



2.5. att. Trīs līniju ekstrakcijas sistēmas dizaina diagramma. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73].

2.2. Vides dzīves cikla novērtējums

Dzīves cikla novērtējums (*LCA*) ir standartizēta metodoloģija, ko izmanto, lai novērtētu potenciālo vides ietekmi, ko rada produkts, process vai pakalpojums visā tā dzīves ciklā – sākot no izejvielu ieguves, ražošanas un transportēšanas līdz lietošanai un utilizācijai dzīves cikla beigās. Saskaņā ar ISO 14040 un ISO 14044 standartiem *LCA* ietver četras galvenās fāzes: mērķa un uzdevumu definēšanu, inventarizācijas analīzi, ietekmes novērtējumu un interpretāciju [76].

Pirmā fāze – mērķa un uzdevumu definēšana – nosaka pētījuma pamatu, tostarp sistēmas robežas, paredzēto lietojumu un detalizācijas līmeni. Šajā posmā tiek ieviesta arī funkcionālā vienība (*FU*), kas kalpo kā atskaites punkts, ļaujot kvantificēt sistēmas funkcijas un nodrošinot salīdzināmību dažādos novērtējumos. Sistēmas robeža nosaka, kuri procesi posmi tiek iekļauti analīzē, un nodrošina, ka visi būtiskie ieejas un izejas dati tiek uzskaitīti kā elementārās plūsmas.

Dzīves cikla inventarizācijas (*LCI*) analīzes fāze ietver datu vākšanu un nepieciešamo aprēķinu veikšanu, lai kvantificētu sistēmas resursu patēriņu un emisijas. Šis ir iteratīvs process, kurā datu precizēšana pakāpeniski uzlabo modeļa precizitāti. Ievaddati un izejas dati parasti tiek grupēti kategorijās, piemēram, resursu un enerģijas ievades, produktu un blakusproduktu izlaides, emisijas gaisā, izplūdes ūdenī un atkritumi uz sauszemes.

Trešā fāze – dzīves cikla ietekmes novērtējums (*LCIA*) – novērtē inventarizācijas rezultātu nozīmīgumu, pārveidojot resursu plūsmas un emisijas potenciālajā vides ietekmē. Šis posms sniedz skaidrāku priekšstatu par sistēmas radītajām vides slodzēm. Ir pieejamas vairākas *LCIA* metodoloģijas, kas katra piedāvā atšķirīgus skatījumus un ietekmes kategorijas vides veiktspējas novērtēšanai.

Interpretācijas fāzē tiek apkopoti un analizēti visi iegūtie rezultāti, nodrošinot to atbilstību pētījuma sākotnējiem mērķiem un tvērumam. Šī fāze ļauj veikt visaptverošu analīzi par sistēmas ietekmi uz vidi un atbalsta lēmumu pieņemšanu, identificējot galvenos ietekmes faktorus, kompromisus un iespējamus uzlabojumus.

Lai validētu un kontekstualizētu šajā promocijas darbā lietoto *LCA* metodoloģiju, tā sākotnēji tika piemērota sistēmām, kurām ir salīdzināmas īpašības ar piedāvāto *F. lumbricalis* kaskādes biorafinēšanas modeli. Pirmais references gadījums ietvēra mikroaļģu audzēšanas sistēmas novērtējumu [77], kas sniedza būtisku ieskatu parametru izvēlē, īpaši attiecībā uz enerģijas patēriņu, atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanu, kā arī biogāzes valorizāciju. No šī pētījuma iegūtie galvenie secinājumi, īpaši tie, kas saistīti ar kombinētās siltuma un elektroenerģijas ražošanas (*CHP*) vienību, tika pielāgoti *F. lumbricalis* modelim. Turklāt ģeogrāfiskā tuvība Baltijas reģionā ļāva pārnest atbilstošus reģionālos modelēšanas parametrus, īpaši saistībā ar enerģētikas infrastruktūru un vidēja mēroga biogāzes sistēmu darbību.

Otrais references gadījums bija saistīts ar inovējošas pārtikas atkritumu apstrādes sistēmas *LCA*, kurā tika izmantotas melnās karavīru mušas kāpuri [78]. Šī sistēma tika izvēlēta tās slēgtā cikla darbības modeļa dēļ, kas cieši saskan ar kaskādes biorafinēšanas pamatā esošajiem aprites resursu atgūšanas principiem. Tā sniedza vērtīgas metodoloģiskas vadlīnijas attiecībā uz inventarizācijas modelēšanu biomasā balstītās sistēmās un alternatīvo scenāriju izstrādi. Šie

metodoloģiskie elementi tika turpmāk precizēti un pielāgoti *F. lumbricalis* biorafinēšanas novērtējuma specifiskajām prasībām.

LCA dažādām ievākšanas un audzēšanas metodēm uzstraumes posmā

Šī sākotnējā LCA galvenais mērķis ir identificēt vides karstpunktus, kas saistīti ar *F. lumbricalis* savvaļas ievākšanu (WH) Kasari līcī, Igaunijā. Tā kā šī ir dominējošā un pašlaik vienīgā komerciālā metodes šīs sugas ievākšanai, WH kalpo kā bāzes scenārijs vides veiktspējas novērtējumam. Lai kontekstualizētu un salīdzinātu WH radīto vides ietekmi, tika izvērtētas divas alternatīvas makroaļģu audzēšanas metodes. Ņemot vērā dokumentētas liela mēroga *F. lumbricalis* audzēšanas prakses trūkumu, salīdzināšanai tika izmantotas līdzīgas sistēmas, kas ietver citu makroaļģu sugu audzēšanu.

Jūras audzēšanas (OFC – *off-shore cultivation*) scenārijs tika modelēts, balstoties Seghetta *et al.* (2016) [24] izstrādātajā detalizēto procesa inventarizācijā, kas apraksta brūno makroaļģu audzēšanu atklātās jūras apstākļos.

Sauszemes audzēšanas (ONC – *on-shore cultivation*) scenārijā izmantoti dati no HYNDLA [79], projekta TACO *Algae* partnera, kas veicis sarkanās makroaļģes *Schizymenia valentinae* audzēšanas testus sauszemes sistēmās.

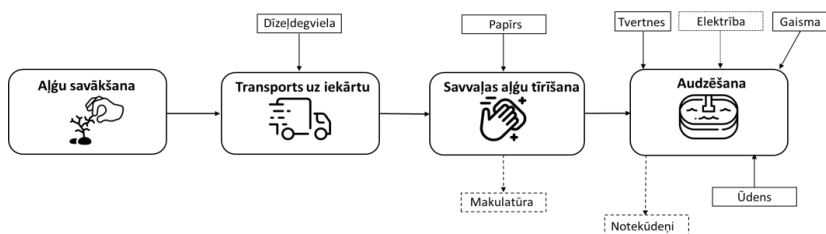
Funkcionālā vienība (FU) šajā novērtējumā definēta kā 1 tonna svaigu makroaļģu, kas ievāktas vai audzētas, pieņemot 100 % sugas tīrību. Šī vienība nodrošina metodoloģisku konsekvenci un atvieglo salīdzināmību ar esošajiem LCA pētījumiem makroaļģu sistēmās. LCA tika veikta, izmantojot SimaPro 9.4 programmatūru, ko izstrādājis Pré Consultants [80].

Šajā promocijas darbā veiktās LCA pamatā ir Ecoinvent 3.8 datubāze, kas tika izvēlēta tās visaptverošo, recenzēto datu kopu un plašās atzīšanas dēļ šajā jomā. Ecoinvent aptver dažādus sektorus un ģeogrāfiskos reģionus, nodrošinot datu konsekvenci un atbalstot gan atribucionālos, gan konsekvenciālos modeļus. Tās atbilstība ISO 14040/44 standartiem garantē metodoloģisko caurskatāmību, reproducējamību un zinātnisko precizitāti [81].

- Sistēmas robežas.

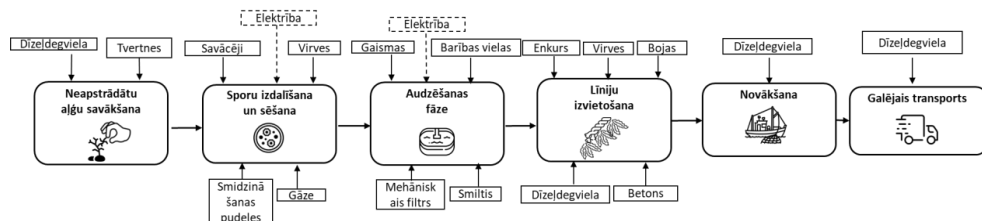
WH gadījumā tika izmantots sistēmas apraksts, kas sniegts 2.1. nodaļā.

ONC scenārija struktūra ir apkopota 2.6. att., bet detalizēts apraksts atrodams promocijas darbā. Šajā pētījumā modelētā ONC sistēma balstīta primārajos datos no HYNDLA, kas koncentrējas uz *Schizymenia valentinae* – sarkanās makroaļģes – audzēšanu Islandē. Lai arī šī suga atšķiras no *F. lumbricalis*, sistēma nodrošina atbilstošu analogu, lai novērtētu sauszemes audzēšanas ietekmi uz vidi sarkano makroaļģu kontekstā.



2.6. att. ONC (sauszemes audzēšanas) procesa plūsmas diagramma. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71].

Sistēmas robežu shematiskais attēlojums jūras audzēšanas (*OFC*) scenārijam sniegts 2.7. att., un tas detalizēti aprakstīts promocijas darbā. Šajā pētījumā izvērtētā *OFC* sistēma balstīta *Seghetta et al.* (2016) [24] izstrādātajā modelī *Laminaria digitata* audzēšanai, kas izvēlēts, ņemot vērā tā ģeogrāfisko un vides atbilstību Baltijas jūras reģionam, īpaši Dānijai. Lai arī sistēma nav tieši izstrādāta *F. lumbricalis* vai *S. valentinae* audzēšanai, tā nodrošina visaptverošu un pārnesamu procesu inventarizāciju un funkcionāli ir līdzīga *OFC* dizainiem, kas izmantoti sarkano makroaļģu pētījumos [82], [83].



2.7. att. *OFC* (jūras audzēšanas) procesa plūsmas diagramma. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71].

- Alternatīvie scenāriji.

Lai izpētītu iespējas uzlabot sistēmas ilgtspēju, šajā pētījumā ieviesti vairāki alternatīvie scenāriji (AS), kuros tiek mainīti atsevišķi parametri, salīdzinot ar bāzes konfigurāciju. Šie scenāriji izstrādāti, lai novērtētu, kā mērķtiecīgas izmaiņas var samazināt vides ietekmi dažādās makroaļģu iegūšanas sistēmās. Alternatīvo scenāriju analīze sniedz ieskatu par to, kā sistēmas veiktspēju var uzlabot, ieviešot tehnoloģiskus jauninājumus, optimizējot procesus un lietojot ilgtspējīgākas prakses. Katrs scenārijs risina konkrētu darbības aspektu, kas identificēts kā būtisks vides ietekmes faktors sākotnējā *LCA* novērtējumā. Piedāvātie alternatīvie scenāriji ir šādi:

- 1) AS1 – saules enerģijas ieviešana, nodrošinot 50 % no elektroenerģijas pieprasījuma gan *ONC*, gan *OFC* sistēmās. Šī izmaiņa balstīta novērojumā, ka elektroenerģijas patēriņš būtiski ietekmē šo sistēmu vides rādītājus;
- 2) AS2 – *ONC* sistēmas pārveidošana, aizstājot mākslīgo LED apgaismojumu ar dabīgo saules gaismu, lai samazinātu enerģijas patēriņu un uzlabotu ilgtspēju;
- 3) AS3 – videi draudzīga pretapaugšanas līdzekļa ieviešana, aizstājot vara oksīda bāzes šķīdumu, kas pašlaik tiek izmantots *WH* scenārijā. Jaunais līdzeklis modelēts pēc *Lin and Usino* (2014) publikācijas [84];
- 4) AS4 – dīzeldegvielas patēriņa samazināšana par 10 % gan *WH*, gan *OFC* scenārijos, uzsverot kuģu degvielas patēriņa efektivitātes uzlabojumus, lai samazinātu emisijas un resursu izmantošanu.

- *LCIA* metode.

Lai novērtētu trīs makroaļģu iegūšanas scenāriju vides veiktspēju, tika izvēlēta *Environmental Footprint 3.0* ietekmes novērtēšanas metode [85]. Tika lietots rūpīgi atlasīts ietekmes indikatoru kopums, kas nodrošina novērtējuma atbilstību un pilnīgumu, atspoguļojot makroaļģu ievākšanas un audzēšanas sistēmu specifiku. Izmantoti šādi indikatori: klimata

pārmaiņas (CC), cieto daļiņu piesārņojums (PM), acidifikācijas potenciāls (AP), eitrofikācija saldūdeņos (EF), eitrofikācija jūrās (EM), ekotoksicitāte saldūdeņos (ECF), zemes izmantošana (LU), ūdens izmantošana (WU), fosilo resursu izmantošana (RF) un minerālu un metālu izmantošana (RM&M). Izvēles pamatojums un detalizēts indikatoru apraksts sniegts pilnajā disertācijas manuskriptā.

- LCI.

LCI datu kopa WH scenārijam ir sniegta 2.1. tabulā. Visi dati ir normalizēti attiecībā pret funkcionālo vienību un pielāgoti, ņemot vērā iekārtu un procesu darbības laiku, ja tas ir piemērojams. Datu kopa atspoguļo reālos apstākļus un darbības praksi, jo inventarizācija tika skalota atbilstoši kopējam *F. lumbricalis* daudzumam, ko *Vetik OÜ* ievāca 2021. gadā.

2.1. tabula

LCI dati WH scenārijam. Pielāgots no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [73]

	Kategorija	Materiāls / komponents	Ievade <i>SimaPro</i> programmatūrā	Daudzums	Vienība	Datu avots
Alģu novākšana						
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	Zvejas tīkls	Nylon 6-6 {RER} market for nylon 6-6 APOS, U	1,67	kg	Primārie dati
		Dīzeļdegviela novākšanai	Diesel, burned in fishing vessel {EU} diesel, burned in fishing vessel APOS, U	190	MJ	Primārie dati
		Smērēļļa	Lubricating oil {RER} market for lubricating oil APOS, U	2,75	kg	Primārie dati
		Epoksīda krāsa	Epoxy resin, liquid {RER} production APOS, U	1,25	kg	Primārie dati
		Pretapaugšanas līdzeklis	Specific model from [84]	0,42	kg	Primārie dati
		Tērauds laivai	Long liner, steel {RER} long liner construction, steel APOS, U	4,00	kg	[86]
<i>Izvides</i>	Izejmateriāli, atkritumi	Smilšu, māla un dūņu atkritumi	Refinery sludge {Europe without Switzerland} treatment of refinery sludge, sanitary landfill APOS, U	21	kg	Primārie dati
Transports uz ostu						
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	Dīzeļdegviela transportam	Diesel, burned in fishing vessel {EU} diesel, burned in fishing vessel APOS, U	52,77	MJ	Primārie dati
Laivas izkraušana						
<i>Ievades</i>	Enerģija	Elektrība laivas izkraušanai	Electricity, medium voltage {EE} market for APOS, U	0,69	kWh	Primārie dati
Galējais transports						
<i>Ievades</i>	Transports	Kravas automašīna	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric	53,20	tkm	Primārie dati

Kategorija	Materiāls / komponents	Ievade <i>SimaPro</i> programmatūrā	Daudzums	Vienība	Datu avots
		ton, euro5 {RER} market for transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 APOS, U			

Modelēšanā izmantotais “elektrība, vidējsprieguma” profils atspoguļo ieceri simulēt apstākļus, kas raksturīgi potenciālai rūpnieciskā mēroga darbībai.

Inventarizācijas dati *ONC* scenārijam ir apkopoti 2.2. tabulā. Tāpat kā *WH* scenārijā, visi dati ir normalizēti attiecībā pret funkcionālo vienību un pielāgoti, ņemot vērā iekārtu un darbības procesu paredzēto kalpošanas laiku, ja tas ir piemērojams. Datu kopa ir iegūta, pamatojoties uz kopējo sarkano makroaļģu biomasas daudzumu, ko *HYNDLA* audzēja 2021. gadā, nodrošinot tiešu korelāciju ar faktiskajiem ražošanas datiem. Ņemot vērā, ka ūdens sūkņēšanas infrastruktūra tiek kopīgi izmantota gan audzēšanas tvertnēm, gan citām objekta funkcijām, nebija iespējams precīzi atdalīt makroaļģēm specifisko elektroenerģijas patēriņu. Lai šo ierobežojumu pārvarētu, elektroenerģijas patēriņš jūras ūdens sūkņēšanai tika aprēķināts, izmantojot *Piccino et al. (2016) [87]* piedāvāto vienādojumu, kas nodrošina standartizētu un uzticamu pieeju šī parametra modelēšanai sistēmas robežās.

2.2. tabula

LCI dati ONC scenārijam. Pielāgots no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [73]

Kategorija		Materiāls/ komponents	Ievade <i>SimaPro</i> programmatūrā	Daudzums	Vienība	Datu avots
Transports uz ražotni						
<i>Ievades</i>	Transports	Vieglā automašīna	Transport, passenger car, EURO 4 {RER} market for APOS, U	15	km	Primārie dati
Cleaning the wild algae						
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	Papīra salvetes	Tissue paper {GLO} market for APOS, U	0,34	kg	Primārie dati
<i>Izvides</i>	Atkritumi	Papīra atkritumi	Waste paper, unsorted {Europe without Switzerland} market for APOS, U	0,34	kg	Primārie dati
Cultivation						
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	Tvertnes	Polystyrene, general purpose {GLO} market for APOS, U	1,40	kg	Primārie dati
		Jūras ūdens	Water, Saline water consumption	32640	kg	Primārie dati
		Ūdens attīrīšana	Tap water {Europe without Switzerland} market for APOS, U	1120	kg	Primārie dati
		Mazgāšana ar ziepēm	Modeled based on technical datasheet	0,446	l	Primārie dati
		LED apgaismojums	Light emitting diode {GLO} market for APOS, U	0,1587	kg	Primārie dati
		Ūdens sūknis	Cast iron {GLO} market for APOS, U	12	kg	Primārie dati
	Enerģija	Elektrība apgaismojumam	Electricity, medium voltage {IS} market for APOS, U	4652	kWh	Primārie dati

	Kategorija	Materiāls/ komponents	Ievade SimaPro programmatūrā	Daudzums	Vienība	Datu avots
		Elektrība sūkņiem	Electricity, medium voltage {IS} market for APOS, U	2,22	kWh	Primārie dati
	Zemes izmantošana	Audzēšanas ražotne	Occupation, industrial area	333	m ² a	Primārie dati
Izvades	Notekūdeņi	Notekūdeņi	Wastewater, from residence {CH} market for wastewater, from residence APOS, U	1,12	m ³	Primārie dati

Modelēšanā izmantotais “elektrība, vidējsprieguma” profils atspoguļo ieceri simulēt apstākļus, kas raksturīgi potenciālai rūpnieciskā mēroga darbībai.

Attiecībā uz OFC scenāriju LCI balstās sekundārajos datos, kas iegūti no zinātniskās literatūras. Pilnīgā inventarizācija ir iekļauta promocijas darbā. Lai nodrošinātu metodoloģisko konsekvenci un salīdzināmību ar WH un ONC scenārijiem, visi dati ir sakārtoti atbilstoši definētajai FU. Tāpat detalizētas inventarizācijas un modelēšanas pieņēmumi attiecībā uz alternatīvajiem scenārijiem (AS1–AS4) ir izklāstīti pašā promocijas darbā.

Visas biorafinērijas sistēmas LCA

Šīs LCA pamatmērķis ir novērtēt piedāvātās *F. lumbricalis* kaskādes biorafinērijas (CB) sistēmas vides veiktspēju, kā detalizēti aprakstīts 2.1. nodaļā. Papildus pētījumā veikta salīdzinošā analīze starp inovatīvo kaskādes modeli un divām alternatīvām biorafinērijas konfigurācijām: viena produkta ekstrakcijas modeli (SPE) un trīs līniju ekstrakcijas sistēmu (TLE). Lai nodrošinātu visaptverošu un daudzdimensionālu novērtējumu, tika definētas divas funkcionālās vienības (FU).

Pirmās (FU1) pamatā ir biomasas apjoms, un tā ir definēta kā 1 tonna apstrādātas sausas masas (DW) *F. lumbricalis*. Šī vienība ļauj analizēt procesu līmeņa vides ietekmi un identificēt kritiskos posmus un emisiju karstpunktus biorafinērijas sistēmā.

Otrā (FU2) ir orientēta uz galaproduktu iznākumu un atbilst trīs augstas pievienotās vērtības savienojumu kopējam daudzumam, ko iegūst kaskādes sistēmā: 20 kg pigmentu, 100 kg olbaltumvielu un 200 kg karagināna. Šī vienība atvieglo sistēmu efektivitātes un resursu izmantošanas salīdzinājumu CB, SPE un TLE konfigurācijās. Būtiski, ka TLE scenārijā iegūto produktu daudzums ir ievērojami zemāks, tāpēc nepieciešama funkcionāla kompensācija, lai nodrošinātu atbilstību kaskādes sistēmas veiktspējai.

Lai novērstu šo trūkumu, ieviesti komerciāli pieejami aizvietotāji, kas nodrošina funkcionālo ekvivalenci. Kā pigmenta frakcijas aizvietotājs izmantots nātrijs disulfīts, imitējot *Allura Red AC* funkcionālās īpašības [88], [89], sojas proteīna barība tika izmantota olbaltumvielu deficīta kompensēšanai, savukārt kartupeļu ciete kalpoja kā biezinātājs karagināna aizstāšanai [90]. Divu funkcionālo vienību izmantošana atbilst labajai praksei biorafinērijas sistēmu LCA novērtējumos [91], [92], ļaujot daudzpusīgāk interpretēt vides kompromisus un veiktspēju dažādās sistēmu konfigurācijās.

Visi modeļi un aprēķini veikti, izmantojot *SimaPro 9.5* versiju, iekļaujot fonu datus no *Ecoinvent 3.9.1* datubāzes.

- Sistēmas robežas un alternatīvie scenāriji.

Šajā pētījumā modelētā pilnā biorafinērijas sistēma sastāv no diviem atšķirīgiem posmiem: uzstraumes posma, ko pārstāv *F. lumbricalis* savvaļas ievākšana (kā aprakstīts iepriekšējā apakšnodaļā), un lejasstraumes posma, kas ietver biomasas pārstrādes operācijas. Abi šie posmi kopā veido CB sistēmas konfigurāciju, kas kalpo kā bāzes scenārijs vides veiktspējas novērtējumam. Sistēmas robežas atbilst procesu izkārtojumam, kas redzams 2.2. un 2.3. att., atainojot CB darbplūsmu no izejvielu ievākšanas līdz produktu ekstrakcijai un dzīves gala posma valorizācijai.

Lai novērtētu konkrētu darbības izmaiņu ietekmi uz vides rādītājiem, tika izstrādāti četri alternatīvie scenāriji (AS). Šie scenāriji koncentrējas uz galvenajiem ilgtspējas virzītājspēkiem, piemēram, enerģijas patēriņu un biomasas atlieku izmantošanu, kas būtiski ietekmē sistēmas ekoloģiskās pēdas nospiedumu. Definēti turpmāk raksturotie alternatīvie scenāriji.

1. AS1 – izvērtēta biogāzes ražošanas integrācija kā dzīves gala posma stratēģija no karagināna ekstrakcijas atlikušās biomasas valorizācijai, aizstājot tās tradicionālo izmantošanu kā biostimulatoru. Šī pieeja balstīta *Fasahati et al.* (2022) [72] metodoloģijā, kurā paredzēts divpakāpju process: anaerobā fermentācija biogāzes ražošanai un tās pārveidošana elektroenerģijā, izmantojot katla/turboģeneratora sistēmu.
2. AS2 – biorafinērijas procesā tiek ieviests žāvēšanas posms, lai novērstu biomasas degradāciju un atvieglotu transportēšanu gadījumos, kad tūlītēja pārstrāde nav iespējama. Šajā scenārijā žāvēšana tiek veikta pēc pigmentu ekstrakcijas, balstoties *Vetik OÜ* laboratorijas datos, kas apliecina, ka pigmentu raža ir visaugstākā, ja ekstrakcija notiek no svaigas *F. lumbricalis*. Žāvēšana samazina biomasas mitruma saturu līdz 20 %, nodrošinot optimālu saglabāšanu un samazinot degradācijas risku. Tā kā nav pieejami primārie dati par žāvēšanas tehnoloģijām, modelēšana veikta, izmantojot *Ecoinvent 3.9.1* datubāzes standarta žāvēšanas procesu, kas izmantots arī *Seghetta et al.* (2016) [24] *S. latissima* biomasas žāvēšanai.
3. AS3 – analizēta atjaunojamās enerģijas maisījuma ieviešana, aizstājot Igaunijas tradicionālo elektroenerģijas tīklu. Kā atsauce izmantota Atjaunojamās enerģijas sertifikācijas sistēma (REC) [93], simulējot scenāriju, kurā visa biorafinērijas elektroenerģijas vajadzība tiek apmierināta ar atjaunojamiem energoresursiem. Enerģijas maisījuma sastāvs pielāgots no *Ecoinvent 3.9.1*.
4. AS4 – izpētīta saules enerģijas sistēmas uzstādīšanas iespējamība pašā biorafinērijas objektā, lai ražotu elektroenerģiju uz vietas, tādējādi samazinot atkarību no ārējiem enerģijas avotiem un kopējo ietekmi uz vidi. Scenārijā iekļauti saules paneli un invertori, kas modelēti, izmantojot *Ecoinvent 3.9.1* datubāzes datus.

Sistēmas robežas SPE un TLE konfigurācijām attiecīgi parādītas 2.6. un 2.7. att.

- LCIA

LCA aprēķini šajā pētījumā tika veikti, izmantojot *SimaPro v9.5* programmatūru un *ReCiPe2016* ietekmes novērtēšanas metodi (*Hierarchist* perspektīva, vidējā un gala ietekmes līmeņi) [94]. *ReCiPe2016* nodrošina visaptverošu ietvaru, kas satur 18 vidējā līmeņa indikatorus, sistemātiski klasificētus trīs galvenajās aizsargājamajās jomās: cilvēka veselība,

ekosistēmas un resursu pieejamība. Šo kategoriju, kuras detalizēti aprakstītas promocijas darbā, pamatā ir noteikti kaitējuma ceļi, kas ļauj strukturētu un jēgpilnu rezultātu interpretāciju dažādās sistēmas konfigurācijās.

- *LCI.*

Šim pētījumam izstrādātā *LCI* galvenokārt balstīta tiešajos datos, kas iegūti no galvenajiem industrijas un pētniecības partneriem *TACO Algae* projektā. Uzņēmums *Vetik OÜ* sniedza empīriskus datus par *WH* darbībām, savukārt *NOFIMA* nodrošināja pilotmēroga datus par lejasstraumes biorafinērijas ekstrakcijas procesiem. Šie primārie datu avoti nodrošina augstu reprezentativitātes un atbilstības līmeni bāzes scenārija modelēšanai.

Gadījumos, kad primārie dati nebija pieejami, inventarizācija papildināta ar uzticamiem sekundārajiem avotiem. Tie ietvēra *Ecoinvent v3.9.1* datubāzi un recenzēto zinātnisko literatūru, īpaši attiecībā uz komponentiem, piemēram, biogāzes ražošanu un vispārējiem procesa ievades datiem.

Lai aprēķinātu enerģijas patēriņu, kas saistīts ar *NOFIMA* pilotmēroga procesu mērogošanu līdz definētajai funkcionālajai vienībai, tika lietotas standarta mērogošanas vienādojumu metodes un literatūrā norādītās atsaucēs vērtības [87]. Šī pieeja nodrošināja konsekvenci darbības enerģijas patēriņa novērtējumā rūpnieciskā mērogā. Izmantoto iekārtu tehniskās specifikācijas un patēriņa aprēķini ir detalizēti izklāstīti promocijas darbā.

Uzstraumes darbības, kas saistītas ar *F. lumbricalis* savvaļas ievākšanu, visās šajā pētījumā izvērtētajās biorafinērijas konfigurācijās (*CB*, *SPE* un *TLE*) ir identiskas. Tās atbilst jau iepriekš ziņotajiem datiem 2.1. tabulā un netiek mainītas salīdzinošajā analizē. Tāpat iepriekšējās apstrādes posms un biorafinērijas objekta kopējie parametri ir standartizēti visās konfigurācijās, lai nodrošinātu konsekvenci sistēmas modelēšanā.

2.3. tabulā ir apkopoti inventarizācijas dati par abiem iepriekšējās apstrādes posmiem. Visi dati ir normalizēti atbilstoši funkcionālajām vienībām un pielāgoti atkarībā no iekārtu kalpošanas laika, kur tas ir piemērojams. Datu kopa atspoguļo kopējo biomasas apjomu, ko *Vetik OÜ* ievāca 2021. gadā – 181 tonna svaigas *F. lumbricalis* biomasas –, un kalpo kā reprezentatīvs pamats visaptverošai vides ietekmes novērtēšanai.

2.3. tabula

Iepriekšējā apstrādes posma un biorafinērijas objekta *LCI* dati. Neatkarīgi no izvēlēta dizaina. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73]

	Kategorija	Materiāls/ komponents	Ievade <i>SimaPro</i> programmatūrā	Daudzums	Vienība	Datu avots
Pirmsapstrāde						
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	Ūdens mazgāšanai	Tap water {Europe without Switzerland} market for tap water Cut-off, U	7,69E+04	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
<i>Izvades</i>	Atkritumi	Notekūdeņi	Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average Cut- off, U	76,92	m ³	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
Biorafinēšanas iekārta						
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	Biorafinēšanas rūpnīca	Chemical factory, organics {RER} chemical factory construction, organics Cut-off, U	4,00E-07	p	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1

Turpmākās *LCI* vērtības atšķiras atkarībā no izvēlētās biorafinērijas konfigurācijas, jo katrai sistēmai ir raksturīgas atšķirīgas prasības attiecībā uz resursiem, enerģijas patēriņu un ekstrakcijas efektivitāti. Šīs atšķirības tieši ietekmē katra modeļa vides veiktspēju. 2.4. tabulā ir sniegta detalizēta *LCI CB* sistēmai, iekļaujot ar šo sistēmu saistītās materiālu un enerģijas plūsmas. Datu kopa atspoguļo *CB* procesa integrēto raksturu, kurā makroaļģu biomasa tiek secīgi pārveidota vairākos augstas pievienotās vērtības produktos. Visi dati modelēti atbilstoši *FU* un normalizēti, lai precīzi atspoguļotu sistēmas līmeņa veiktspēju.

2.4. tabula

CB sistēmas *LCI* dati. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73]

	Kategorija	Materiāls/ komponents	Ievade <i>SimaPro</i> programmatūrā	Daudzums	Vienība	Datu avots
1. līnija (pigmentu ekstrakcija)						
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	Ūdens sajaukšanai	Tap water {Europe without Switzerland} market for tap water Cut-off, U	7692	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
	Enerģija	Sajaukšana	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	338,45	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Trikanteris	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	153,84	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Centrifūga	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	153,84	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Mikrofiltrācija	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	38,56	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Ultrafiltrācija	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	38,56	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
<i>Izvides</i>	Izejmateriāli , atkritumi	Notekūdeņi	Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average Cut-off, U	7,692	m ³	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
2. līnija (olbaltumvielu ekstrakcija)						
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	Ferments	Enzymes {GLO} market for enzymes Cut-off, U	7,35	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		KOH	Potassium hydroxide {GLO} market for potassium hydroxide Cut-off, U	5,88	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Ūdens	Tap water {Europe without Switzerland} market for tap water Cut-off, U	15344	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
	Enerģija	Fermentu ekstrakcija	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	802	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Dekantēšana	Electricity, medium voltage {EE} market	230,16	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1

Kategorija		Materiāls/ komponents	Ievade <i>SimaPro</i> programmatūrā	Daudzums	Vienība	Datu avots
<i>Izvades</i>	Izejmateriāli , atkritumi	Centrifūga	for electricity, medium voltage Cut-off, U Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	17,33	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Mikrofiltrācija	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	154,44	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Notekūdeņi	Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average Cut-off, U	15,356	m ³	Elementār- plūsma
	3. līnija (karagināna ekstrakcija)					
<i>Ievades</i>	Izejmateriāli	KOH	Potassium hydroxide {GLO} market for potassium hydroxide Cut-off, U	5,28	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Ūdens	Tap water {Europe without Switzerland} market for tap water Cut-off, U	15144	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
	Enerģija	Sildīšana	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	1897	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Dekantēšana	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	227	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Žāvēšana	Electricity, medium voltage {EE} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	109,57	kWh	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
<i>Izvades</i>	Izmeši gaisā	Ūdens iztvaikošana gaisā	Water_Air emissions	15144	kg	Elementār- plūsma
Mēslojuma ražošana						
<i>Izvades</i>	Novērstie produkti	Slāpekļa mēslojums	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {EE} market for inorganic nitrogen fertiliser, as N Cut-off, U	25,84	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Kālija mēslojums	Inorganic potassium fertiliser, as K2O {EE} market for inorganic potassium fertiliser, as K2O Cut-off, U	3,06	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1
		Fosfora mēslojums	Inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5 {EE} market for inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5 Cut-off, U	26,52	kg	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1

Modelēšanā izmantotais “elektrība, vidējsprieguma” profils atspoguļo ieceri simulēt apstākļus, kas raksturīgi potenciālai rūpnieciskā mēroga darbībai.

Pilnīgas *LCI* datu kopas *SPE*, *TLE* un alternatīvajiem scenārijiem (AS1–AS4) ir skatāmas promocijas darbā.

2.3. Dzīves cikla izmaksu analīze (*LCC*)

LCC ir visaptveroša analītiska pieeja, ko izmanto, lai novērtētu kopējās finanšu izmaksas, kas saistītas ar produktu, procesu vai pakalpojumu visā tā dzīves ciklā. Atšķirībā no tradicionālajām izmaksu novērtēšanas metodēm, kas koncentrējas tikai uz sākotnējiem ieguldījumiem vai ražošanas izdevumiem, *LCC* iekļauj visus ekonomiskos aspektus, tostarp ekspluatāciju, uzturēšanu un dzīves cikla beigu posma pārvaldību. Šī metodoloģija sniedz pilnīgu ieskatu izmaksu struktūrā un atbalsta pamatotu finanšu plānošanu un lēmumu pieņemšanu [95]. *LCC* struktūra atspoguļo tradicionālās *LCA* fāžu secību. Pirmā fāze – tvēruma definēšana – nosaka funkcionālo vienību (*FU*) un sistēmas robežas, kuras kalpo par pamatu iekļaujamo izmaksu elementu noteikšanai un nodrošina rezultātu salīdzināmību. Otrā fāze – datu vākšana – koncentrējas uz izmaksu identificēšanu un kvantificēšanu visā dzīves ciklā. Trešā fāze – izmaksu analīze – apkopo visus finanšu datus, lai noteiktu kopējās dzīves cikla izmaksas. Šajā posmā tiek izvērtēti dažādi ekonomiskie scenāriji un identificētas izmaksu ziņā efektīvas alternatīvas. Noslēdzošajā fāzē – interpretācijā – tiek analizēti rezultāti, lai atklātu potenciālos ietaupījumus un optimizētu finanšu veiktspēju, veicinot stratēģisku resursu sadali un ieguldījumu plānošanu.

Definētais *LCC* ietvars

Pašlaik nepastāv universāli atzīts ietvars, kas būtu īpaši pielāgots makroaļģu biorafinēriju *LCC* novērtējumam. Lai novērstu šo metodoloģisko trūkumu, šajā promocijas darbā piedāvāts *LCC* ietvars, kas pielāgojams līdzīgiem pētniecības kontekstiem. Izstrādātā *LCC* metodoloģija ir strukturēta četros makroposmos.

1. Tehnoloģiskās shēmas definēšana – šajā posmā tiek izstrādātas analizējamo procesu konfigurācijas, tostarp detalizētas tehnoloģisko plūsmu diagrammas un masas bilances pārbaude. Šajā pētījumā šis posms atbilst *CB*, *SPE* un *TLE* biorafinērijas modeļu definēšanai, kā aprakstīts iepriekšējās nodaļās.
2. Inventarizācija – šajā posmā tiek apkopota visaptveroša datu kopa *LCC* analīzei. Tā balstās uz *LCA* inventarizāciju, papildinot to ar izmaksu datiem, kas nepieciešami ekonomiskajai modelēšanai. Inventarizācijas pārvaldība veikta strukturētā *Excel* tabulā, kas nodrošina sistemātisku datu ievadi, parametru izsekojamību un caurspīdīgu izmaksu attiecinājumu.
3. Ekonomiskais novērtējums – katrai biorafinērijas konfigurācijai tiek aprēķināti galvenie finanšu rādītāji, tostarp ieguldījumu atdeves koeficients (*ROI*), neto pašreizējā vērtība (*NPV*), iekšējās atdeves likme (*IRR*) un peļņas indekss (*PI*). Šie rādītāji nodrošina kvantitatīvu pamatu sistēmu ekonomiskās veiktspējas un rentabilitātes izvērtēšanai.
4. Jūtīguma analīze – šis noslēdzošais posms pārbauda *LCC* rezultātu stabilitāti, modelējot alternatīvus scenārijus, kas atspoguļo tirgus mainīgumu. Tiek analizētas cenu svārstības

produktiem, izejvielu izmaksām un darbības izdevumiem, lai izvērtētu to ietekmi uz kopējo biorafinērijas konfigurāciju finanšu dzīvotspēju.

LCC definīcija

LCC analīzes galvenais mērķis ir izvērtēt piecu dažādu *F. lumbricalis* biorafinērijas konfigurāciju ekonomisko dzīvotspēju: kaskādes biorafinēriju (CB), trīs viena produkta ekstrakcijas modeļus, kuru mērķis ir pigmenti (SPEp), olbaltumvielas (SPEpr) un karagināns (SPEc), kā arī trīs līniju ekstrakcijas modeļi (TLE). Novērtējums veikts, lai noteiktu ekonomiski dzīvotspējīgāko risinājumu, kā arī identificētu galvenos finanšu parametrus, kas ietekmē katra dizaina veiktspēju.

Šai analīzei definētā FU ir 1000 un 2000 tonnu sausās *F. lumbricalis* biomasas (DW) apstrādei. Šie apjomi atbilst pašreizējam biomasas ievākšanas licences apjomam Kasari līcī, Igaunijā (1000 tonnu), kā arī potenciālajam paplašināšanās scenārijam (2000 tonnu). Šādu atskaites punktu izmantošana ļauj veikt mērogojamu analīzi un atbalsta nākotnes plānošanu. Ģeogrāfiskā konteksta noteikšana ir būtiska, jo reģionālie apstākļi tieši ietekmē tādus ekonomiskos mainīgos kā darba algas, zemes izmaksas un komunālie pakalpojumi. Šajā pētījumā pieņemts, ka biorafinērijas darbības notiek Igaunijā, lai nodrošinātu, ka LCC modelis precīzi atspoguļo konkrētajai valstij raksturīgos ekonomiskos apstākļus.

- Ekonomiskās analīzes LCI.

Šajā izvērtējumā izmantotās ekonomiskās dzīves cikla inventarizācijas (*e-LCI*) tika iegūtas no tā paša datu pamata, kas izmantots LCA vajadzībām. Sākotnējās ievades vērtības, kas izteiktas masas, enerģijas un tilpuma vienībās, tika konvertētas uz monetārajām vienībām (EUR) un normalizētas atbilstoši definētajai funkcionālajai vienībai. Rezultējošā *e-LCI* tika strukturēta trīs galvenajās makrokategorijās, lai nodrošinātu visaptverošu ekonomisko novērtējumu.

- Darbības izmaksas: tās tika kvantificētas, izmantojot vairākus datu avotus. Publiski pieejamie komerciālie dati, tostarp cenas degvielai, elektroenerģijai un patēriņa materiāliem, tika iegūti no *Orbis* datubāzes [96]. Papildu izmaksu datus sniedza *Vetik OÜ*, lai atspoguļotu konkrētā gadījuma apstākļus. Analīze veidota Igaunijas ražošanas sektora kontekstā pēc NACE koda 20.5 (“Citi ķīmiskie produkti”), un izmaksu ietekmes precizētas, izmantojot filtrētus datu kopumus, lai nodrošinātu nozaru atbilstību. Darba algas aprēķinātas, izmantojot *Teatmik* [97], atsaucoties uz Igaunijas jūraszāļu uzņēmumu finanšu datiem.
- Ieguldījumi: pamatlīdzekļu izmaksu aplēses izstrādātas sadarbībā ar *Alfa Laval* [98], Zviedrijas uzņēmumu, kas specializējas šķidruma atdalīšanas, siltumapmaiņas un plūsmas apstrādes tehnoloģijās. Konsultācijas ietvaros tika sniegtas tehniskās vadlīnijas par optimālu iekārtu dimensiju noteikšanu ražošanas jaudai 1000 tonnu, ar iespējamu mērogošanu līdz 2000 tonnām.
- Produktu pārdošana: ieņēmumu modelis izstrādāts, balstoties uz līdzīgu komerciālu produktu tirgus analīzi. Pigmenta cena piesaistīta fikocianīnam, nevis fikoeritrīnam, ņemot vērā pētītās biorafinērijas sistēmas tīrības un apstrādes iespēju ierobežojumus. Olbaltumvielu cena noteikta, atsaucoties uz dzīvnieku uzturā bieži izmantotās sojas

proteīna barības vērtību. Karagināna cena pielāgota, balstoties uz kosmētikas nozarē plaši izmantoto gēlveida aģentu cenām. Atlikusī biomasa, kurai pēc ekstrakcijas samazinājies minerālvielu saturs (kā pierādīts laboratorijas pētījumos *TACO Algae* projektā), tika pārdota ar minimālu vērtību biogāzes ražotājiem. Šī pieeja ne tikai radīja nelielus ieņēmumus, bet arī samazināja izdevumus, kas saistīti ar atkritumu apsaimniekošanu un attīrīšanu.

Pilnīgās inventarizācijas datu kopas dažādām biorafinērijas konfigurācijām ir atrodamas promocijas darbā. Atsaucoties uz 2.4. tabulā izmantoto strukturālo izkārtojumu, dati šajā gadījumā izteikti monetārajās vienībās, nevis masā, tilpumā vai enerģijā, lai nodrošinātu ekonomiskās analīzes atbilstību.

- Ekonomiskās analīzes parametri

Ekonomiskā analīze sākas ar pamatparametru definēšanu, kuriem ir būtiska nozīme *LCC* modeļa galarezultātu veidošanā. Tie ietver kapitāla un ārējā aizdevuma finansējuma attiecību, sagaidāmo kapitāla atdeves likmi un piemērojamo procentu likmi aizņemtajam kapitālam. Šīs vērtības izvēlētas, pamatojoties uz vidējiem finanšu datiem no *Orbis* datubāzes: ieguldījumu daļa, kas segta ar pašu kapitālu, – 70 %, atlikusī daļa ar aizdevumu – 30 %, kapitāla atdeves prasība – 10 %, aizdevuma procentu likme – 4,25 %. Pēc šo parametru noteikšanas tika uzsākta finanšu modelēšana, aprēķinot galvenos rādītājus 10 gadu periodā, lai izvērtētu katras biorafinērijas konfigurācijas izmaksu efektivitāti. Analīze ietvēra šādus elementus: kapitālieguldījumi, nolietojums, ienākošās un izejošās naudas plūsmas, apliekamais ienākums, nodokļi, neto naudas plūsmas un diskontētās naudas plūsmas.

Nākotnes naudas plūsmas pielāgotas pašreizējai vērtībai, izmantojot vidēji svērto kapitāla cenu (*WACC*), kas ņem vērā naudas laika vērtību. *WACC* tika aprēķināta kā:

$$WACC = (EV \times Re) + (DV \times Rd \times (1 - Tc)). \quad (2.1.)$$

Lai novērtētu un salīdzinātu katra scenārija finanšu veiktspēju, izmantoti četri galvenie ekonomiskie rādītāji:

- *ROI* (ieguldījumu atdeves koeficients) – attiecība starp kopējo neto peļņu un kopējo investīciju apjomu. Augstāks *ROI* norāda uz izdevīgāku ieguldījumu scenāriju;
- *IRR* (iekšējās atdeves likme) – diskonta likme, pie kuras *NPV* = 0. Tā atspoguļo ieguldījuma efektivitāti un rentabilitāti; augstāka *IRR* vērtība signalizē par pievilcīgāku iespēju;
- *NPV* (neto pašreizējā vērtība) – visu nākotnes naudas plūsmu kopsumma, diskontēta līdz tagadnes vērtībai un pielāgota sākotnējai investīcijai. Pozitīva *NPV* norāda uz rentablu ieguldījumu;
- *PI* (peļņas indekss) – attiecība starp *NPV* un sākotnējo investīciju, kas atspoguļo radītās vērtības apjomu uz katru ieguldīto vienību. *PI* > 1 liecina, ka projekts radīs finansiālu vērtību.

- Alternatīvie scenāriji.

Šajā pētījumā veiktā jutīguma analīze koncentrējas uz galveno nenoteiktības avotu ekonomiskajā izvērtējumā – produktu tirgus cenām. No visiem biorafinērijas sistēmas produktiem pigmenti pārstāv visaugstākās vērtības segmentu un būtiski ietekmē kopējo

sistēmas finanšu veiktspēju. Tādējādi pigmentu cenas mainīgums tika izvēlēts kā galvenais parametrs jutīguma testēšanai. Cenu diapazons noteikts, pamatojoties uz tirgus izpēti, ļaujot izveidot atskaites scenārijus, lai novērtētu sistēmas ekonomisko stabilitāti dažādos cenu un ražošanas apstākļos. Papildus vidējam atsauces scenārijam, kurā pigmenta cena tika noteikta kā 124 736 EUR/tonna (kā norādīts 2.5. tabulā), tika modelēti divi papildu scenāriji:

- sliktākais scenārijs (WCS) – pieņem zemāko pigmenta tirgus vērtību 100000 EUR/tonna, apvienojot ar pašreizējo ievākšanas ierobežojumu – 1000 tonnu *F. lumbricalis*. Šis scenārijs atspoguļo piesardzīgu prognozi, kas balstīta uz zemu tirgus pieprasījumu un ierobežotu biomasas pieejamību;
- labākais scenārijs (BCS) – simulē augstas tirgus vērtības apstākļus, kur pigmenta cena sasniedz 500000 EUR/tonna, apvienojot ar maksimālo ievākšanas apjomu (2000 tonnu *F. lumbricalis*), kas iespējams paplašinātas licences apstākļos. Šis scenārijs modelē labvēlīgu tirgus un regulatīvo vidi.
- LCC vides ārējo efektu monetizācija LCC ietvaros.

Lai paplašinātu ekonomiskā novērtējuma visaptveramību, šajā promocijas darbā iekļauta vides ārējo efektu monetizācija, pamatojoties uz LCA rezultātiem tajā pašā sistēmā. Šī pieeja piedāvā inovatīvu skatījumu uz izmaksu analīzi, pārveidojot vides ietekmi ekonomiskos rādītājos, tādējādi papildinot sistēmas ilgtspējas izvērtējumu ar jaunu dimensiju. Izmantotā monetizācijas metodoloģija balstīta Ponsioen et al. (2020) [99] piedāvātajā ietvarā, kas nodrošina konversijas koeficientus, lai izteiktu LCA rezultātus monetārās vienībās. Šie koeficienti (detalizēti izklāstīti promocijas darbā) ir saderīgi gan ar vidējā līmeņa (*midpoint*), gan ar gala līmeņa (*endpoint*) ietekmes kategorijām saskaņā ar ReCiPe 2016 metodi, kas izmantota arī šī pētījuma LCA daļā. Gadījumos, kad pieejamas gan *midpoint*, gan *endpoint* vērtības, prioritāte tiek dota *midpoint* monetizācijas koeficientiem, lai uzlabotu novērtējuma precizitāti un konsekveni.

2.4. Sociālais dzīves cikla novērtējums (S-LCA)

Kopš 20. gadsimta sešdesmitajiem gadiem pieaugošā izpratne par nekontrolētas ekonomiskās un industriālās izaugsmes ierobežojumiem uz ierobežotas planētas ir veicinājusi ilgtspējīgas attīstības koncepcijas rašanos. Šis princips uzsver nepieciešamību apmierināt pašreizējās paaudzes vajadzības, neapdraudot nākotnes paaudžu spēju apmierināt savējās. Ilgtspējība, kā tā definēta globālajos ietvaros, piemēram, Apvienoto Nāciju Organizācijas Ilgtspējīgas attīstības mērķos, aptver ne tikai vides jautājumus, bet arī sociālās dimensijas. Šī plašākā izpratne ir veicinājusi dzīves cikla domāšanas (LCT) attīstību uz sociālo dzīves cikla novērtējumu (S-LCA) – metodoloģiju, kas paredzēta, lai izvērtētu produktu un sistēmu sociālo ietekmi visā to dzīves ciklā [95].

S-LCA seko strukturētam ietvaram, kas līdzinās vides LCA struktūrai un ietver šādas galvenās fāzes: mērķa un tvēruma definēšana, inventarizācijas analīze, ietekmes novērtējums un interpretācija. Taču S-LCA uzmanības centrā ir cilvēku labklājības ietekmju izvērtēšana. Tā novērtē šīs ietekmes dažādās ieinteresēto pušu grupās, tostarp darbiniekiem, vietējām

kopienām, patērētājiem un lēmumu pieņēmējiem, lai izprastu sistēmu sociālās sekas un to ieguldījumu sabiedrības ilgtspējā.

Neraugoties uz konceptuālo līdzību ar *LCA*, *S-LCA* joprojām atrodas attīstības stadijā un nav sasniegusi tādu standartizācijas līmeni kā vides *LCA*. Nozīmīgākais solis uz harmonizāciju bija *UNEP-SETAC* iniciatīvas izstrādātās *S-LCA* vadlīnijas [100], kas noteica metodoloģijas pamatu. Vēl nesen izdots ISO 14075 standarts “Vides pārvaldība – principi un ietvars sociālajam dzīves cikla novērtējumam” [101] iezīmē svarīgu posmu metodoloģijas formālā atzīšanā. Tomēr izaicinājumi joprojām pastāv, īpaši attiecībā uz sociālo ietekmju vienotu definēšanu un kvantificēšanu. *S-LCA* galvenā aizsargājamā joma ir cilvēku labklājība. Vērtējumos mēģināts raksturot ar produktu vai procesu radītās sociālās pārmaiņas un noteikt, vai šīs pārmaiņas veicina vai kavē plašākus ilgtspējas mērķus. Tipiski iesaistītās ieinteresēto pušu grupas ietver piegādes ķēdes darbiniekus, vietējās vai reģionālās kopienas, kuras ietekmē ražošanas aktivitātes, kā arī galapatērētājus. Atsevišķos gadījumos tiek iekļauti arī uzņēmumu akcionāri un politikas veidotāji, ja tie ir nozīmīgi analizējamās sistēmas kontekstā. Līdz ar globālās diskusijas par sociālo ilgtspēju attīstību *S-LCA* nodrošina būtisku ietvaru sociālo dimensiju integrēšanai ilgtspējas novērtējumos. Tomēr ir nepieciešama metodoloģiskā pilnveide, lai uzlabotu metodes uzticamību un piemērojamību politikas un investīciju lēmumu pieņemšanā. Ņemot vērā šos izaicinājumus, šis promocijas darbs piedāvā hibrīdo metodoloģiju, kas integrē jaunākos *S-LCA* attīstības rezultātus, nodrošinot visaptverošu un mūsdienīgu ietvaru, īpaši pielāgotu *F. lumbricalis* biorafinērijas sistēmas izvērtēšanai.

***S-LCA* metodoloģiskais ietvars**

Šajā darbā veiktais sociālais dzīves cikla novērtējums (*S-LCA*) balstīts divu līmeņu pieejā, kas atbilst literatūrā nostiprinātajai praksei [102]. Šāds daudzlīmeņu ietvars ļauj veikt visaptverošāku un kontekstuālāk jutīgu potenciālo sociālo ietekmju novērtējumu, nodrošinot plašāku rādītāju pārklājumu, nekā tas būtu iespējams ar vienlīmeņa analīzi.

1. Ietekmes ceļa pieeja (*Impact Pathway Approach – IPA*) – 1. līmenis (makrolīmenis) Šis novērtējums tiek veikts nacionālā mērogā un ir paredzēts sociālo karstpunktu analīzei. Tā galvenais mērķis ir identificēt nozīmīgākos potenciālos sociālos riskus, kas saistīti ar makroalģu nozari, īpaši koncentrējoties uz savvaļas ievākšanu (*WH*) un jūras audzēšanu (*OFC*). *IPA* balstās cēloņseku ķēdēs, kas saista kvantitatīvos inventarizācijas rādītājus ar plašākām sociālo seku kategorijām. Šī augšupējā (*top-down*) metodoloģija īstenoja, izmantojot *Social Hotspot Database (SHDB)* [103], kas ir speciāla sociālo ietekmju datubāze integrēta *SimaPro* programmatūras platformā. *IPA* nodrošina sistēmisku sociālo karstpunktu identifikāciju modelētajā produkta sistēmā, atbalstot riska noteikšanu agrīnā stadijā un stratēģiskās mazināšanas plānošanu.
2. Atsauces skalas pieeja (*Reference Scale Approach – RSA*) – 2. līmenis (mikrolīmenis) Otrais līmenis ir orientēts uz mikrolīmeni, nodrošinot detalizētu izvērtējumu atsevišķiem uzņēmumiem un to darbībām. Šī pieeja, kas koncentrējas uz mazajiem uzņēmumiem, ļauj veikt smalkāku organizatoriskās veiktspējas analīzi, sniedzot ieskatus, kurus nav iespējams iegūt makromērogā. Sociālā ietekme tiek izvērtēta, izmantojot veiktspējas atsauces punktus (*Performance Reference Points – PRPs*), kas

tiek salīdzināti ar starptautiski atzītiem standartiem, sliekšņiem vai labās prakses piemēriem. Vērtēšana veikta, izmantojot semikvantitatīvu skalu no 0 līdz 5, kas pielāgota konkrētajām *F. lumbricalis* biorafinērijas sistēmas īpatnībām. Datu iegūšanai no attiecīgajām ieinteresētajām pusēm izstrādātas pielāgotas anketas, tādējādi nodrošinot robustu un uzņēmuma līmenī pielāgotu novērtējumu.

IPA metodoloģija

Šajā pētījumā izmantotā ietekmes ceļa pieeja (*Impact Pathway Approach – IPA*) seko metodoloģiskai struktūrai, kas ir analoga tradicionālajam vides *LCA*. Tā ietver standarta posmus: mērķa un tvēruma definēšanu, sistēmas robežu noteikšanu, inventarizācijas analīzi un dzīves cikla ietekmes novērtējumu (*LCIA*).

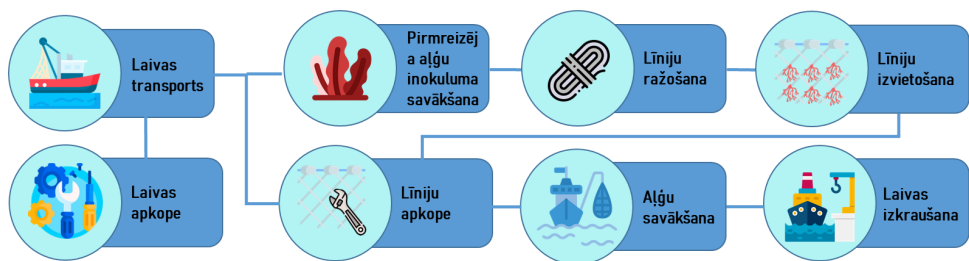
- Mērķis un tvērums.

Šī novērtējuma galvenais mērķis ir izpētīt sociālās dimensijas, kas integrētas makroaļģu vērtību ķēdēs, sākot ar biomasas ievākšanas posmu. Tiek izmantots *S-LCA*, lai novērtētu un salīdzinātu sociālo ietekmi, kas saistīta ar dažādām makroaļģu ievākšanas un audzēšanas metodēm. Šī pētījuma centrālais fokuss ir sarkano makroaļģu *F. lumbricalis* savvaļas ievākšana (*WH*), kas kalpo kā atskaites scenārijs. *WH* tika izvēlēts šim novērtējumam, ņemot vērā tā dominējošo statusu kā galveno šīs sugas ievākšanas metodi un tās ierobežoto pārstāvniecību esošajā literatūrā. Šis atskaites gadījums atbilst sistēmas robežām, kas aprakstītas 2.1. nodaļā.

Papildus *WH* bāzes scenārijam pētījumā iekļauts arī izpētes scenārijs, kurā modelēta hipotētiska *F. lumbricalis* jūras audzēšanas (*OFC*) sistēma. Lai gan šāda sistēma komerciālā mērogā vēl nav ieviesta, scenārijs tika konstruēts, izmantojot literatūrā pieejamos datus [70], lai novērtētu potenciālo sociālo ietekmi tās ieviešanas gadījumā. Lai nodrošinātu metodoloģisko konsekveni un salīdzināmību starp scenārijiem, funkcionālā vienība (*FU*) tika definēta kā 1 ASV dolārs, kas radīts standarta astoņu stundu darba dienā. Šī *FU* atspoguļo katras sistēmas unikālo ekonomisko struktūru un atbilst *SHDB* metodoloģijas prasībām, kas izmanto uz monetāro vērtību balstītas ievades.

- Sistēmas apraksts *SHDB* kontekstā.

WH sistēma seko tam pašam procesa aprakstam, kas detalizēti izklāstīts 2.1. nodaļā. *S-LCA* kontekstā un definētās *FU* ietvaros tiek pieņemts, ka kopējais ievāktais *F. lumbricalis* biomasas apjoms ir 10 tonnu svaigas biomasas. Paralēli tika modelēts arī *OFC* scenārijs, izmantojot literatūrā balstītus datus, īpaši no pētījumiem par mākslīgo substrātu audzēšanu *F. lumbricalis*. Visa inventarizācijas informācija tika normalizēta līdz 10 tonnām biomasas ražas, lai nodrošinātu salīdzināmību ar *WH* scenāriju. 2.8. att. sniegts shēmatisks pārskats par *OFC* konfigurāciju.



2.8. att. OFC scenārija sistēmas diagramma.

Lai identificētu potenciālos sociālos riskus, *SHDB* tika integrēta *S-LCA* modelī. *SHDB* apkopo datus par sociālajiem riskiem no tādām starptautiskām organizācijām kā Starptautiskā Darba organizācija (*ILO*) un Pasaules Banka, novērtējot indikatorus, kas saistīti ar bērnu darbu, piespiedu darbu, atalgojumu, veselību un drošību, kā arī darba apstākļiem. Šajā pētījumā analizētas kopumā 30 sociālās problēmas. Kā labi zināms rīks, *SHDB* izmanto riskos balstītu pieeju, aptverot vairāk nekā 150 ekonomikas nozares gandrīz 200 valstīs, tādējādi ļaujot konsekventi identificēt karstpunktus piegādes ķēdēs. Šajā novērtējumā *SHDB* procesi izvēlēti, lai atspoguļotu specifiskas nozares darbības Igaunijā saskaņā ar iepriekš noteiktajām sistēmas robežām. Detalizēts izmantoto procesu saraksts ir pieejams promocijas darbā. Gadījumos, kad tieša procesa atbilstība netika atrasta, izmantoti piemēroti aizstājoši (*proxy*) procesi. Piemēram, tādās darbības kā laivu izkraušana un kuģu uzturēšana modelētas, izmantojot plašākas ražošanas un tirdzniecības nozares kategorijas.

- LCI.

2.6. tabulā ir sniegta *LCI* informācija *WH* scenārijam, piedāvājot detalizētu pārskatu par darbības posmiem, piešķiršanas (alokācijas) koeficientiem un pamatpieņēmumiem, kas izmantoti to aprēķinā. Alokācijas koeficienti noteikti, analizējot katra procesa posma specifiskās darbības īpašības, ņemot vērā tādus aspektus kā laika patēriņš, resursu izmantošana un loģistiskie ierobežojumi.

2.6. tabula

WH scenārija LCI dati				
Posms	Apraksts	Pieņēmums/aprēķins	Dienas laiks darbības veikšanai	Piemērošana FU
Aļģu novākšana	Novākšana, izmetot tīklus.	Pieņemts, ka tas ir atlikušo astoņu stundu	4,50 stundas	56 %
Laivas ietilpība līdz 12 tonnām	Laivas ietilpība līdz 12 tonnām	laiks, atņemot citu darbību veikšanai nepieciešamo laiku		
Transports uz ostu	40 minūšu brauciena attālumā	Ņemts vērā divas reizes – braucienam uz ostu un atpakaļ	1,33 stundas	17 %
Laivas izkraušana	Elektrisks izkrāvējs	-	1,50 stundas	19 %
Laivas apkope	1 reize gadā (1 mēnesis)	1 mēneša periods normalizēts uz 8 stundu FU	0,67 hours	8 %

2.7. tabulā ir apkopoti *OFC* scenārija *LCI* dati. Sākotnējie dati tika kartēti visā trīs mēnešu audzēšanas periodā, kas nepieciešams, lai iegūtu 10 tonnu *F. lumbricalis* biomasas. Lai nodrošinātu metodoloģisko konsekveni ar *WH* scenāriju, visi rādītāji normalizēti atbilstoši definētajai funkcionālajai vienībai.

Gan *WH*, gan *OFC* scenārijos *LCI* tika harmonizēta, izsakot visus aprēķinus darba stundu kopskaita izteiksmē. Šī pieeja ļauj veikt tiešu un objektīvu salīdzinājumu starp sistēmām, pārorientējot analītisko fokusu uz sociālajiem riskiem, ko piedzīvo individuāli darbinieki dažādos darbības kontekstos.

2.7. tabula

OFC scenārija <i>LCI</i> dati					
Posms	Apraksts	Pieņēmums/aprēķins	Laiks darbības veikšanai (trīs mēneši)	Dienas laiks darbības veikšanai	Piemērošana <i>FU</i>
<i>Laivas transports</i>	40 minūšu brauciens ar laivu	Tas ietver laivas transportu pirmreizējai aļģu inokuluma savākšanai, līniju izvietojšanai, līniju apkopei un galīgajai aļģu savākšanai. Ņemts vērā divas reizes – braucienam uz turieni un atpakaļ	1,33 stundas (vienam braucienam – turp un atpakaļ)	0,24 stundas	2,96 %
<i>Pirmreizēja aļģu inokuluma savākšana</i>	Lai iegūtu 10 000 kg svaigas <i>F. lumbricalis</i> , nepieciešami 603 kg inokuluma	Tas tika aprēķināts, zinot augšanas ātrumu, ilgumu un galīgo mērķa daudzumu	0,50 stundas	0,20 stundas	0,25 %
<i>Līniju izgatavošana</i>	Neilona sieti/maisi	Nepieciešamais neilona daudzums tika aprēķināts, normalizējot literatūrā [24] pieejamos datus, iegūstot kopējo daudzumu – 33 kg šajā gadījuma izpētē. Pieņemtais neilona ražošanas ātrums ir 250 kg vienā stundu darba dienā [104], un šī vērtība tika normalizēta, lai atbilstu sistēmai	1,06 stundas	0,042 stundas	0,52 %

Posms	Apraksts	Pieņēmums/aprēķins	Laiks darbības veikšanai (trīs mēneši)	Dienas laiks darbības veikšanai	Piemērošana FU
		nepieciešamajiem 33 kg			
<i>Līniju izvietošana</i>	-	Pieņemts, ka nepieciešama puse no laika, kas vajadzīgs aļģu savākšanai	2,25 stundas	0,089 stundas	1,11 %
<i>Līniju apkope</i>	1 reizi mēnesī	Kopā trīs reizes. Pieņemts, ka nepieciešams tikpat daudz laika kā līniju izvietošana	6,75 stundas	0,27 stundas	3,33 %
<i>Aļģu savākšana</i>	-	Tā kā daudzums ir vienāds, tiek pieņemts, ka tas ir tāds pats kā savvaļas aļģu novākšanai	4,50 stundas	0,18 stundu	2,22 %
<i>Laivas izkraušana</i>	Elektrisks izkrāvējs	Tā kā daudzums ir vienāds, tiek pieņemts, ka tas atbilst savvaļas aļģu novākšanai nepieciešamajam laikam	1,50 stundas	0,059 stundas	0,74 %
<i>Laivas apkope</i>	1 reizi gadā (1 mēnesis)	Viena mēneša perioda normalizēšana uz Trīs mēnešu periodu, kas nepieciešams aļģu augšanai	180 stundas	7,11 stundu	88,86 %

- **LCIA.**

LCIA šajā analīzē tika veikta, izmantojot “*Social Hotspot 2022 Category Method w Norm*”, kas ir integrēta SHDB modulī programmā *SimaPro v9.5*. Detalizēts metodoloģijas attēlojums pieejams promocijas darbā. Šī metode balstīta “*Social Hotspot 2022 Subcategory Method w Norm / Global per Capita Annual*”, kas ietver 30 sociālo risku apakškategorijas, apvienotas piecās galvenajās kaitējuma kategorijās [105].

Raksturošanas process paredz, ka LCI rezultāti tiek reizināti ar iepriekš noteiktiem riska varbūtības koeficientiem, kuri atspoguļo nelabvēlīgu sociālo apstākļu, piemēram, sliktā darba standarta vai kopienas līmeņa neaizsargātības, iespējamību katrā apakškategorijā. Rezultāti tiek izteikti kā vidēja riska stundu ekvivalenti (*mrheq.*), kas kvantitatīvi novērtē sociālos riskus, balstoties uz to varbūtību un smaguma pakāpi. Pēc apakškategoriju klasifikācijas rezultāti tiek apvienoti kaitējuma kategorijās, izmantojot svērtas summēšanas pieeju. Tas nodrošina, ka galarezultāti atspoguļo relatīvo risku, nevis tiek izkropļoti atkarībā no apakškategoriju skaita katrā grupā. Metodoloģija ietver arī normalizāciju kategoriju līmenī un lietotāja definētu svēruma piešķiršanas iespēju. Galarezultāti tiek izteikti standartizētās vienībās, kas zināmas kā

sociālie punkti (S-Pt) – tie pārstāv vidēja riska stundu ekvivalentu uz vienu iedzīvotāju gadā, attiecinātu pret globālo ekonomisko izlaidi. Šāda normalizācija ļauj veikt nozīmīgu sociālo risku salīdzinājumu starp nozarēm un produktu sistēmām, uzlabojot analīzes robustumu.

- **Nenoteiktības analīze.**

Ar abiem definētajiem scenārijiem joprojām ir saistīta ievērojama nenoteiktība. Tā kā šis ir pirmais *S-LCA* piemērojums makroaļģu ievākšanas un ražošanas sistēmām, modelētajām konfigurācijām ir hipotētisks raksturs, kas rada nenoteiktību vairākos būtiskos parametros. Īpaši tas attiecas uz alokācijas koeficientiem, kas novērtē katra procesa posma laika patēriņu, kā aprakstīts 2.2. un 2.8. att. Lai ņemtu vērā šīs nenoteiktības, veikta Montekarlo simulācija, izmantojot *SimaPro* programmatūras vidi. Simulācijā izmantots normālais sadalījums, lai variētu sākotnējās ievades vērtības noteiktā nenoteiktības diapazonā, un veikts kopumā 5000 iterāciju. Katram parametram noteiktā mainīguma amplitūda izvēlēta, ņemot vērā tā relatīvo nozīmi un nenoteiktības līmeni.

WH scenārijā par visvairāk nenoteiktu posmu identificēta jūraszāļu ievākšana, galvenokārt operacionālās mainības dēļ atklātas jūras apstākļos. Savukārt *OFC* scenārijā vislielākā nenoteiktība novērota šādos posmos: inokuluma savākšana, aļģu savākšana, virvju uzstādīšana un uzturēšana, kas īpaši pakļauti vides svārstībām, piemēram, laikapstākļiem. Šiem procesiem piešķirts ± 30 % nenoteiktības diapazons. Vidēja mainīguma diapazons (± 20 %) piešķirts tādām darbībām kā kuģu uzturēšana un izkraušana, ņemot vērā to vispārējo paredzamību, vienlaikus saglabājot iespēju variācijām atkarībā no izmantošanas biežuma un operacionālās intensitātes. Savukārt zemāks nenoteiktības līmenis (± 10 %) piemērots stabilākām darbībām, piemēram, transportam līdz ostai un virvju ražošanai, kas mazāk jutīgas pret ārējiem faktoriem.

RSA ietvars

Mazā uzņēmuma līmenī šobrīd neeksistē standartizētas datubāzes, kas pilnībā aptvertu potenciālos sociālos riskus, kuri saistīti ar makroaļģu nozari. Lai novērstu šo trūkumu, veikta tieša primāro datu vākšana, izstrādājot divas speciāli pielāgotas anketas, kas atspoguļotas promocijas darba pielikumos. Novērtēšanas ietvars veidots, ievērojot *UNEP* sociālā *LCA* rokasgrāmatu [96] un ISO 14075 standartu [97], nodrošinot metodoloģisku atbilstību starptautiski atzītām labajām praksēm.

Pirmā anketa kalpoja kā plaša pārbaudes (*screening*) metode, lai identificētu atbilstošākos sociālos indikatorus un ieinteresēto pušu grupas. Tajā iekļauts plašs ieinteresēto pušu kategoriju un sociālās veikspējas indikatoru saraksts, balstoties uz *UNEP* sistēmu. Šī sākotnējā aptauja tika izsūtīta *TACO Algae* konsorcijs partneriem pārskatīšanai un validēšanai. Balstoties uz saņemtajām atbildēm, tika identificētas deviņas apakškategorijas un četras ieinteresēto pušu grupas, kas vislabāk atbilst makroaļģu biorafinērijas sistēmas specifikai (2.8. tabula).

Šie rezultāti kalpoja par pamatu otrās anketas izstrādei, kura koncentrējās tikai uz atlasītajiem indikatoriem. Šī turpinājuma anketa ietvēra 14 jautājumus, kas bija strukturēti atbilstoši diviem galvenajiem makroaļģu vērtību ķēdes posmiem: biomasas ievākšana vai audzēšana, biomasas pārstrāde. Otrā anketa tika izplatīta ekspertu grupai, kurā piedalījās astoņi speciālisti. Atbildes tika kvalitatīvi novērtētas un klasificētas saskaņā ar četrpakāpju riska skalu: augsts, vidējs, zems vai nulle risks. Lai nodrošinātu strukturētāku un kvantitatīvu rezultātu

interpretāciju, ieviesta atsaucē skala (RS), kas pārveidoja kvalitatīvās atbildes skaitliskos rādītājos no -2 (augsts risks) līdz +2 (nav riska). Rezultātu vizuālās skaidrības un interpretējamības uzlabošanai tika izmantota arī krāsu kodēšanas shēma.

2.8. tabula

Atlasītie indikatori potenciālo sociālo ietekmju noteikšanai katrai ieinteresēto pušu kategorijai

Ieinteresēto pušu kategorijas				
	<i>Darbinieki</i>	<i>Vietējā kopiena</i>	<i>Patērētāji</i>	<i>Citi vērtību ķēdes dalībnieki</i>
Sociālās ietekmes rādītāji	○ Veselība un drošība ○ Darba laiks ○ Sociālie pabalsti/sociālā aizsardzība	○ Droši un veselīgi dzīves apstākļi ○ Vietējās ekonomikas attīstība	○ Veselība un drošība ○ Caurspīdīgums	○ Godīga konkurence ○ Sociālās atbildības veicināšana ○ Labklājības sadale

Kā piemērs RS lietojumam, indikatora "Darbinieku veselība un drošība" novērtējums ir parādīts 2.9. tabulā. Visu pārējo apakškategoriju atsaucē skalas (RS) ir detalizēti aprakstītas promocijas darbā.

2.9. tabula

Indikatora "Darbinieku veselība un drošība" atsaucē skala (RS) ieinteresēto pušu grupai "Darbinieki"

Scale level	Stakeholder category: WORKERS Impact subcategory: HEALTH AND SAFETY
+2	There are no risks for workers of the processes under analysis to be exposed to accidents/damages for health and safety as well as to carry out strenuous activities.
+1	There is a low risk for workers of the processes under analysis to be exposed to accidents/damages to health and safety as well as to carry out strenuous activities.
0	There is not a shared position of the experts, or there is not enough data available.
-1	There is a medium risk for workers of the processes under analysis to be exposed to accidents/damages to health and safety as well as to carry out strenuous activities.
-2	There is a very high risk for workers of the processes under analysis to be exposed to accidents/damages to health and safety as well as to carry out strenuous activities.

2.5. Dzīves cikla ilgtspējas novērtējums (LCSA)

LCSA ir visaptverošs ietvars, kas integrē LCA, LCC un S-LCA, lai novērtētu produktu, procesu vai sistēmu kopējo ilgtspējas veiktspēju. Vienlaicīgi aptverot visus trīs ilgtspējas pīlārus – vides, ekonomisko un sociālo – LCSA ļauj lēmumu pieņēmējiem identificēt kompromisus un sinerģijas, nodrošinot, ka uzlabojumi vienā jomā nerada neparedzētas negatīvas sekas citā. LCSA koncepciju pirmo reizi izstrādāja Valters Klöpfers (*Walter Klöpffer*) [106], un tās būtība ir indikatoru interpretācija salīdzinošā un integrētā veidā, nevis to

apvienošana vienā apkopotā rādītājā. Šāda integrēta pieeja nodrošina dziļāku izpratni par ilgtspējas aspektu savstarpējo mijiedarbību, veicinot līdzsvarotu un pamatotu lēmumu pieņemšanu. *LCSA* izmantošana sniedz vairākus praktiskus ieguvumus. Tā atbalsta strukturētu datu pārvaldību, skaidro sarežģītus ilgtspējas kompromisus un palīdz identificēt stiprās un vājās puses ražošanas sistēmās. Tā ļauj organizācijām uzlabot piegādes ķēžu caurskatāmību, pilnveidot produktu dizainu un prioritizēt ilgtspējīgas inovācijas. Politikas kontekstā *LCSA* kalpo kā pamats ekomarķējuma shēmu, ilgtspējas sertifikātu un atbildīgas patēriņa politikas izstrādei.

LCSA ietvara lietošanas atbalstam bieži izmanto vairākkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzi (*MCDA*). Tā piedāvā strukturētu metodoloģiju alternatīvu salīdzināšanai, balstoties uz vairākiem indikatoriem, un analīzes pamatā ir inženierzinātņu, ekonomikas un sociālo zinātņu principu kombinācija. Ir pieejamas vairākas *MCDA* metodes, kas atšķiras pēc detalizācijas pakāpes un lēmumu pieņemšanas loģikas. Starp tām kā īpaši nozīmīgs rīks ilgtspējas izvērtējumos ir izcelta metode “Tehnika izvēles secības noteikšanai pēc līdzības ideālajam risinājumam” (*TOPSIS*) [107], pateicoties tās spējai identificēt alternatīvu, kas ir vistuvāk optimālajam līdzsvaram starp visām ietekmes kategorijām.

***TOPSIS* metodoloģija**

Lēmumu pieņemšanas atbalstam *LCSA* ietvaros izmantota *TOPSIS* metode. Tā ir atzīta par skaidru, ar minimālām datu prasībām un intuitīvi saprotamiem rezultātiem. *TOPSIS* nodrošina sistemātisku ietvaru vairāku alternatīvu sarindošanai, balstoties uz to tuvumu ideālajam risinājumam. Šī metode darbojas pēc principa, ka vislabākā alternatīva ir tā, kas ir vistuvāk ideālajam un vistālāk no antiideālā risinājuma. Metodes pamatā ir svarots alternatīvu salīdzinājums noteiktu kritēriju kopumā. Lai gan svaru piešķiršana ievieš subjektīvu komponenti, šis solis ir būtisks, lai atspoguļotu katra kritērija relatīvo nozīmi lēmumu pieņemšanā.

TOPSIS aprēķinu struktūra sastāv no sešiem secīgiem posmiem. Vispirms tiek izveidota lēmumu matrica, kurā reģistrē katras alternatīvas veiktspēju izvēlētajos kritērijos. Dati tiek normalizēti, lai nodrošinātu salīdzināmību dažādās mērvienībās. Normalizētās vērtības tiek reizinātas ar atbilstošajiem svāriem, veidojot svaroto matricu. No šīs matricas tiek noteikti ideālais un antiideālais risinājums, kas pārstāv katra kritērija vislabākās un vissliktākās vērtības. Tiek aprēķināti Eiklīda attālumi no katras alternatīvas līdz šiem atsauces punktiem. Noslēgumā tiek aprēķināts tuvuma koeficients katrai alternatīvai, izsakot, cik tuvu tā atrodas ideālajam risinājumam skalā no 0 līdz 1. Alternatīva ar visaugstāko rezultātu tiek uzskatīta par ilgtspējīgāko variantu.

Datu integrācija *LCSA* ietvaros

Lai novērtētu kopējo ilgtspēju trīs biorafinērijas konfigurācijām – *CB*, *SPE* un *TLE* –, *LCSA* ietvaros piemērota *MCDA* pieeja. Novērtējums balstīts uz trim ilgtspējas pilāriem: vides, ekonomisko un sociālo. Katru pārstāv četri specifiski apakškritēriji, kopumā veidojot divpadsmit vērtēšanas indikatorus.

Vides indikatori iegūti no *LCA* rezultātiem, kā aprakstīts 3.1. nodaļā, koncentrējoties uz galvenajām ietekmes kategorijām, kurās sistēmas uzrādīja vislielākās atšķirības. Šīs kategorijas ietvēra globālās sasilšanas potenciālu, cieto daļiņu veidošanos, toksiskumu cilvēkiem un ūdens patēriņu. Ekonomiskie indikatori noteikti, balstoties uz *LCC* rezultātiem, kā aprakstīts 3.2. nodaļā. Tajos ietilpa *ROI*, *NPV*, *IRR* un *PI*. Lai nodrošinātu salīdzināmību, *SPE* sistēma analizēta kā vienota konfigurācija, iekļaujot trīs produktu līnijas: *SPEp*, *SPEpr* un *SPEc*.

Sociālie indikatori tika izvēlēti, lai atspoguļotu būtiskākās atšķirības starp biorafinērijas dizainiem, izmantojot *S-LCA* rezultātus no 3.3. nodaļas. Iekļauti šādi indikatori: darbinieku veselība un drošība (*HS*), darbinieku darba stundu skaits (*WHS*), vietējās ekonomikas attīstība (*LED*) un labklājības sadalījums (*WD*). Veikti pielāgojumi, lai nodrošinātu salīdzināmību starp sistēmām. Pilnās aprēķinu formulas ir iekļautas promocijas darbā.

Lai piešķirtu svarus trim ilgtspējas pīlāriem, tika izmantota distributīvās normalizācijas metode, sākotnēji piešķirot vienādu svaru (33 %) katram pīlāram. Šī līdzsvarotā pieeja nodrošināja godīgu vides, ekonomisko un sociālo ietekmju izvērtējumu. Lai izpētītu dažādu svērumu stratēģiju ietekmi, tika veikta jutīguma analīze, pakāpeniski palielinot katra pīlāra svaru, vienlaikus proporcionāli pielāgojot pārējo svarus. Svaru pielāgojumi testēti dažādos intervālos no 10 % līdz 300 %, lai novērtētu, kā prioritāšu izmaiņas ietekmē biorafinērijas konfigurāciju ilgtspējas klasifikāciju.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Vides rezultāti

Dažādu augšupējā posma tehnoloģiju LCA rezultāti

Šajā nodaļā sniegts salīdzinošs makroaļģu trīs ieguves metožu vides novērtējums: savvaļas ievākšana (*WH*), krasta audzēšana (*ONC*) un jūras audzēšana (*OFC*). Šīs sistēmas ir detalizēti aprakstītas 2.1. nodaļā (2.2. attēls) un 2.2. nodaļā (2.6. un 2.7. attēls). Šī kopsavilkuma fokuss ir *WH* scenārija pilns vides rezultātu izvērtējums, kas papildināts ar salīdzinošu pārskatu par visiem trim scenārijiem. Pilnie *ONC* un *OFC* rezultāti ir pieejami promocijas darbā.

- *WH* rezultāti.

3.1. tabulā apkopoti *WH* scenārija vides ietekmes rezultāti, analizējot izvēlētos viduspunkta indikatorus. Tabulā pelēkā krāsā ir izcelts tas procesa posms, kuram ir vislielākā vides slodze, tādējādi uzsverot kritiskāko posmu ilgtspējas veiktspējas ziņā.

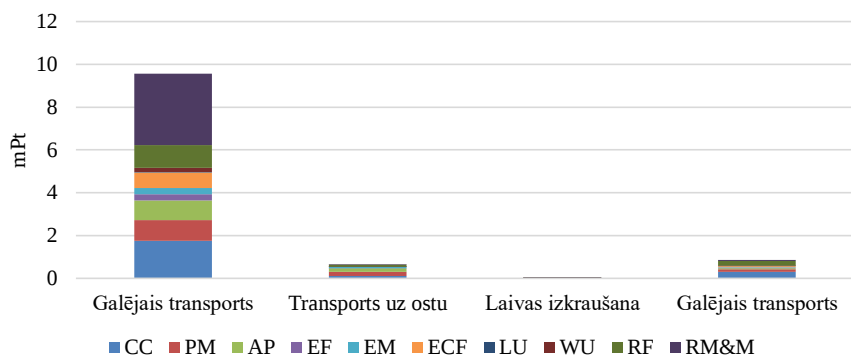
3.1. tabula

WH scenārijam viduspunkta rezultāti. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71]

Ietekmes kategorija	Vienība	Aļģu novākšana	Transports uz ostu	Laivas izkraušana	Galējais transports
CC	kg CO ₂ eq	6,79E+01	4,53E+00	5,99E-01	1,14E+01
PM	disease inc.	6,33E-06	1,20E-06	5,19E-08	8,60E-07
AP	mol H ⁺ eq	8,36E-01	1,60E-01	5,53E-03	4,54E-02
EF	kg P eq	1,54E-02	4,75E-05	4,26E-05	8,45E-04
EM	kg N eq	2,01E-01	3,87E-02	8,16E-04	1,32E-02
ECF	CTUe	1,63E+03	3,30E+01	7,00E+00	1,39E+02
LU	Pt	1,56E+02	7,87E+00	3,81E+00	1,02E+02
WU	m ³ depriv.	2,57E+01	1,09E-02	4,43E-02	6,05E-01
RF	MJ	8,32E+02	6,22E+01	8,21E+00	1,70E+02
RM&M	kg Sb eq	2,81E-03	8,15E-07	8,08E-07	4,72E-05

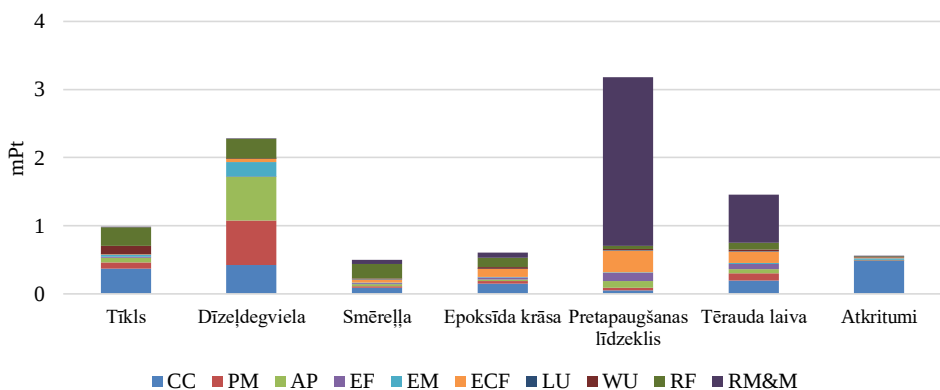
CC (klimata pārmaiņas), *PM* (cieto daļiņu piesārņojums), *AP* (acidifikācijas potenciāls), *EF* (eitrofikācija – saldūdeņi), *ECF* (ekotoksiskums – saldūdeņi), *LU* (zemes izmantošana), *WU* (ūdens izmantošana), *RF* (fosilo resursu izmantošana), *RM&M* (minerālu un metālu resursu izmantošana)

3.1. att. parādīts, ka jūraszāļu ievākšanas posms ir galvenais vides ietekmes avots *WH* scenārijā, ar īpaši augstu slodzi minerālu un metālu izmantošanas (*RM&M*) un klimata pārmaiņu (*CC*) indikatoros. Rezultāti izteikti *EcoPoints* (Pt) vienībās, kas nodrošina vienotas vērtības reprezentāciju, kas normalizēta attiecībā pret vidējā ES pilsoņa gada vides pēdas nospiedumu [108]. Šī pieeja ļauj intuitīvi salīdzināt dažādu ietekmes kategoriju rezultātus.



3.1. att. WH scenārija galarezultāti. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71].

3.2. att. parādīta vides ietekmes sadalījuma analīze, kas saistīta ar jūraszāļu ievākšanas procesu. Pretapaugšanas līdzeklis izceļas kā nozīmīgākais ietekmes avots ar rezultātu 3,18 mPt, tam seko dīzeļdegviela – 2,28 mPt un tērauds, kas izmantots laivu būvniecībā un uzturēšanā, – 1,45 mPt. Šie rezultāti uzsver galvenos vides slodzes avotus ievākšanas posmā, norādot uz iespējam uzlabot sistēmu, piemēram, ieviešot videi draudzīgākus pretapaugšanas līdzekļus, uzlabojot degvielas patēriņa efektivitāti vai izmantojot alternatīvus laivu būvniecības materiālus.



3.2. att. Jūraszāļu ievākšanas posma detalizēti rezultāti WH sistēmā. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71].

- Trīs scenāriju salīdzinājums.

3.2. tabulā ir parādīti kopējie vides ietekmes rezultāti visiem viduspunkta indikatoriem, izceļot katram makroaļģu ražošanas scenārijam raksturīgās lielākās ietekmes vērtības. *ONC* sistēma uzrāda visaugstāko ietekmi klimata pārmaiņu (*CC*), eitrofikācijas saldūdeņos (*EF*), ekotoksicitātes saldūdeņos (*ECF*), zemes izmantošanas (*LU*) un ūdens izmantošanas (*WU*) indikatoros. *OFC* sistēma ir vadošā cieto daļiņu veidošanās (*PM*), paskābināšanās potenciāla

(AP), eitrofikācijas jūrās (EM) un fosilo resursu izmantošanas (RF) kategorijās. Savukārt WH scenārijs uzrāda visaugstāko slodzi minerālu un metālu izmantošanas (RM&M) indikatorā.

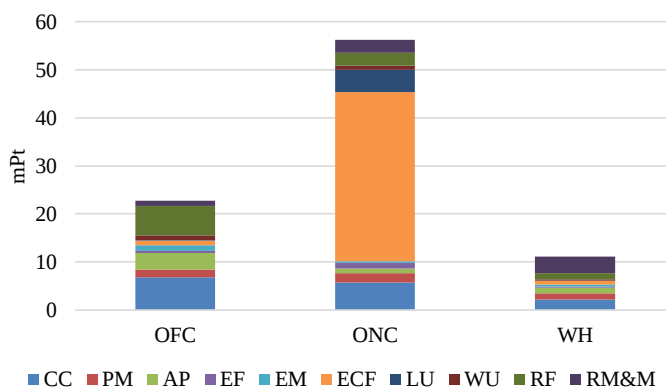
3.2. tabula

WH, ONC un OFC scenāriju kopējie viduspunkta rezultāti. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71]

Ietekmes kategorija	Vienība	WH kopējais	ONC kopējais	OFC kopējais
CC	kg CO ₂ eq	8,45E+01	2,20E+02	2,60E+02
PM	disease inc.	8,45E-06	1,28E-05	1,08E-05
AP	mol H ⁺ eq	1,05E+00	8,47E-01	3,07E+00
EF	kg P eq	1,63E-02	7,00E-02	2,68E-02
EM	kg N eq	2,54E-01	2,08E-01	7,82E-01
ECF	CTUe	1,81E+03	7,86E+04	2,23E+03
LU	Pt	2,69E+02	4,77E+04	6,67E+02
WU	m ³ depriv.	2,64E+01	1,15E+02	1,34E+02
RF	MJ	1,07E+03	2,08E+03	4,80E+03
RM&M	kg Sb eq	2,86E-03	2,27E-03	9,13E-04

CC (klimata pārmaiņas), PM (cieto daļiņu piesārņojums), AP (acidifikācijas potenciāls), EF (eitrofikācija – saldūdeņi), ECF (ekotoksiskums – saldūdeņi), LU (zemes izmantošana), WU (ūdens izmantošana), RF (fosilo resursu izmantošana), RM&M (minerālu un metālu resursu izmantošana)

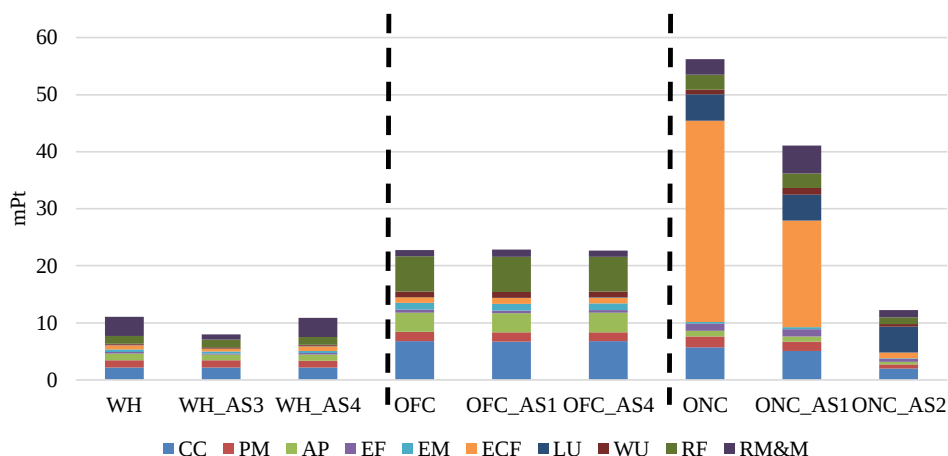
3.2. tabulā attēlotie rezultāti ir papildus ilustrēti 3.3. att., kurā parādītas normalizētās vides ietekmes trīs makroaļģu ražošanas sistēmās. ONC sistēma uzrāda visaugstāko kopējo ietekmi – 56,206 mPt, tai seko OFC ar 22,76 mPt un WH ar 11,10 mPt, apstiprinot, ka WH ir viedei vislabvēlīgākais risinājums. ONC scenārijā visbūtiskākie ietekmes indikatori bija ECF ar 35,22 mPt un CC ar 5,73 mPt. OFC gadījumā galvenās ietekmes radītājas bija CC (6,77 mPt) un RF (6,14 mPt). WH scenārijā vislielākā ietekme bija saistīta ar RM&M (3,39 mPt) un CC (2,20 mPt).



3.3. att. WH, ONC un OFC scenāriju kopējo galarezultātu salīdzinājums. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71].

- Salīdzinājums, iekļaujot alternatīvos scenārijus (AS).

3.4. att. sniegts salīdzinošs pārskats par pamatkonfigurācijām un visiem alternatīvajiem scenārijiem, izceļot vides veiktspējas atšķirības dažādās konfigurācijās. *WH* scenārijā visnozīmīgākais uzlabojums novērojams *WH_AS3*, kurā videi mazāk kaitīga pretapaugšanas līdzekļa izmantošana samazina vides ietekmi par 28,02 %. Savukārt *WH_AS4*, kurā tiek samazināts dīzeļdegvielas patēriņš, nodrošina tikai 2,07 % samazinājumu. *OFC* scenārijā gan *OFC_AS1*, gan *OFC_AS4* uzrāda ierobežotu uzlabojumu. Ir būtiski norādīt, ka saules paneļu integrēšana nedaudz palielina vides slodzi, jo paneļu izgatavošanai nepieciešamie materiāli pārsniedz ieguvumus no elektroenerģijas patēriņa samazinājuma. Jāņem vērā, ka vērtējumā nav iekļauti oglekļa sekvestrācijas vai barības vielu noņemšanas potenciāli, ko nodrošina jūraszāles, kā tas norādīts arī *Seghetta et al.* (2016) pētījumā [24]. Tomēr jaunākā literatūra liecina, ka šo ieguvumu iekļaušana būtiski varētu uzlabot *OFC* sistēmu vides profilu [109]. *ONC* scenārijā mākslīgā apgaismojuma aizstāšana ar dabisko saules gaismu *ONC_AS2* gadījumā nodrošina visnozīmīgāko uzlabojumu –78,25 % ietekmes samazinājumu, pietuvinot rezultātus *WH* scenārijam. *ONC_AS1*, kas ievieš saules enerģiju, samazina ietekmi par 26,9 %, tomēr to ierobežo saules paneļu ražošanas vides izmaksas. Turklāt jutīguma analīze rāda, ka ģeotermālās enerģijas aizstāšana ar Islandes nacionālo enerģijas maisījumu, kas sastāv no 71 % hidroenerģijas, samazinātu *ONC* sākotnējo ietekmi par 35,28 %, norādot, ka ģeotermālā enerģija šajā kontekstā var nebūt optimāls risinājums. Visu konfigurāciju vidū *WH_AS3* scenārijs uzrāda zemāko vides ietekmi, sasniedzot kopējo rezultātu 7,99 mPt, pateicoties videi draudzīgāka pretapaugšanas līdzekļa izmantošanai. Pretstatā tam, augstākā ietekme ir reģistrēta *ONC* sākotnējā scenārijā ar kopējo rezultātu 56,21 mPt. Visnozīmīgākā slodzes samazināšana novērota *ONC_AS2*, kur mākslīgais apgaismojums tiek aizstāts ar dabisko saules gaismu, radot 78,25 % samazinājumu. Tomēr šis uzlabojums jāvērtē piesardzīgi, ņemot vērā, ka šāda pieeja Islandē, kur saules gaismas pieejamība ir ierobežota, var nebūt praktiski īstenojama. Tomēr šis scenārijs varētu būt daudzsolis zemāku platuma grādu reģionos ar lielāku saules starojumu. *WH* sistēmā analīze balstīta izdevīgā ģeogrāfiskajā kontekstā, kur ievākšanas vieta atrodas tikai 40 minūšu attālumā no ostas. Citos, mazāk optimālos reģionos garāki transporta attālumi varētu ievērojami palielināt vides slodzi, jo dīzeļdegviela šajā scenārijā ir otrais ietekmīgākais faktors.

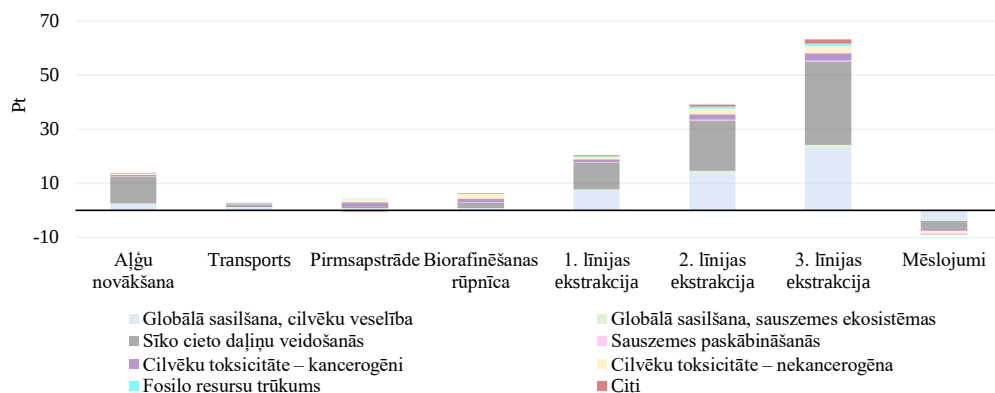


3.4. att. Pamatkonfigurāciju un alternatīvo scenāriju salīdzinājums. Piezīme: AS1 – 50 % elektroenerģija no saules paneļiem; AS2 – dabiskās gaismas izmantošana mākslīgās vietā; AS3 – videi draudzīgs pretapaugšanas līdzeklis; AS4 – 10 % samazināts laivu dīzeļdegvielas patēriņš. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 2 [71].

Pilnās biorafinērijas sistēmas LCA rezultāti

- CB scenārija karsto punktu rezultāti

3.3. tabulā ir attēloti CB sistēmas vides ietekmes rezultāti, kas izteikti kā viduspunkta ietekmes kategorijas un normalizēti atbilstoši *FU1*. Šajā kontekstā pozitīvās vērtības norāda uz vides slodzēm, savukārt negatīvās vērtības atspoguļo izvairīto ietekmi, tas ir, sistēma veicina noteiktu vides spiedienu mazināšanu. Rezultāti ir krāsu kodēti, izmantojot gradāciju no tumši sarkanas (augsta ietekme) līdz gaiši zaļai (zema ietekme), nodrošinot skaidru vizuālu interpretāciju par sistēmas veiktspēju dažādos posmos. Biorafinērijas ekstrakcijas fāzes ir identificētas kā videi visintensīvākās, un karagināna ieguves posms sniedz vislielāko ieguldījumu kopējā ietekmē. Pretēji tam, pēdējā fāze, kurā atlikusī biomasa tiek izmantota kā biostimulējošs mēslojums, uzrāda vides ieguvumus, ko apliecina tās negatīvā ietekmes vērtība. Lai apstiprinātu šos rezultātus, 3.5. att. tiek prezentēti galarezultāti normalizētā un svērtā formātā, palīdzot identificēt tos posmus, kuriem ir vislielākā vides nozīme.



3.5. att. CB sākotnējā scenārija galarezultāti, normalizēti un svērti, ņemot vērā *FU1*. Jāņem vērā, ka “citi” ietver visus pārējos indikatorus, kuru ieguldījums kopējā ietekmē ir mazāks par 1 %. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73].

Kopējā ar CB sistēmu saistītā vides slodze tiek lēsta 140,08 Pt apmērā. Starp ietekmes kategorijām cieto daļiņu veidošanās (*PM*) un globālās sasilšanas potenciāls (*GWP*) izceļas kā viskritiskākās (attiecīgi ar 70,22 Pt un 46,02 Pt). Šīs ietekmes galvenokārt ir saistītas ar energoietilpīgajiem biomateriālu ekstrakcijas procesiem un dīzeļdegvielas patēriņu ievākšanas laikā. Starp ekstrakcijas posmiem trešā līnija, kas paredzēta karagināna ieguvei, ir visietekmīgākā (63,28 Pt), tai seko proteīnu ieguves līnija ar 39,09 Pt. Augšupējā *WH* posmā galvenie ietekmes avoti ir dīzeļdegviela (11,8 Pt) un tērauds, kas nepieciešams laivu būvei (0,65 Pt). Šie rezultāti nedaudz atšķiras no iepriekšējiem analīzēm, kas skaidrojams ar izmaiņām *LCIA* metodoloģijā un *Ecoinvent* datubāzes atjauninājumiem, kuri laika gaitā mainījuši ietekmes raksturojumu. Efektīvāku dzinēju izmantošana vai pāreja uz videi draudzīgākiem degvielas veidiem varētu palīdzēt šīs ietekmes mazināt. Īpaši jāatzīmē, ka mēslojuma ražošana no atlikušās biomasas demonstrē pozitīvu vides efektu, samazinot kopējo ietekmi par 8,82 Pt, aizvietojojot tradicionālos tirgū pieejamos minerālmēslus.

3.3. tabula

CB sākotnējā scenārija viduspunkta rezultāti, ņemot vērā *FU1*. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73]

Vien.		Algu n.	Trans.	Pirm s.	Bior. r.	1. līnijas	2. līnijas	3. līnijas	Mēs.	Kopā
GWP	kg CO2 eq	1,56E+02	7,87E+01	5,38E+01	5,51E+01	4,82E+02	9,02E+02	1,49E+03	-	2,97E+03
SOD	kg CFC11 eq	1,39E-04	3,82E-05	1,33E-04	2,28E-05	3,35E-04	9,04E-04	1,00E-03	-	2,04E-03
IR	kBq Co-60 eq	2,76E+00	1,26E+00	1,25E+01	8,29E+00	8,77E+01	1,58E+02	2,70E+02	-	5,26E+02

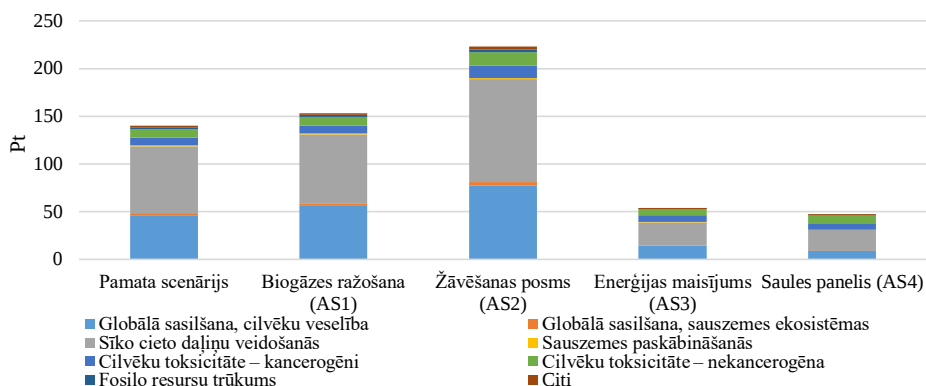
	Vien.	Alģu n.	Trans.	Pirm s.	Bior. r.	1. līnijas	2. līnijas	3. līnijas	Mēs.	Kopā
OFhh	kg NO _x eq	2,93 E+00	2,38E- 01	1,28E- 01	1,77E- 01	1,61E+0 0	3,00E+0 0	4,98E+0 0	- 4,21E- 01	1,26E+01
PM	kg PM2.5 eq	9,56 E-01	6,92E- 02	7,41E- 02	1,88E- 01	9,50E- 01	1,78E+0 0	2,94E+0 0	- 2,60E- 01	6,70E+00
OFt	kg NO _x eq	2,95 E+00	2,54E- 01	1,33E- 01	1,83E- 01	1,72E+0 0	3,19E+0 0	5,32E+0 0	- 4,52E- 01	1,33E+01
TA	kg SO ₂ eq	3,01 E+00	1,48E- 01	1,76E- 01	4,74E- 01	2,37E+0 0	4,67E+0 0	7,34E+0 0	- 1,02E +00	1,72E+01
EF	kg P eq	2,41 E-02	5,92E- 03	2,17E- 01	6,21E- 02	1,17E- 01	2,59E- 01	3,02E- 01	- 5,16E- 02	9,34E-01
ME	kg N eq	4,86 E-03	2,11E- 03	3,58E- 01	2,69E- 03	4,97E- 02	2,10E- 01	4,37E- 02	- 1,97E- 02	6,51E-01
TE	kg 1,4-DCB	1,89 E+02	1,24E+ 03	2,26E +02	2,74E +03	1,53E+0 3	3,13E+0 3	4,73E+0 3	- 1,55E +03	1,22E+04
ECF	kg 1,4-DCB	3,02 E+00	1,92E+ 00	3,78E +00	3,24E +01	9,18E+0 0	2,22E+0 1	2,83E+0 1	- 1,48E +01	8,59E+01
MEc	kg 1,4-DCB	4,06 E+00	3,23E+ 00	5,13E +00	4,18E +01	1,28E+0 1	2,84E+0 1	3,94E+0 1	- 1,91E +01	1,16E+02
HCT	kg 1,4-DCB	8,37 E+00	3,91E+ 00	2,47E +01	2,50E +01	1,66E+0 1	3,43E+0 1	4,85E+0 1	- 1,43E +01	1,47E+02
HNCT	kg 1,4-DCB	8,53 E+01	6,13E+ 01	2,81E +02	5,01E +02	2,47E+0 2	5,98E+0 2	6,99E+0 2	- 2,42E +02	2,23E+03
LU	m ² a crop eq	2,49 E+00	3,13E+ 00	1,36E +00	5,83E +00	3,86E+0 1	1,19E+0 2	1,19E+0 2	- 8,83E +00	2,81E+02
MRS	kg Cu eq	4,89 E-01	2,04E0 1	5,06E- 01	2,62E +00	5,78E- 01	1,44E+0 0	1,75E+0 0	- 3,56E +00	4,03E+00
FRS	kg oil eq	4,99 E+01	2,48E+ 01	1,19E +01	1,30E +01	1,41E+0 2	2,59E+0 2	4,38E+0 2	- 7,21E +01	8,66E+02
WU	m ³	4,91 E-01	1,56E- 01	- 1,47E +01	6,37E- 01	1,87E+0 0	1,20E+0 1	2,53E+0 1	- 3,55E +00	2,23E+01

GWP (globālā sasilšana), *SOD* (stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās), *IR* (jonizējošais starojums), *OFhh* (troposfēras ozona veidošanās – cilvēku veselība), *PM* (cieto daļiņu piesārņojums), *OFt* (troposfēras ozona veidošanās – ekosistēmas), *TA* (sauszes paskābināšanās), *EF* (saldūdeņu eutrofikācija), *ME* (jūras eutrofikācija), *TE* (sauszes ekotoksicitāte), *ECF* (saldūdeņu ekotoksicitāte), *MEc* (jūras ekotoksicitāte), *HCT* (cilvēku toksicitāte – vēža riski), *HNCT* (cilvēku toksicitāte – nevēža riski), *LU* (zemes izmantošana), *MRS* (minerālo resursu izmantošana), *FRS* (fosilo resursu izmantošana), *WU* (ūdens izmantošana)

Vien. (Vienība), Alģu n (Alģu novākšana), Trans. (Transports), Pirm. s. (Pirmapstrāde), Bior. r. (Biorafinēšanas rūpnīca, 1. līnijas (1. līnijas ekstrakcija), 2. līnijas (2. līnijas ekstrakcija), 3. līnijas (3. līnijas ekstrakcija), Mēs. (Mēslojums)

- Salīdzinājums ar alternatīvajiem scenārijiem (AS).

3.6. attēls ilustrē dažādu alternatīvo scenāriju rezultātus, kas tika analizēti šajā pētījumā.



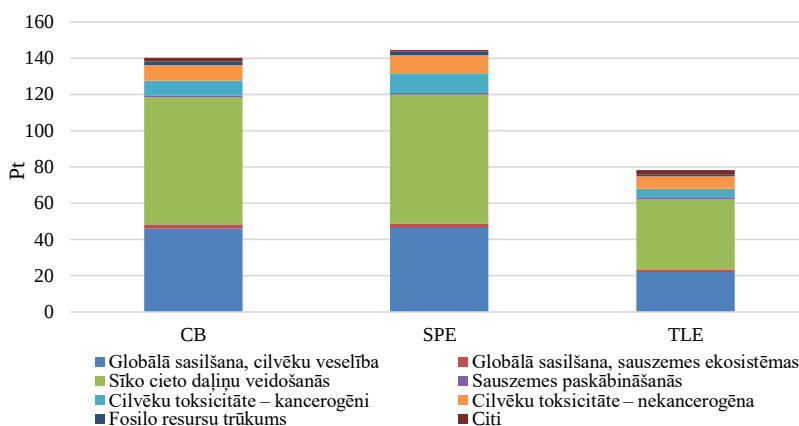
3.6. att. Salīdzinājums ar AS scenārijiem, ņemot vērā *FU1*. “Citi” ietver visus pārējos indikatorus, kuru ieguldījums kopējā ietekmē ir mazāks par 1 %. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73].

Starp analizētajiem alternatīvajiem scenārijiem AS2 uzrāda vislielāko vides slodzi, sasniedzot kopējo ietekmi 222,89 Pt. Šo rezultātu lielā mērā nosaka energoietilpīgais žāvēšanas posms, kas tika ieviests biomasas saglabāšanai, un viens pats veido 37 % no kopējās ietekmes. Žāvēšanas iekļaušana biorafinērijas procesā izrādās kritisks projektēšanas lēmums, kas prasa rūpīgu tās nepieciešamības izvērtējumu, kā arī energoefektīvāku tehnoloģisko risinājumu identificēšanu, ja žāvēšana tiek uzskatīta par būtisku. Savukārt scenāriji, kuros notiek pāreja uz alternatīviem elektroenerģijas avotiem, demonstrē ievērojamus vides veikspējas uzlabojumus. AS3, kurā ieviests atjaunojamās elektroenerģijas sertifikātu (*REC*) maisījums, samazina nospiedumu līdz 53,97 Pt, savukārt AS4, kura pamatā ir saules enerģijas integrācija, vēl vairāk samazina ietekmi līdz 47,48 Pt. Šie scenāriji būtiski pārspēj sākotnējo dizainu, kas paļaujas uz Igaunijas tradicionālo elektroenerģijas tīklu, samazinot kopējo ietekmi attiecīgi par 61 % un 66 %. Salīdzinot AS1 (biogāzes ražošana no atlikumiem) ar sākotnējo sistēmu, konstatēts, ka atlikumu kā mēslojuma izmantošana joprojām ir vides ziņā visizdevīgākais dzīves cikla beigu risinājums. Mēslojuma lietojums rada negatīvu ietekmes rezultātu –8,82 Pt, kas norāda uz vides ieguvumu, savukārt biogāzes ražošana sasniedz pozitīvu ietekmi 4,30 Pt. Šī atšķirība rodas no augstākajām tehnoloģiskajām prasībām un ar tām saistītajām ietekmēm, kas raksturīgas biogāzes sistēmai. Abos gadījumos izmantota sistēmas paplašināšanas pieeja, pieņemot, ka no *F. lumbricalis* atlikumiem iegūtais mēslojums un elektroenerģija aizstāj tirgū pieejamos ekvivalentus. Tomēr mēslojuma lietošanas vienkāršība un papildu infrastruktūras trūkums padara to par ilgtspējīgāku izvēli pašreizējā biorafinērijas konfigurācijā.

- Salīdzinājums ar alternatīvajiem dizainiem (*SPE* un *TLE*).

Tiek salīdzināta *CB* sistēmas vides veikspēja ar divām alternatīvām biorafinērijas konfigurācijām – *SPE* un *TLE*, izmantojot *FU2*, kas balstās produkcijas daudzumā. Rezultāti, kas apkopoti 3.7. att., izceļ atšķirības starp trim dizainiem. Starp analizētajām konfigurācijām

SPE modelis uzrāda visaugstāko vides ietekmi, sasniedzot 144,60 Pt. Lai gan *CB* scenārijs nodrošina aptuveni 4 % samazinājumu kopējā ietekmē salīdzinājumā ar *SPE*, tā galvenā priekšrocība slēpjas efektīvākā biomasas izmantošanā. Pateicoties kaskādes ekstrakcijas pieejai, *CB* sistēma spēj iegūt ekvivalentu produkcijas daudzumu, izmantojot tikai 1 tonnu biomasas, kamēr *SPE* nepieciešamas 3 tonnas, lai sasniegtu to pašu rezultātu. Savukārt *TLE* scenārijs uzrāda zemāko vides ietekmi – 78,39 Pt, kas liecina, ka daudzlīniju ekstrakcijas pieeja varētu piedāvāt ilgtspējīgāku alternatīvu. Tomēr *TLE* nespēj sasniegt tādu pašu kopējo produkcijas izlaidi kā *CB*. Lai nodrošinātu godīgu salīdzinājumu saskaņā ar *FU2*, sistēmas robežās tika integrēti papildu tradicionālie tirgus produkti, lai kompensētu zemāku izlaidi *TLE* scenārijā. Šī pieeja ne tikai nodrošina metodoloģisko konsekveni, bet arī atspoguļo pieaugošo tirgus potenciālu makroaļģu izcelsmes savienojumiem farmācijas, kosmētikas un pārtikas nozarēs.



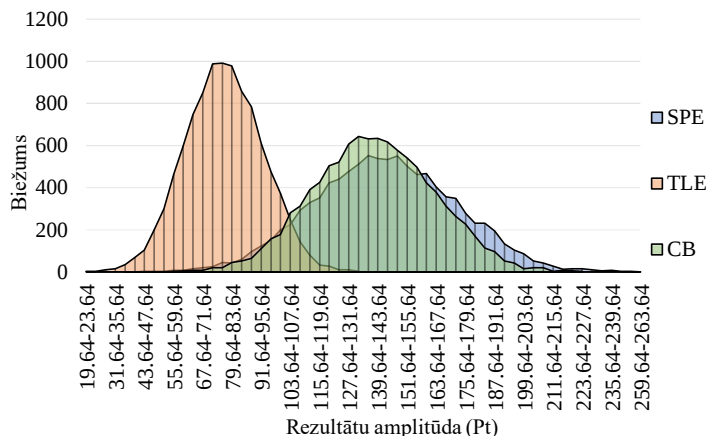
3.7. att. *CB* sistēmas un *SPE* un *TLE* scenāriju salīdzinājums attiecībā pret *FU2*. “Citi” ietver visus pārējos indikatorus, kuru ieguldījums kopējā ietekmē ir mazāks par 1 %.

Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73].

- **Jutīguma analīze.**

Lai novērtētu vides veiktspējas jutīgumu pret enerģijas patēriņa svārstībām ekstrakcijas posmā, veikta Montekarlo analīze. Šī simulācija ietver 10000 iterāciju, kurās enerģijas patēriņš mainās ± 20 % robežās. Rezultāti, kas parādīti 3.8. att., nodrošina visaptverošu salīdzinājumu visām biorafinērijas konfigurācijām vienotā analītiskajā ietvarā. Vides ietekmes rezultāti svārstījās no minimālajām 19,65 Pt līdz maksimālajām 239,45 Pt. *SPE* konfigurācija uzrādīja visplašāko dispersiju ar vērtībām no 36,37 Pt līdz 239,48 Pt, savukārt *TLE* demonstrēja šaurāku diapazonu – no 19,65 Pt līdz 129,88 Pt. Būtiski, ka *CB* scenārijs uzrādīja ievērojamu pārklāšanos ar *SPE*, kas atbilst iepriekš apspriestajām tendencēm. Svarīgs novērojums identificēts kopīgajā ietekmes diapazonā no 47,64 Pt līdz 143,64 Pt, kur visas trīs konfigurācijas savstarpēji pārklājas, aptverot aptuveni 17 % no kopējās simulāciju datu kopas. Tas norāda, ka 83 % simulāciju gadījumu *TLE* konfigurācija uzrādīja pārāku vides veiktspēju,

salīdzinot gan ar *SPE*, gan *CB*. Šie rezultāti uzsver trīsliņiju ekstrakcijas biorafinērijas kā ilgtspējīgākas alternatīvas potenciālu, īpaši mainīgos enerģijas patēriņa apstākļos.



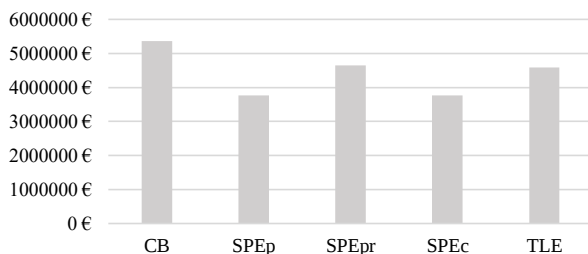
3.8. att. Montekarlo analīze *CB*, *SPE* un *TLE* salīdzinājumam. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4 [73].

3.2. Ekonomiskie rezultāti

Ekonomiskās analīzes rezultāti

- Operatīvās izmaksas.

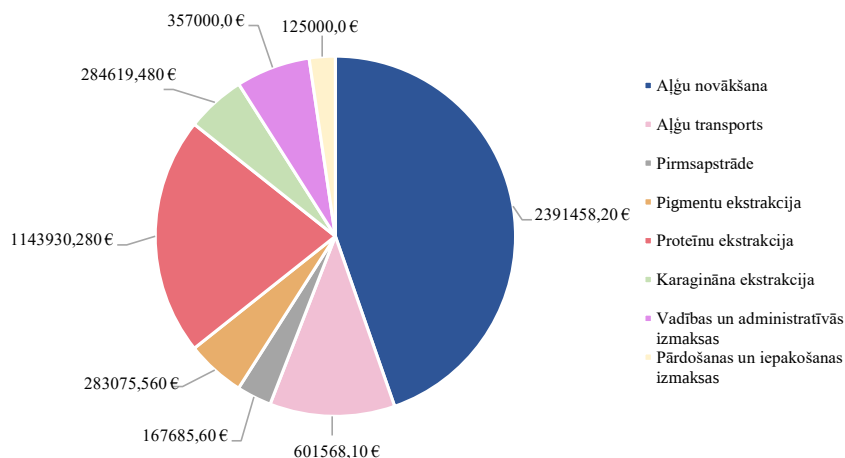
3.9. att. sniegta salīdzinoša analīze par operatīvajām izmaksām, kas saistītas ar piecām dažādām biorafinērijas konfigurācijām.



3.9. att. *CB*, *SPEp*, *SPEpr*, *SPEc* un *TLE* scenāriju operatīvās izmaksas.

Operatīvo izdevumu atšķirības starp dažādiem ražošanas scenārijiem ir salīdzinoši nelielas. Kā paredzēts, *CB* scenārijs uzrāda visaugstākās operatīvās izmaksas – 5 354 337 EUR/gadā. Tas galvenokārt ir saistīts ar šīs sistēmas sarežģītību un tās spēju vienlaicīgi ražot vairākus augstas pievienotās vērtības galaproduktus, kas prasa plašāku un resursietilpīgāku apstrādes infrastruktūru. Starp viena produkta ekstrakcijas konfigurācijām *SPEp* (3 766 787 EUR/gadā) un *SPEc* (3 771 810 EUR/gadā) uzrāda viszemākos operatīvos izdevumus, turklāt ar gandrīz identisku izmaksu struktūru. Savukārt *SPEpr* (4 642 929 EUR/gadā) un *TLE* (4 592 366 EUR/gadā) ierindojas vidējā diapazonā, atspoguļojot nedaudz augstākas

eksploatācijas prasības nekā rentablākās viena produkta alternatīvas, taču joprojām saglabāties zemāk par CB sistēmas izmaksām. 3.10. att. ir parādīts detalizēts CB konfigurācijas izmaksu sadalījums, kam ir īpaša nozīme, jo tā pārstāv ne tikai visdārgāko scenāriju, bet arī pamatdizainu, kas padziļināti analizēts šajā promocijas darbā.

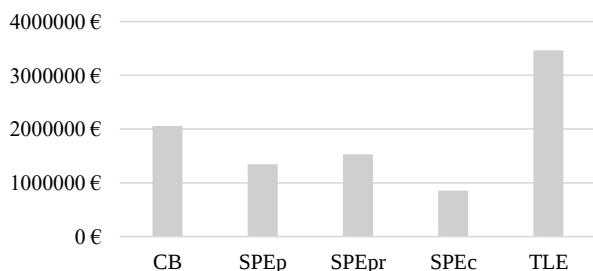


3.10. att. CB konfigurācijas operatīvās izmaksas. Vērtības norādītas par vienu gadu.

Izmaksu sadalījums sniedz būtisku ieskatu CB scenārija galvenajos ekonomiskajos virzītājspēkos, palīdzot identificēt potenciālās procesa optimizācijas iespējas. Īpaši jāatzīmē, ka vislielākās izmaksas ir saistītas ar *F. lumbricalis* ievākšanas posmu, kas veido 2 391 458 EUR/gadā jeb aptuveni 45 % no kopējām eksploatācijas izmaksām. No šīs summas 90 % ir saistīti ar dīzeļdegvielas patēriņu ieguves un transportēšanas procesā. Otrās dārgākās posms ir proteīnu ekstrakcija, kuras izmaksas sasniedz 1 143 930 EUR, galvenokārt hidrolyzes procesā izmantoto fermentu (piemēram, alkalāzes) augsto cenu dēļ. Trešās lielākās izmaksas veido alģu transportēšana, kas sasniedz 601 568 EUR. Tās lielā mērā atkarīgas no degvielas patēriņa. Šie rezultāti norāda, ka degvielas un fermentu iepirkšana ir galvenie CB sistēmas ekonomiskie ierobežojumi, uzsverot nepieciešamību uzlabot degvielas efektivitāti un izpētīt alternatīvus vai zemāku izmaksu fermentu risinājumus, lai uzlabotu sistēmas kopējo ekonomisko ilgtspēju.

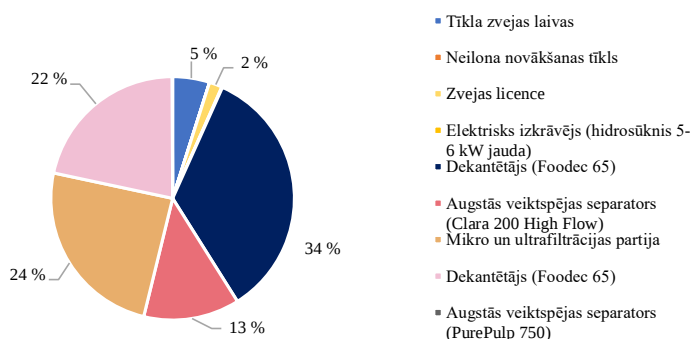
- Investīcijas.

3.11. attēls ilustrē ieguldījumu izmaksas, kas saistītas ar dažādām biorafinērijas konfigurācijām. TLE dizains uzrāda visaugstāko kapitāla pieprasījumu –3 459 086 EUR, jo tam vienlaicīgi jādarbina trīs atsevišķas ekstrakcijas līnijas. Šī konfigurācija prasa lielāku skaitu aprādes iekārtu un plašāku infrastruktūru, tādējādi paaugstinot kopējās investīciju izmaksas. Tam seko CB sistēma ar investīciju izmaksām 2 058 558 EUR, kas atspoguļo kaskādes biorafinērijas tehnoloģisko sarežģītību. Kā paredzēts, SPE konfigurācijām ir viszemākās sākotnējās investīcijas, jo to koncentrēšanās uz viena produkta ekstrakciju samazina nepieciešamību pēc plašām iekārtām un infrastruktūras.



3.11. att. CB, SPEp, SPEpr, SPEc un TLE scenāriju investīciju izmaksas.

3.12. attēls piedāvā detalizētu CB konfigurācijas investīciju sadalījumu, kas vienlaikus kalpo kā reprezentatīvs modelis arī citu dizainu izmaksu struktūras izpratnei.



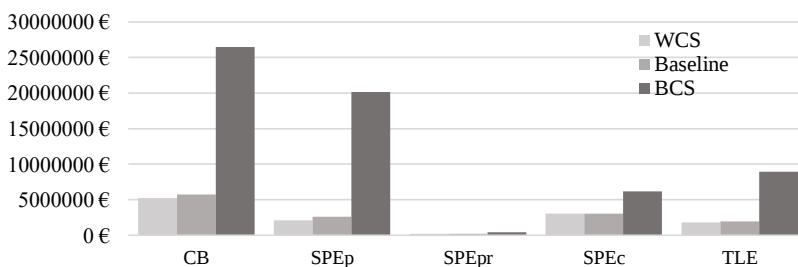
3.12. att. CB biorafinērijas konfigurācijas investīciju izmaksu sadalījums.

Foodec 65 dekantēšanas centrifūgas veido lielāko daļu no kopējām investīcijām, sasniedzot 34 % no izmaksām. Šīs iekārtas ir būtiskas efektīvai biomasas un šķidrās frakcijas atdalīšanai, kas ir kritisks posms, lai iegūtu augstas kvalitātes pigmentus, proteīnus un karagīnu. Tām seko mikrofiltrācijas un ultrafiltrācijas vienības, kas veido 24 % no kopējām investīcijām, jo tās spēlē centrālo lomu ekstraktu tīrības nodrošināšanā. PurePulp 750 un Clara 200 augstas plūsmas, liela ātruma separatoru ieguldījums sasniedz attiecīgi 22 % un 13 %, atspoguļojot to nozīmīgumu bioproduktu attīrīšanā un koncentrēšanā. Papildu mazākas investīcijas ietver tīkla zvejas kuģi, neilona novākšanas tīklus, ikgadējās ievākšanas licences, elektrisko izkrāvējkārtu (ar 5–6 kW hidraulisko sūkni) un zemes iegādi. Lai gan šie komponenti veido salīdzinoši nelielu daļu no kopējām investīcijām, tie ir būtiski, lai izveidotu pilnībā funkcionējošu un efektīvu *F. lumbriculis* biorafinēriju.

- Pārdošanas scenāriji.

Veikta ieņēmumu analīze mainīgos tirgus apstākļos, proti, vissliktākajā (WCS) un vislabākajā (BCS) gadījumā, lai novērtētu piedāvāto biorafinērijas konfigurāciju finansiālo noturību. 3.13. att. ietvertie rezultāti parāda ieņēmumu svārstības dažādos ekonomiskajos scenārijos. Produkta pārdošanas ieņēmumi dažādos scenārijos (WCS un BCS) CB, SPEp, SPEpr, SPEc un TLE konfigurācijām. Pārņemts no aprobācijas publikācijas Nr. 4. Šie rezultāti, kas attiecas tikai uz produktu pārdošanas ieņēmumiem, sniedz sākotnēju ieskatu dažādo

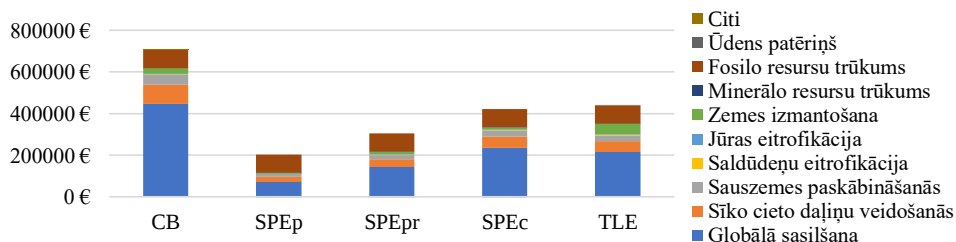
biorafinērijas sistēmu ekonomiskajā potenciālā. Kā bija paredzams, *CB* un *SPEp* konfigurācijas, kas prioritizē pigmentu ekstrakciju, uzrāda visaugstākos ieņēmumus. Pretēji tam, *SPEpr*, kas koncentrējas uz proteīnu ieguvu, rada ievērojami zemākus ieņēmumus, tādējādi palielinot ekonomiskā riska iespējamību nelabvēlīgos tirgus apstākļos. Lai arī šī analīze nav pilna ekonomiskā novērtējuma sastāvdaļa, tā kalpo kā pamats turpmākiem finanšu novērtējumiem. Identificējot produktu cenu un biomasas pieejamības ietekmi uz kopējiem ieņēmumiem, šis sākotnējais solis palielina plašākas tehniski ekonomiskās analīzes uzticamību un pamatotību.



3.13. att. Pārdošanas scenāriju salīdzinošā analīze, ieskaitot WCS un BCS.

- Vides izmaksu monetarizācijas rezultāti

3.13. attēls sniedz salīdzinošu analīzi par vides izmaksām, kas saistītas ar dažādām biorafinērijas konfigurācijām. Saskaņā ar sākotnējiem *LCA* rezultātiem *CB* uzrādīja visaugstākās vides izmaksas – 707 731 EUR, kam seko *TLE* (441 437 EUR), *SPEc* (421 116 EUR), *SPEpr* (304 595 EUR) un *SPEp* (202 964 EUR). Tomēr, normalizējot pēc kopējās produkcijas izlaides, interpretācija mainās. Lai replicētu *CB* produkcijas apjomu, jāapvieno *SPEp*, *SPEpr* un *SPEc* izlaide, kā rezultātā kopējās vides izmaksas sasniegtu 928 676 EUR. Šāds rezultāts liecina, ka apvienotās viena produkta ekstrakcijas konfigurācijas ir videi dārgākas nekā *CB* modelis. Detalizētāka izmaksu sadalījuma analīze atklāj, ka vislielāko daļu vides izmaksu veido *GWP* (63 %), kam seko *PM* (13 %) un *FRS* (12 %). Būtiski, ka šī sadalījuma struktūra atšķiras no sākotnējiem *LCA* rezultātiem, kur *PM* bija dominējošais ietekmes indikators, bet *FRS* spēlēja relatīvi mazu lomu. Šī novirze uzsver monetarizācijas koeficientu būtisko nozīmi, parādot, ka to lietojums ievērojami var mainīt ietekmju interpretāciju un prioritizāciju izmaksu balstītā novērtēšanas ietvarā.



3.13. att. Vides ārējo izmaksu salīdzinošā analīze. “Citi” ietver visu *ReCiPe2016* indikatoru summu, kuru ietekme ir mazāka par 1 EUR.

Salīdzinošie ekonomiskie novērtējumi

3.4. tabula sniedz visaptverošu dažādu biorafinērijas konfigurāciju ekonomisko novērtējumu 10 gadu periodā. Saskaņā ar vissliktāko gadījuma scenāriju (WCS) visiem scenārijiem ir negatīvas *ROI* vērtības, kas norāda uz ilgstošiem finanšu zaudējumiem. *SPEpr* un *TLE* ir vismazāk dzīvotspējīgie, uzrādot īpaši sliktus *ROI* rādītājus (attiecīgi –1934 % un –1262 %. Šos rezultātus pastiprina arī NPV aprēķini, kur *SPEpr* uzrāda vislielākos zaudējumus –31 904 995 EUR. Visās konfigurācijās *IRR* paliek neapreķināms, vēl vairāk apstiprinot to nespēju ģenerēt finanšu atdevi. Negatīvās *PI* vērtības atspoguļo to pašu tendenci, kur *SPEpr* atkal ieņem viszemāko vietu ar –15,50, nostiprinot savu statusu kā ekonomiski vismazāk dzīvotspējīgā opcija. Bāzes scenārijā *CB* ir vienīgais dizains ar pozitīvu *ROI* – 41 %, norādot uz mērenu rentabilitāti. Tomēr tā NPV saglabājas negatīvs, liecinot, ka sākotnējo investīciju atgūšana joprojām var būt izaicinoša. Pārējie scenāriji turpina uzrādīt negatīvus NPV un *PI*, ar *SPEpr* atkal sliktākajā pozīcijā. Lai gan *CB* uzrāda salīdzinoši labāku sniegumu, tā finansiālā ilgtspēja bāzes apstākļos ir margināla un nav pietiekama pārlicecinošai rūpnieciskai ieviešanai. Pretstatā tam, vislabākā gadījuma scenārijā (*BCS*) gan *CB*, gan *SPEp* uzrāda spēcīgu finansiālo dzīvotspēju. *CB* sasniedz *ROI* 5147 % un NPV 82 437 798 EUR, savukārt *SPEp* seko ar *ROI* 4111 % un NPV 65 710 001 EUR. Abos gadījumos ziņots arī par augstiem *IRR* rādītājiem (attiecīgi 559 % un 447 %) un pozitīvām *PI* vērtībām (40,05 un 31,92), norādot uz ievērojamu rentabilitāti labvēlīgos tirgus apstākļos. Pretēji tam, *SPEpr*, *SPEc* un *TLE* saglabājas nerentabli, un *SPEpr* atkal uzrāda vislielākos zaudējumus (NPV – 61 516 773 EUR).

3.4. tabula

Dažādu scenāriju salīdzinošā ekonomiskā analīze

	<i>CB</i>	<i>SPEp</i>	<i>SPEpr</i>	<i>SPEc</i>	<i>TLE</i>
<i>Worst case scenārijs (WCS)</i>					
<i>ROI</i>	–154 %	–802 %	–1934 %	–389 %	–1262 %
<i>NPV</i>	–3 168 612	–13 623 485 €	–31 904 995 €	–6 964 791 €	–21 060 533 €
<i>IRR</i>	Nav apreķināms	Nav apreķināms	Nav apreķināms	Nav apreķināms	Nav apreķināms
<i>PI</i>	–1,54	–6,62	–15,50	–3,38	–10,23
<i>Baseline scenārijs</i>					
<i>ROI</i>	41 %	–596 %	–1934 %	–389 %	–1194 %
<i>NPV</i>	–17 318 €	–10 306 897 €	–31 904 995€	–6 964 791 €	–19 954 451 €
<i>IRR</i>	–0,17 %	Nav apreķināms	Nav apreķināms	Nav apreķināms	Nav apreķināms
<i>PI</i>	–0,01	–5,01	–15,50	–3,38	–9,69
<i>Best case scenārijs (BCS)</i>					
<i>ROI</i>	5147 %	4111 %	–3768 %	–679 %	–209 %
<i>NPV</i>	82 437 798 €	65 710 001 €	–61 516 773 €	–11 636 363 €	–4 055 130 €
<i>IRR</i>	559 %	447 %	Nav apreķināms	Nav apreķināms	Nav apreķināms
<i>PI</i>	40,05	31,92	–29,88	–5,65	–1,97

Kopumā *CB* konfigurācija izceļas kā visnoturīgākais un ekonomiski daudzsološākais dizains, demonstrējot stabilitāti bāzes scenārijā un augstu rentabilitāti labākā gadījuma scenārijā (*BCS*), vienlaikus saglabājot salīdzinoši zemākus zaudējumus sliktākajā gadījumā (*WCS*). Šie rezultāti uzsver pigmentu ieguves izšķirošo nozīmi *F. lumbricalis* biorafinērijas finansiālās ilgtspējas noteikšanā. Sistēmas, kas koncentrējas uz proteīnu vai karagināna ieguvu, vai kurām

trūkst integrētas kaskādes pieejas, konsekvēnti uzrāda zemākus rezultātus un ir ekonomiski nedzīvotspējīgas. Visās konfigurācijās izejvielu iegūšana un transports veido nozīmīgākās izmaksu pozīcijas. Lielā atkarība no dīzeļdegvielas traleru kuģu darbināšanai ievērojami palielina ekspluatācijas izmaksas – problēma, ko vēl vairāk saasina nestabilās enerģijas cenas Eiropā, ko ietekmē ģeopolitiskās spriedzes un pāreja uz bezfosilās enerģijas avotiem [110]. *CB* konfigurācijas ekspluatācijas izmaksas ir visaugstākās – 5 354 337 EUR/gadā, kas izskaidrojams ar daudzproduktu ieguves pieeju, kam nepieciešama kompleksa pārstrādes infrastruktūra. Ieguves darbības vien veido 2 391 458 EUR/gadā, no kuriem 90 % attiecināmi uz degvielas patēriņu. Proteīnu ieguve ir otrs lielākais izdevumu avots (1 143 930 EUR), galvenokārt enzīmu (piemēram, alkalāzes) augsto izmaksu dēļ. Jūraszāļu transportēšana ierindojas trešajā vietā (601 568 EUR), atkal galvenokārt degvielas izmaksu dēļ. Arī investīciju izmaksas atbilst šai tendencei, kur *Foodec 65* dekantēšanas centrifūga ir vislielākais ieguldījums, kam seko modernās filtrācijas sistēmas. Šie komponenti ir būtiski biomasas atdalīšanai un augstas kvalitātes produktu atgūšanai, veidojot kaskādes biorafinērijas tehnoloģisko pamatu. Šo konfigurāciju finansiālais sniegums ir ļoti atkarīgs no tirgus dinamikas, jo īpaši pigmentu cenu un biomasas pārstrādes apjoma. *CB* rentabilitāte *BCS* scenārijā, kur pigmentu cenas sasniedz 500 000 EUR/tonnā, būtiski kontrastē ar finansiālo trauslumu, kad cenas nokrīt līdz 100 000 EUR/tonnā. Tas izceļ nepieciešamību pēc uzticamas tirgus prognozēšanas, elastīgām cenu noteikšanas stratēģijām un riska pārvaldības mehānismiem, lai nodrošinātu ilgtspējīgu darbību ilgtermiņā, īpaši ņemot vērā, ka pigmentu pārdošana veido galveno ieņēmumu avotu.

3.3. Sociālās ietekmes rezultāti

IPA pieejas rezultāti

Izmantojot *IPA* metodoloģiju, šī novērtējuma galvenais mērķis ir izstrādāt sociālo risku kartējumu *F. lumbricalis* ieguves vērtību ķēdēm – īpaši *WH* (savvaļas ievākšana) un *OFC* (jūras audzēšana) sistēmām. Šie atsaucies scenāriji ir detalizēti aprakstīti promocijas darba 2.1. un 2.4. nodaļā. Šajā kopsavilkumā sniegti *WH* scenārija pilnie rezultāti, jo tas atspoguļo reālo gadījumu izpēti. *OFC* konfigurācija kalpo kā salīdzinošs etalons, un tās pilns apraksts ir atrodams promocijas darbā.

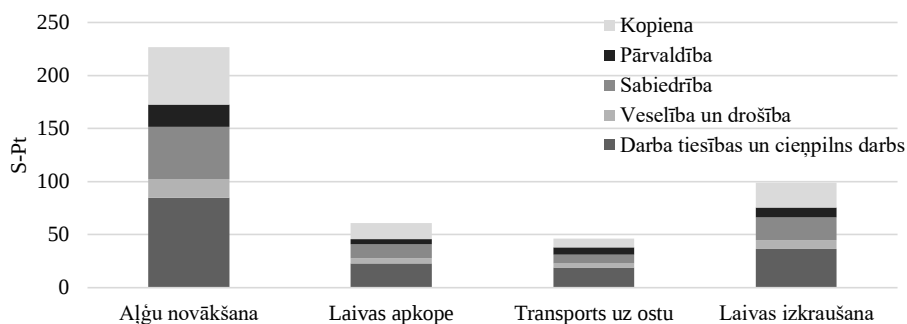
- *WH* rezultāti.

3.5. tabula uzrāda *WH* scenārija atsevišķu apakšsociālo kategoriju rezultātus, izmantojot krāsu kodējumu, kur sarkanais norāda uz visaugstāko potenciālo sociālo risku, bet zaļais — uz viszemāko.

WH scenārija apakškategoriju rezultāti

Ietekmes kategorija	Alģu novākšana	Laivas apkope	Transports uz ostu	Laivas izkraušana	Kopā	Vienība
Alģu novērtējums	0,01508	0,00454	0,00486	0,00695	0,0314	mrheq
Darbinieki nabadzībā	0,01135	0,00301	0,00216	0,00433	0,0208	mrheq
Bēru darbs	0,01274	0,00355	0,00197	0,00519	0,0234	mrheq
Piespiedu darbs	0,02167	0,00576	0,00506	0,00946	0,0419	mrheq
Pārmērīgs darba laiks	0,01588	0,00431	0,00378	0,00704	0,0310	mrheq
Asociācijas brīvība	0,01269	0,00310	0,00248	0,00641	0,0247	mrheq
Migrējošais darbaspēks	0,00982	0,00241	0,00201	0,00421	0,0185	mrheq
Sociālie pabalsti	0,00711	0,00190	0,00116	0,00352	0,0137	mrheq
Darba likumi / konvencijas	0,00387	0,00119	0,00125	0,00152	0,0078	mrheq
Diskriminācija	0,01868	0,00529	0,00403	0,00811	0,0361	mrheq
Bezdarbs	0,00666	0,00165	0,00170	0,00274	0,0127	mrheq
Arodslimības un apdraudējumi	0,01799	0,00476	0,00298	0,00860	0,0343	mrheq
Traumas un letāli gadījumi	0,02456	0,00658	0,00692	0,01012	0,0482	mrheq
Indiāņu / pamatiedzīvotāju tiesības	0,00537	0,00143	0,00073	0,00230	0,0098	mrheq
Dzimumu līdztiesība	0,00759	0,00214	0,00114	0,00311	0,0140	mrheq
Augstas konflikta zonas	0,00958	0,00235	0,00222	0,00472	0,0189	mrheq
Neinfekcijas slimības	0,00256	0,00058	0,00045	0,00114	0,0047	mrheq
Infekcijas slimības	0,00747	0,00210	0,00103	0,00296	0,0136	mrheq
Nabadzība un nevienlīdzība	0,01278	0,00342	0,00240	0,00583	0,0244	mrheq
Vides ilgtspējas stāvoklis	0,01572	0,00438	0,00237	0,00691	0,0294	mrheq
Tiesību sistēma	0,01243	0,00312	0,00397	0,00569	0,0252	mrheq
Korupcija	0,00680	0,00159	0,00190	0,00274	0,0130	mrheq
Demokrātija un vārda brīvība	0,01739	0,00457	0,00633	0,00873	0,0370	mrheq
Dzērmā ūdens pieejamība	0,00799	0,00212	0,00118	0,00315	0,0144	mrheq
Sanitāro pakalpojumu pieejamība	0,01306	0,00378	0,00194	0,00522	0,0240	mrheq
Bērni ārpus izglītības sistēmas	0,00922	0,00238	0,00192	0,00463	0,0182	mrheq
Slimnīcu gultasvietu pieejamība	0,01176	0,00321	0,00235	0,00449	0,0218	mrheq
Mazās saimniecības pret komerciālajām saimniecībām	0,00255	0,00062	0,00028	0,00231	0,0058	mrheq
Elektroenerģijas pieejamība	0,00547	0,00159	0,00048	0,00218	0,0097	mrheq
Īpašumtiesības	0,01390	0,00393	0,00220	0,00546	0,0255	mrheq

Analīze norāda, ka jūraszāļu ievākšanas darbības ir posms ar visaugstāko potenciālo sociālo risku, kam cieši seko kuģu izkraušanas procedūras. Starp novērtētajiem rādītājiem “Traumas un letāli negadījumi” izceļas kā indikators ar visaugstāko iespējamo risku (0,0482 mrheq), kas rada nopietnas bažas par darba drošību šajā nozarē. Papildus tam arī piespiedu darbs (0,0419 mrheq) un diskriminācija (0,0361 mrheq) tiek identificēti kā būtiski riski, kam jāpievērš turpmāka uzmanība. Lai nodrošinātu padziļinātu izpratni par rezultātiem, 3.14. attēlā parādīti normalizētie un svērtie rezultāti, kas grupēti plašākās kaitējuma kategorijās. Šāda kategoriju pieeja ļauj dziļāk interpretēt sociālās sekas, kas saistītas ar WH scenāriju. Jūraszāļu ievākšana izceļas kā posms ar kopumā visaugstāko sociālo risku, sasniedzot 226,85 S-Pt. No individuālajiem indikatoriem būtiskākie ir piekļuve elektroenerģijai (22,36 S-Pt), darba tiesību akti un konvencijas (20,51 S-Pt) un darba vides toksiskums un riski (18,50 S-Pt). Attiecībā uz kaitējuma kategorijām visvairāk ietekmētās ir darba tiesības un cieņpilns darbs (163,45 S-Pt), kopiena (100,82 S-Pt), un sabiedrība (92,05 S-Pt), kas vēlreiz uzsver nepieciešamību pēc mērķtiecīgiem uzlabojumiem jūraszāļu ievākšanas posmā.



3.14. att. WH scenārija normalizētie un svērtie rezultāti. Rezultāti izteikti normalizētos sociālajos punktos (S-Pt).

Būtisks novērojums WH scenārijā izriet no SHDB analīzes, kas parāda, ka vislielākās ietekmes indikators – piekļuve elektroenerģijai – primāri neskar Igauniju, bet gan ietekmē piegādes ķēdes augšdaļas valstis, piemēram, Kotdivuāru un Ganu (skat. 3.15. att.). Līdzīgi arī citi indikatori, piemēram, darba vides toksiskums un riski, identificē Ķīnu kā vienu no visvairāk skartajiem reģioniem. Šie rezultāti uzsver sociālo risku globālo raksturu makroalģu vērtību ķēdēs, norādot, ka ievērojamas sociālās sekas var rasties tālu ārpus analizējamās sistēmas ģeogrāfiskajām robežām.

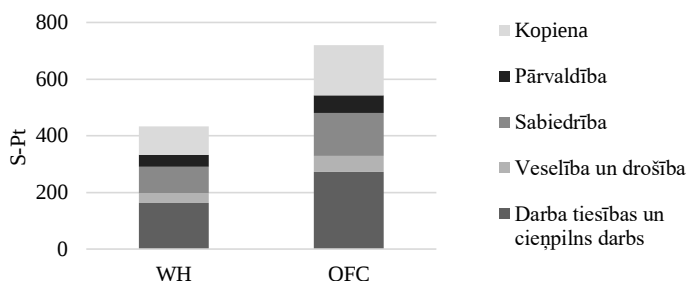


3.15. att. Normalizētā indikatora “Piekluve elektroenerģijai” valstu karstpunktu analīzes rezultāti.

- Salīdzinošie rezultāti.

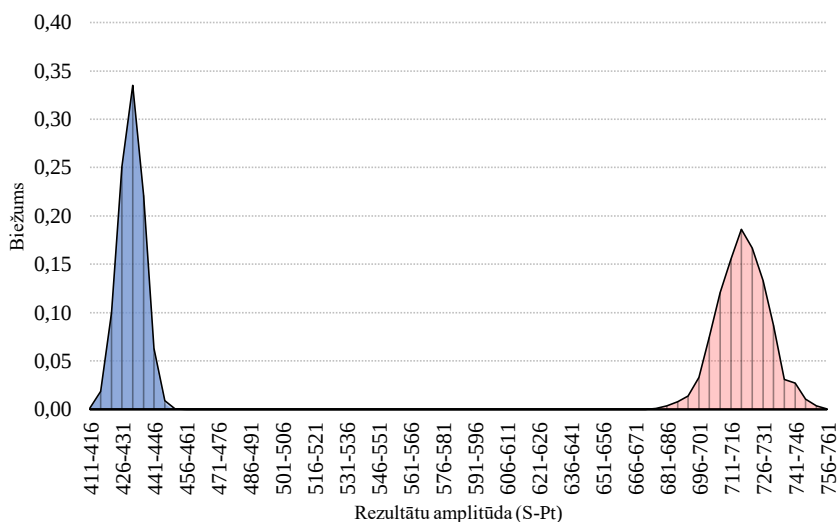
3.16. attēls parāda abu scenāriju salīdzinošo analīzi. Tajā OFC scenārijs uzrāda ievērojami augstāku potenciālo sociālo ietekmi nekā WH. Kopējais ietekmes rādītājs OFC gadījumā sasniedz 719,51 S-Pt, savukārt WH –432,85 S-Pt. Šī atšķirība norāda, ka OFC ir saistīts ar lielākiem sociālajiem riskiem vairākās galvenajās kategorijās, tostarp darba tiesībās, kopienas labklājībā, pārvaldībā un veselības un drošības aspektos. Lai stiprinātu šo secinājumu ticamību, veikta Montekarlo simulācija, lai ņemtu vērā galveno ievaddatu mainīgumu. Simulācija veikta ar 5000 itērācijām, un tā sniedz varbūtisku sociālās ietekmes iznākumu sadalījumu. 3.17. att.

redzamie rezultāti parāda katra scenārija atsevišķas vērtību amplitūdas. *WH* ietekmes svārstās no 411,5 S-Pt līdz 454,5 S-Pt, kamēr *OFC* ir ar plašāku amplitūdu – no 678,1 S-Pt līdz 753,3 S-Pt. Būtiski, ka nav pārkļāšanās starp abiem scenārijiem, kas apstiprina konsekventu tendenci – *WH* scenārijam ir zemāka sociālā ietekme.



3.16. att. *WH* un *OFC* scenāriju salīdzinošie rezultāti.

Šie rezultāti apstiprina secinājumu, ka, balstoties uz pašreizējiem pieņēmumiem un datu struktūru, *OFC* scenārijs nesniedz sociālās ilgtspējas priekšrocības salīdzinājumā ar *WH*. Tas uzsvēr nepieciešamību dot priekšroku praksēm, kas balstītas uz *WH*, vienlaikus izstrādājot stratēģijas, lai mazinātu sociālos riskus, kas raksturīgi *OFC* sistēmām.



3.17. att. *WH* un *OFC* scenāriju Monte Karlo simulācijas rezultāti. Sarkanā diagramma attēlo *OFC* scenāriju, savukārt zilā – *WH* scenāriju.

RSA pieejas rezultāti

RSA pieeja nodrošina mērķtiecīgāku sociālās LCA izvērtējumu, iekļaujot ieinteresēto pušu viedokļus, kas iegūti, izmantojot astoņu ekspertu grupai izsūtītās anketas. Šīs anketas tika izstrādātas, lai novērtētu sociālos riskus, kas saistīti gan ar iegūšanas posmiem (t. i., makroaļģu

ievākšanu un audzēšanu), gan ar pārstrādes procesiem, saskaņā ar ieinteresēto pušu grupām un sociālajiem rādītājiem, kas identificēti 2.8. tabulā.

- Ievākšanas un audzēšanas sociālo risku rezultāti.

Ievākšanas un audzēšanas fāzes rezultāti ir apkopoti 3.6. tabulā. Analīze norāda uz būtiskiem riskiem vairākās jomās, īpaši attiecībā uz darbinieku veselību un drošību, kam piešķirts vidējais vērtējums $-0,43$. Šis negatīvais rādītājs liecina par mērenu sociālā riska līmeni, norādot, ka darbinieku labklājība nav pietiekami nodrošināta un tai nekavējoties jāpievērš uzmanība. Savukārt ekonomiskā attīstība vietējās kopienās tika atzīta par stipro pusi, sasniedzot nemainīgi augstu vērtējumu $2,00$. Šis ļoti zema riska rādītājs atspoguļo ekspertu vienprātību par makroaļģu ievākšanas pozitīvo ekonomisko pienesumu reģionam. Citi aspekti uzrāda mērenas bažas. Darba stundu indikators saņēma vidējo vērtējumu $0,14$, kas norāda uz neatbilstībām, kuras varētu prasīt politisko regulējumu. Tāpat arī droši un veselīgi dzīves apstākļi vietējām kopienām tika novērtēti ar $0,00$, kas liecina par augstu mainību dažādos kontekstos – daļa kopienu gūst labumu, kamēr citas saskaras ar nelabvēlīgiem apstākļiem, kas jānovērš. Patērētāju veselība un drošība tika novērtēta ar vidēji pozitīvu vērtību $0,75$, kas norāda uz vispārēji zemu risku, bet norāda arī uz uzlabojumu iespējām. Caurspīdīgums sasniedza $0,67$, kas norāda uz zemu līdz mērenu risku, taču atsevišķas negatīvas atbildes liek domāt, ka komunikācija un informācijas apmaiņa būtu jāstiprina. Vērtību ķēdes pārstāvju grupa uzrādīja visvairāk neatbildēto jautājumu, kas norāda uz ekspertīzes trūkumu, kas varētu ierobežot pilnvērtīgu novērtējumu. Godīga konkurence tika novērtēta ar $0,67$, liecinot par zemu vispārējo risku, taču atsevišķas augsta riska atbildes liecina par nepieciešamību risināt tirgus pieejamības un taisnīguma problēmas. Visbeidzot, sociālās atbildības veicināšana un bagātības sadale saņēma $0,33$, kas norāda uz mēreniem riskiem un uzsver vajadzību stiprināt ētiskās prakses un uzlabot ekonomisko vienlīdzību vērtību ķēdē.

3.6. tabula

Sociālo risku analīze, kas saistīta ar makroaļģu ievākšanas un audzēšanas darbībām

Rādītāji	n.1	n.2	n.3	n.4	n.5	n.6	n.7	n.8	Vidējais
<i>Darbinieki</i>									
Veselība un drošība	0	2	-2	2	1	-2	-2	-2	-0,43
Darba stundas	0	2	2	2	-1	-2	-1	-1	0,14
Sociālie pabalsti / sociālā drošība	0	2	1	2	0	0	2	0	1,75
<i>Vietējā kopiena</i>									
Droši un veselīgi dzīves apstākļi	0	2	-1	2	-2	-2	-1	2	0,00
Vietējās ekonomikas attīstība	2	2	2	2	2	2	2	2	2,00
<i>Patērētāji</i>									
Veselība un drošība	0	0	-1	2	0	1	0	1	0,75
Caurspīdīgums	0	1	2	2	-1	-2	0	2	0,67
<i>Vērtību ķēde</i>									
Godīga konkurence	0	0	-1	2	0	0	1	0	0,67
Sociālās atbildības veicināšana	0	1	-1	1	0	0	0	0	0,33
Labklājības sadale	0	-1	1	1	0	0	0	0	0,33

- Makroaļģu pārstrādes sociālais risks

3.7. tabulā ir sniegti rezultāti par aļģu pārstrādes posmu, izceļot galvenos sociālos rādītājus dažādās ieinteresēto personu kategorijās. Darbinieku kategorijā indikators "Veselība un drošība" saņēma vidējo vērtējumu 0,14, kas norāda uz mērenu riska līmeni. Lai gan dažos aspektos tiek novēroti apmierinoši apstākļi, pastāv bažas, kurām nepieciešami mērķtiecīgi pasākumi darbinieku labklājības uzlabošanai. Šis vērtējums ir augstāks nekā makroaļģu ievākšanas posmā, kas liecina, ka pārstrādes posms rada salīdzinoši mazāku profesionālo apdraudējumu. Indikators "Darba stundas" saņēma vidējo vērtējumu 0,29, kas arī atspoguļo mērenus riskus un liek domāt par nepieciešamību standartizēt darba laika organizēšanas praksi nozarē. Savukārt "Sociālie pabalsti / sociālā aizsardzība" ieguva augstu vidējo vērtējumu 1,75, norādot uz zemu risku un liecinot, ka darbiniekiem parasti ir uzticama piekļuve sociālās aizsardzības sistēmām un labklājības atbalstam. Vietējās kopienas kategorijā indikators "Droši un veselīgi dzīves apstākļi" sasniedza vidējo vērtējumu 0,83, kas liecina par zemu riska līmeni un kopumā pieņemamiem dzīves apstākļiem teritorijās, kas atrodas pie pārstrādes objektiem. Tomēr neliela mainība norāda uz to, ka atsevišķās situācijās vēl nepieciešami uzlabojumi. Indikators "Vietējās ekonomikas attīstība" atkārtoti ieguva augstu vērtējumu 2,00, kas atspoguļo ļoti zemu risku un uzsver makroaļģu pārstrādes nozares pozitīvo ekonomisko devumu vietējām kopienām. Patērētāju kategorijā indikators "Veselība un drošība" saņēma pozitīvu vidējo vērtējumu 0,75, kas apliecina zemu risku šajā jomā. Tomēr vismaz viens negatīvs novērtējums norāda uz nepieciešamību turpināt centienus augstāku drošības standartu nodrošināšanā. Indikators "Caurspīdīgums" ar vidējo vērtējumu 0,20 liecina par mērenu risku. Negatīvā atgriezeniskā saite šajā kategorijā norāda, ka informācijas caurspīdīguma mehānismi būtu jāuzlabo, lai veicinātu lielāku patērētāju uzticēšanos un atbildību nozares ietvaros. Vērtību ķēdes kategorijā indikators "Godīga konkurence" saņēma pozitīvu vērtējumu 2,00, kas norāda uz labi funkcionējošu un taisnīgu konkurences vidi ar minimālu risku. Savukārt "Sociālās atbildības veicināšana" ieguva vērtējumu 0,00, kas nozīmē neitrālu riska līmeni. Lai gan pastāv atsevišķas iniciatīvas, tās nav plaši izplatītas, un tas liecina par iespējām tālākai attīstībai. Indikators "Līdzekļu sadales taisnīgums" saņēma negatīvu vidējo vērtējumu -0,67, kas liecina par mērenu līdz augstu riska līmeni. Šis rezultāts norāda uz pastāvīgām ekonomiskām nevienlīdzībām un akcentē nepieciešamību pēc mērķtiecīgām stratēģijām ekonomisko ieguvumu taisnīgākai sadalei visā vērtību ķēdē.

3.7. tabula

Sociālā riska analīze makroaļģu pārstrādes darbībām

Rādītāji	n.1	n.2	n.3	n.4	n.5	n.6	n.7	n.8	Vidējais
<i>Darbinieki</i>									
Veselība un drošība	0	2	-1	2	1	-1	-1	-1	0,14
Darba stundas	0	2	-1	2	-1	-1	-1	2	0,29
Sociālie pabalsti/sociālā drošība	0	2	1	2	0	0	2	0	1,75
<i>Vietējā kopiena</i>									
Droši un veselīgi dzīves apstākļi	0	2	-1	2	0	-1	2	1	0,83
Vietējās ekonomikas attīstība	2	2	2	2	2	2	2	2	2,00
<i>Patērētāji</i>									
Veselība un drošība	0	0	-1	2	0	1	0	1	0,75

Rādītāji	n.1	n.2	n.3	n.4	n.5	n.6	n.7	n.8	Vidējais
Caurspīdīgums	0	1	-2	2	0	-2	0	2	0,20
<i>Vērtību ķēde</i>									
Godīga konkurence	0	0	0	2	0	0	2	0	2,00
Sociālās atbildības veicināšana	0	1	-2	1	0	0	0	0	0,00
Labklājības sadale	0	-1	-2	1	0	0	0	0	-0,67

- Svarīgākās atziņas no sociālās aptaujas

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, eksperti konsekventi nenorādīja uz sociālu risku rādītājam “vietējās ekonomikas attīstība”, piešķirot tam novērtējumu +2 gan ievākšanas un audzēšanas, gan pārstrādes posmos. Šis pozitīvais rezultāts tiek skaidrots ar vietējās infrastruktūras uzlabojumiem, piemēram, pakalpojumu paplašināšanu, kas atbalsta makroaļģu nozari, kā arī ar potenciālu piesaistīt tūrisma interesi. Nodrošinot darba vietas, makroaļģu sektors var veicināt vietējo ekonomiku arī ārpus sezonālītātes periodiem. Īpaši attālos un nelielos reģionos, piemēram, salās, darbs šajā nozarē var būt viens no retajiem pieejamiem ienākumu avotiem, tādējādi būtiski ietekmējot vietējo labklājību. Līdzīga tendence tika novērota arī rādītājam “sociālie pabalsti / sociālā drošība”, kas ieguva vidējo novērtējumu +1,75. Tomēr uz šo indikatoru atbildēja tikai 50 % ekspertu, kas rada zināmu nenoteiktību. Ievākšanas sezonālitate var radīt sociālas aizsardzības atšķirības, jo sezonas darbiniekiem var nebūt pieejami tādi paši pabalsti kā pastāvīgajiem, kas var novest pie nevienlīdzības darbinieku tiesībās. Attiecībā uz “godīgas konkurences” indikatoru tika uzskatīts, ka pārstrādes posms nav pakļauts sociālajam riskam, savukārt zems risks tika identificēts biomasas sagataves fāzē. Vidējs risks tika novērots divos būtiskos aspektos: darbinieku veselībā un drošībā ievākšanas un audzēšanas laikā (-0,43) un bagātības sadalē pārstrādes fāzē (-0,67). Profesionālie riski ievākšanas laikā galvenokārt rodas darbā jūrā, kur nepastāvīgi laikapstākļi un tehnikas bojājumi var būt bīstami. Turklāt šis darbs ir intensīvs un īslaicīgs, kas palielina traumu risku. Tāpat fiziski smags darbs rada bažas par ilgtermiņa veselības sekām, īpaši balsta un kustību sistēmas traucējumiem. Elektrisko iekārtu ieviešana, piemēram, elektriskie krāvēji, var mazināt šos riskus, samazinot nepieciešamību pēc manuāla darba. Pārstrādes posmā riski ir saistīti ar griešanas un malšanas iekārtām, kas prasa īpašu apmācību un drošības protokolus. Tāpat makroaļģu apstrādē izmantotās ķīmiskās vielas prasa stingru aizsardzību un individuālos aizsardzības līdzekļus. Runājot par bagātības sadales indikatoru, secināts, ka ekonomiskie ieguvumi varētu netikt taisnīgi sadalīti starp vērtību ķēdes dalībniekiem, uzsverot nepieciešamību uzlabot ekonomisko taisnīgumu nozarē. Drošu un veselīgu dzīves apstākļu rādītāja ietvaros tika secināts, ka makroaļģu darbības rada zemāku risku nekā tradicionālās akvakultūras (piemēram, zivju vai mīdiju audzēšana), kas var novest pie barības vielu uzkrāšanās, ekosistēmas bojājumiem un bojājumiem vētru laikā. Tomēr intensīva ievākšana, izmantojot ar dīzeļdegvielu darbināmas laivas, var radīt vides riskus, tostarp naftas un policiklisko aromātisko oglekļa savienību emisijas, kas var nelabvēlīgi ietekmēt jūras ekosistēmas un piekrastes kopienas. Tāpat pretapaugšanas pārklājumu izmantošana var izraisīt kaitīgu vielu noplūdi, nodarot ilgtermiņa kaitējumu bioloģiskajai daudzveidībai. Attiecībā uz caurspīdīguma rādītāju respondenti izteica bažas par potenciāli maldinošiem vai nepārbaudītiem apgalvojumiem par makroaļģu vides priekšrocībām, kas tiek izmantoti mārketingā bez

zinātniska pamatojuma. Lai samazinātu šo risku, ieteicams publiski pieejami analizēt un atspoguļot makroaļģu sastāvu un īpašības, tādējādi veicinot pārskatāmu un zinātnē balstītu komunikāciju. Viens no galvenajiem izaicinājumiem šajā *S-LCA* bija datu vākšana – bieži sastopama problēma šāda veida novērtējumos. Starptautiskās datubāzes, piemēram, *SHDB* un *PSILCA*, vēl nevar pilnībā atspoguļot maza mēroga darbību sociālos aspektus, īpaši vietējās kopienās. Lai pārvarētu šo trūkumu, ieviesta ieinteresēto pušu iesaistes stratēģija, izmantojot ekspertu aptaujas. Neskatoties uz plašu izsūtīšanu, tikai astoņi no vairāk nekā 20 ekspertiem atbildēja. Lai arī šis skaits ir neliels, iegūtās atbildes sniedza vērtīgas atziņas un iezīmēja pirmo soli virzībā uz makroaļģu nozares sociālās ilgtspējas izpratnes uzlabošanu. Būtisks trūkums bija datu trūkums par “citiem vērtību ķēdes dalībniekiem”. Lielais nenoskaidroto atbilžu īpatsvars šai grupai uzsver nepieciešamību pievērst lielāku uzmanību šim aspektam turpmākajos pētījumos. Tāpat jāattīsta izpratne par tādiem indikatoriem kā godīga konkurence, sociālās atbildības veicināšana un bagātības sadale. Pilnīgākas un aktīvākas ekspertu iesaistes veicināšana būs būtiska, lai uzlabotu šīs nozares sociālās ilgtspējas novērtējumu kvalitāti un precizitāti.

3.4. Gala ilgtspējas indekss

***TOPSIS* rezultāti**

Lai nodrošinātu ilgtspējas novērtējuma konsekveni, *TOPSIS* pieejas pirmajā solī katrs izvēlētais indikators trīs ilgtspējas dimensijās – vides, ekonomiskajā un sociālajā – tika klasificēts atbilstoši tam, vai tas jāmaksimizē vai jāminimizē, ņemot vērā ideālo ilgtspējas scenāriju. Šī klasifikācija ir būtiska, lai nodrošinātu vienotu un sistemātisku ilgtspējas veiktspējas novērtējumu visos kritērijos. Klasifikācijas process, kā arī sākotnēji katram kritērijam piešķirtie svāri ir detalizēti apkopoti 3.8. tabulā. Normalizācijas matrica standartizē katra ilgtspējas indikatora vērtības, nodrošinot to salīdzināmību, neraugoties uz atšķirīgām mērvienībām un skalām. Šis solis ir būtiska *TOPSIS* metodoloģijas sastāvdaļa, jo tas pārvērš sākotnējos datus dimensijām neatkarīgā formātā, ļaujot veikt konsekventu un objektīvu ilgtspējas veiktspējas novērtējumu starp trim analizētajiem biorafinērijas scenārijiem: *CB*, *SPE* un *TLE*. Normalizētās vērtības sniedz vienotu katra kritērija attēlojumu, nodrošinot, ka neviena indikators nesniedz nesamērīgu ietekmi uz kopējo vērtējumu. Pēc normalizācijas izveidota svērtā normalizācijas matrica, kas integrē katra kritērija relatīvo nozīmīgumu. Turpinājumā aprēķināti Eiklīda attālumi līdz ideālajiem un pretideālajiem risinājumiem, ļaujot identificēt ilgtspējīgāko biorafinērijas konfigurāciju starp vērtētajām alternatīvām.

Indikatori un lēmumu kritēriji. MIN un MAX norāda, vai attiecīgais indikators salīdzinājumā ar ideālo scenāriju ir minimizējams vai maksimizējams

Dimensija	Rādītājs	Vienība	Tips	MIN/MAX	Svari
Vides	Globālās sasilšanas potenciāls	kg CO ₂ eq.	Kvantitatīvs	MIN	0,083
	Sīko cieto daļiņu veidošanās	kg PM _{2.5}	Kvantitatīvs	MIN	0,083
	Cilvēku kancerogēnā un nekancerogēnā toksicitāte	kg 1.4-DCB	Kvantitatīvs	MIN	0,083
	Ūdens patēriņš	m ³	Kvantitatīvs	MIN	0,083
Ekonomiskā	ROI	%	Kvantitatīvs	MAX	0,083
	NPV	EUR	Kvantitatīvs	MAX	0,083
	IRR	%	Kvantitatīvs	MAX	0,083
	PI	-	Kvantitatīvs	MAX	0,083
Sociālā	Darbinieka veselība un drošība	-	Daļēji kvantitatīvs	MAX	0,083
	Darba stundas	-	Daļēji kvantitatīvs	MAX	0,083
	Vietējās ekonomikas attīstība	-	Daļēji kvantitatīvs	MAX	0,083
	Labklājības sadale	-	Daļēji kvantitatīvs	MAX	0,083

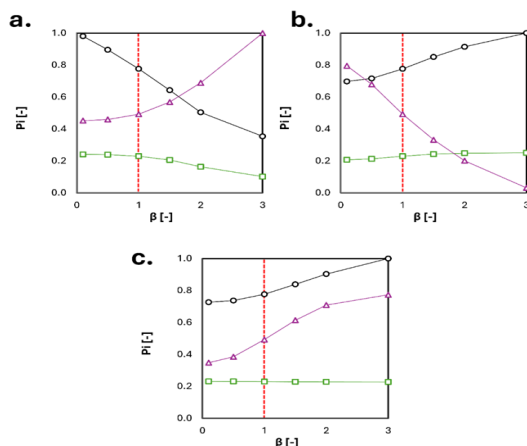
3.8. att. vizualizēti rezultāti, demonstrējot *CB*, *SPE* un *TLE* salīdzinošo ilgtspējas veiktspēju. No izvērtētajām biorafinēšanas konfigurācijām *CB* dizains izrādījās visilgtspējīgākais risinājums, sasniedzot tuvuma koeficientu (P_i) 0,776. Šī vērtība to pozicionē vistuvāk ideālajam ilgtspējas scenārijam ($P_i = 1$), atspoguļojot sabalansētu sniegumu vides, ekonomiskajos un sociālajos aspektos. *TLE* dizains sekoja ar P_i vērtību 0,492, norādot uz mērenu ilgtspējas profilu. Savukārt *SPE* konfigurācijai iegūta viszemākā P_i vērtība (0,229), kas uzsver tās ierobežojumus, sasniedzot visaptverošu ilgtspējas rezultātu, un apliecina mono-produkta valorizācijas stratēģiju radītos izaicinājumus.



3.8. att. *LCSA* rezultāti, izmantojot *TOPSIS* pieeju. Zilā līnija attēlo ideālā scenārija etalonu.

Jutīguma analīze

Lai uzlabotu analīzes noturību, veikta jutīguma novērtēšana, sistemātiski mainot svaru, kas piešķirts katram no trim ilgtspējas pīlāriem: vides, ekonomiskajam un sociālajam. Šis novērtējums bija vērsts uz to, lai noteiktu, cik lielā mērā svaru sadalījuma izmaiņas ietekmē biorafinēšanas konfigurāciju klasifikāciju. Šīs analīzes rezultāti ir parādīti 3.9. att.



3.9. att. Jutīguma analīzes rezultāti svaru sadalei (a) vides, (b) ekonomiskajiem un (c) sociālajiem kritērijiem. Tuvuma koeficients (P_i) kā funkcija no variācijas attiecības (β). Melnā līnija attēlo CB, violetā – SPE, zaļā – TLE. Sarkani punktētā līnija norāda LCSA rezultātus pirms jutīguma analīzes.

CB konfigurācija konsekventi tika novērtēta kā visilgtspējīgākā iespēja, ieņemot pirmo vietu 80 % no 15 simulētajiem scenārijiem. Rezultāti norāda, ka vides dimensijai ir būtiska ietekme uz gala klasifikāciju. Divos gadījumos, kad vides ilgtspēja tika piešķirta visaugstākā nozīme, TLE konfigurācija apsteidza CB, kas uzsvēr nepieciešamību nākotnē optimizēt *F. lumbricalis* biorafinēšanas procesus, īpašu uzmanību pievēršot vides aspektiem. Ekonomiskajā dimensijā CB demonstrēja pārkumu, pateicoties spējai ražot vairākus augstas pievienotās vērtības produktus, kas uzlabo tirgus noturību un kopējo rentabilitāti. Pretēji tam TLE saskārās ar ierobežojumiem, kas saistīti ar sākotnējo biomasas fraccionēšanu, kas samazina produktu iznākumu un vājina ekonomisko dzīvotspēju. Tajos simulācijas gadījumos, kuros ekonomiskā veiktspēja tika uzskatīta par prioritāti, TLE tika klasificēts zemāk par SPE sistēmu, vēl vairāk apliecinot tā finansiālos trūkumus. Sociālās ilgtspējas aspektā klasifikācijas apgrīezieni netika novēroti. Šo stabilitāti, iespējams, nosaka ievades vērtību semikvantitatīvais raksturs, kas ierobežo scenāriju diferencēšanas precizitāti attiecībā uz sociālo sniegumu.

3.10. tabula apkopo klasifikācijas varbūtību sadalījumu katram scenārijam, balstoties uz jutīguma analīzes simulāciju rezultātiem.

Dažādu dizaina pieeju klasifikācijas varbūtību sadalījums

Dizains	Varbūtības rangs		
	Labākais scenārijs	Vidējais scenārijs	Sliktākais scenārijs
<i>CB</i>	80 %	20 %	0 %
<i>SPE</i>	0 %	47 %	53 %
<i>TLE</i>	20 %	33 %	47 %

SECINĀJUMI UN IETEIKUMI

Secinājumi

Šajā promocijas darbā tika izstrādāts inovatīvs kaskādes biorafinēšanas (CB) koncepts sarkanajai makroaļģei *F. lumbricalis* Baltijas jūras reģionā, šo konceptu balstot visaptverošā dzīves cikla ilgtspējas novērtējumā (LCSA). Integrējot LCA, LCC un S-LCA pieejas, pētījumā sniegts daudzdimensionāls ilgtspējas izvērtējums trīs dažādām biorafinēšanas konfigurācijām: CB, SPE un TLE. Galvenie rezultāti apkopoti turpmāk.

- Zinātniskās literatūras pārskats.

Literatūras analīze parādīja, ka makroaļģu biorafinēšanas pētījumi joprojām galvenokārt tiek veikti laboratorijas mērogā, ar dominējošu fokusu uz brūnajām makroaļģēm. Sarkanās makroaļģes, tostarp *F. lumbricalis*, ir būtiski nepietiekami pārstāvētas, īpaši LCA un S-LCA pētījumos. Šis pētījums aizpilda nozīmīgu zināšanu trūkumu, piedāvājot visaptverošu analīzi par sarkano makroaļģu valorizācijas iespējām.

- Kaskādes biorafinēšanas tehnoloģiskais risinājums.

Izstrādāts pilns CB modelis, kas integrē pigmentu, proteīnu un karagināna ieguvu. Sistēma maksimāli izmanto biomasu un ietver arī atlikušās biomasas dzīves cikla beigu apstrādi – mēslojuma vai biogāzes veidā. Salīdzinot ar tradicionālajām SPE un TLE sistēmām, CB uzrādīja ievērojami augstāku resursu efektivitāti un produkcijas iznākumu no fiksēta biomasas daudzuma.

- Procesa dizaina izšķirošā nozīme.

Salīdzinošais trīs pigmentu ekstrakcijas metožu – EAE, UAE un ūdens ekstrakcijas – novērtējums izcēla EAE kā visilgtspējīgāko metodi, pateicoties augstajam iegūšanas iznākumam, šķīdinātāju atkārtotai izmantošanai un līdzsvarotam vides un ekonomiskajam sniegumam. UAE metodi ierobežoja augsts enerģijas patēriņš, savukārt ūdens ekstrakcijai bija zema efektivitāte, kas noveda pie vājiem rezultātiem. Šie rezultāti uzsver nepieciešamību nākotnes biorafinēšanas procesu izstrādē optimizēt gan iznākumu, gan enerģijas patēriņu.

- Vides analīze ieguves procesiem.

Salīdzinātas trīs makroaļģu ieguves stratēģijas: WH, ONC un OFC. ONC radīja vislielāko vides slogu (56,21 mPt), tai sekoja OFC (22,76 mPt) un WH (11,10 mPt). Alternatīvie scenāriji uzrādīja ievērojamu potenciālu ietekmes mazināšanai, piemēram, ONC gadījumā pāreja no LED apgaismojuma uz dabisko saules gaismu samazināja ietekmi par 78,25 %, bet WH gadījumā pretapaugšanas līdzekļa nomaiņa nodrošināja 28,02 % samazinājumu, samazinot kopējo ietekmi līdz 7,99 mPt.

- Vides analīze visai biorafinēšanas sistēmai.

LCA analīzē, pieņemot funkcionālo vienību FU1 (1 tonna DW biomasas), CB kopējais vides slogs bija 140,08 Pt (ar mēslojuma izmantošanu) un 153,22 Pt (ar biogāzes ražošanu). Vislielākā ietekme novērota karagināna ieguves posmā, galvenokārt augstā enerģijas patēriņa dēļ. Atlikušās biomasas izmantošana kā mēslojums nodrošināja pozitīvu ietekmi, samazinot slogu par –8,82 Pt. Pie funkcionālās vienības FU2 (balstoties uz produkcijas iznākumu) TLE uzrādīja zemāko ietekmi (78,39 Pt), tomēr ar ievērojami mazāku produkcijas daudzumu. CB joprojām saglabāja visefektīvāko modeli biomasas valorizācijas aspektā.

- Ekonomiskā ilgtspēja.

CB izcēlās kā ekonomiski visperspektīvākais risinājums, pateicoties spējai ražot vairākus augstas pievienotās vērtības produktus. Tomēr tā finanšu dzīvotspēja ir ļoti atkarīga no tirgus apstākļiem, īpaši pigmentu cenām. *CB* modelim ir arī visaugstākās darbības un kapitāla izmaksas, kas norāda uz nepieciešamību pēc procesa optimizācijas un iespējamiem atbalsta mehānismiem. *SPE* un *TLE* konfigurācijas lielākoties izrādījās ekonomiski dzīvotnespējīgas, ņemot vērā ierobežotu produkcijas iznākumu un zemu sistēmas efektivitāti.

- Sociālā analīze – *IPA* pieeja (ieguves posms).

S-LCA, izmantojot *IPA* metodi, atklāja, ka *WH* posms rada zemāku sociālo risku nekā *OFC*, īpaši tādās kategorijās kā darba tiesības, veselība un drošība, kā arī sabiedrības labklājība. Lai uzlabotu *OFC* sistēmu sociālo pieņemamību, būtiska nozīme būs tehnoloģiskajiem uzlabojumiem un pārvaldības kvalitātei. Analīze parādīja, ka sociālās ietekmes bieži izpaužas piegādes ķēdes attālākās valstīs, uzsverot dzīves cikla pieejas nozīmi sociālajā izvērtējumā.

- Sociālā analīze – *RSA* pieeja (pilna biorafinēšana).

RSA analīze parādīja pozitīvu ieguldījumu vietējās ekonomikas attīstībā un nodarbinātībā, īpaši mazās vai attālās kopienās. Tomēr joprojām pastāv riski, kas saistīti ar darba drošību un nevienlīdzīgu labumu sadali piegādes ķēdē. Ierobežotā ieinteresēto pušu iesaiste un nepietiekamā datu pieejamība, īpaši attiecībā uz vērtību ķēdes dalībniekiem, liecina par nepieciešamību nākotnes *S-LCA* pētījumos padziļināt sadarbību un paplašināt datu vākšanu.

- Ilgtspējas indekss.

Integrējot vides, ekonomiskos un sociālos rādītājus, izmantojot *TOPSIS* metodi, *CB* tika apstiprināts kā visilgtspējīgākā konfigurācija. *CB* sasniedza visaugstāko kopējo ilgtspējas rādītāju ($P_i = 0,776$), kam sekoja *TLE* ($P_i = 0,492$) un *SPE* ($P_i = 0,229$). Jutīguma analīzes apstiprināja *CB* pozīcijas stabilitāti, lai gan vides prioritizēšanas gadījumos dažkārt priekšroka tika dota *TLE* konfigurācijai.

Ieteikumi

- Pilotprojekti un mēroga paplašināšana.

Pāreja no teorētiska *CB* koncepta un laboratorijas līmeņa testēšanas uz industriālu mērogu ir būtisks nākamais solis. Pilotprojektiem jābūt vērstiem uz ekstrakcijas iznākumu validāciju, iekārtu darbības pārbaudi un sistēmas mērogojamību reālos darbības apstākļos. Šie projekti palīdzēs plānot loģistiku, pielāgot vietas specifiskos ekspluatācijas parametrus un noteikt darbaspēka vajadzības. Efektīva sadarbība starp akadēmisko vidi, tehnoloģiju izstrādātājiem un industrijas pārstāvjiem būs būtiska, lai veicinātu mēroga paplašināšanu un samazinātu investīciju riskus.

- Enerģijas optimizācija.

Gan *LCA*, gan *LCC* rezultāti norādīja, ka enerģijas patēriņš, īpaši žāvēšanas un sildīšanas procesos, ir galvenais vides un ekonomiskais riska punkts. Investīcijas energoefektīvās tehnoloģijās, piemēram, zemas temperatūras vai vakuuma žāvēšanas iekārtās, atkritumsiltuma atgūšanā un optimizētos siltummainos, var būtiski samazināt ietekmi. Tāpat ieteicams integrēt atjaunojamos energoresursus, piemēram, saules fotoelementu sistēmas vai bioenerģiju, lai veicinātu dekarbonizāciju un uzlabotu sistēmas ilgtspēju.

- Tirgus stratēģijas izstrāde.

Ekonomiskā ilgtspēja lielā mērā ir atkarīga no spējas piekļūt augstas pievienotās vērtības tirgiem un tos attīstīt. Lai iekļūtu pārtikas, kosmētikas, farmācijas un lauksaimniecības sektoros, būtiska ir produkta kvalitātes, drošības un normatīvās atbilstības uzlabošana. Produktu portfeļa paplašināšana (piemēram, uztura bagātinātāji, biostimulatori vai bioloģiski noārdāmi materiāli) var samazināt tirgus risku un palielināt noturību. Standartu, marķēšanas sistēmu un trešo pušu sertifikācijas līdzizstrāde stiprinās patērētāju uzticību un atvieglos plašāku tirgus ieviešanu.

- Uzlaboti dati *S-LCA* veikšanai.

Pašlaik makroaļģu nozarē trūkst kvalitatīvu, lokalizētu sociālo datu, kas ierobežo *S-LCA* precizitāti. Turpmākajos pētījumos jāfokusējas uz vietnes specifisku, sabiedrības līmeņa un dzimumsensitīvu datu apkopošanu, lai uzlabotu sociālo ietekmju novērtējuma precizitāti un reprezentativitāti. Lielāka ieinteresēto pušu iesaiste – interviju, līdzdalības darbnīcu un pilsoniskās zinātnes iniciatīvu veidā – uzlabos gan datu kvalitāti, gan ilgtspējas plānošanas iekļautību.

- Politikas atbalsts un stimuli.

Atbalstoši politikas regulējumi ir būtiski, lai veicinātu investīcijas un paātrinātu attīstību makroaļģu biorafinēšanas nozarē. Publiskās institūcijas būtu aicināmas ieviest mērķtiecīgus finansēšanas instrumentus, nodokļu atvieglojumus un vienkāršotas atļauju procedūras makroaļģu tehnoloģijām. Skaidri normatīvie noteikumi jauniem makroaļģu produktiem (piemēram, pārtikas vai farmaceitiskiem lietojumiem) samazinās nenoteiktību un stimulēs privātā sektora iesaisti.

- Izstrādātās sistēmas pārnesamība uz citām makroaļģēm.

Šajā darbā izveidotā *LCSA* metodoloģiskā sistēma ir veidota kā atkārtojama un pielāgojama. Nākotnē būtu jāvērtē tās piemērojamība citiem makroaļģu veidiem, biomasas sastāviem, audzēšanas sistēmām un ģeogrāfiskajiem apstākļiem. Salīdzinoši novērtējumi ļaus noteikt labās prakses piemērus un izstrādāt reģionāli pielāgotus biorafinēšanas modeļus plašākai ieviešanai zilajā bioekonomikā.

- Integrācija ar citiem aprites ekonomikas sektoriem.

Ilgspējas veiktspēju iespējams uzlabot, integrējoties ar blakus esošiem aprites ekonomikas sektoriem, piemēram, akvakultūru, lauksaimniecību vai notekūdeņu attīrīšanu. Piemēram, biorafinēšanas objektu izvietošana līdzās akvakultūras iekārtām var ļaut pārstrādāt barības vielas, kopīgi izmantot enerģiju vai valorizēt blakusproduktus, tādējādi samazinot izmaksas un vides slogu. Šāda starpsektoru integrācija atbilst aprites ekonomikas principiem un var stiprināt uzņēmējdarbības modeļus.

- Personāla attīstība un izglītība.

Makroaļģu nozarei ir nepieciešams kvalificēts darbaspēks, lai atbalstītu izaugsmi un inovācijas. Investīcijas profesionālās izglītības programmās, starpdisciplinārās apmācībās un zināšanu apmaiņas platformās būs būtiskas, lai attīstītu cilvēkresursus un tehnisko kompetenci. Izglītojošie pasākumi veicinās arī plašāku informētību un ieinteresēto pušu iesaisti visā vērtību ķēdē.

- Salīdzinošā analīze ar tradicionālajām biorafinēšanas sistēmām.

Lai nostiprinātu šī pētījuma rezultātus, turpmākajos darbos būtu jāiekļauj salīdzinošās analīzes starp jūraszāļu un tradicionālajām kultūraugu biorafinēšanas sistēmām. Šādas salīdzināšanas palīdzēs pamatot makroaļģu ilgtspējas priekšrocības un pozicionēt tās kā konkurētspējīgu izejvielu plašākā bioekonomikas ietvarā.

- Būtisks noslēguma apsvērums – tirgus pieprasījuma nozīme.

Viens no būtiskākajiem šī pētījuma ieteikumiem ir nepieciešamība pēc visaptverošas *CB* produktu tirgus pieprasījuma analīzes. Lai arī darbs apstiprina *CB* modeļa tehnisko realizējamību un ilgtspējas potenciālu, tā praktiskā ieviešana būs atkarīga no stabila un pietiekama tirgus pieprasījuma. Bez dzīvotspējīga tirgus pat efektīvākā un ilgtspējīgākā biorafinēšanas sistēma nevarēs nodrošināt ekonomisko un sociālo panākumu. Šī iemesla dēļ nākotnes pētījumiem būtu jāpāriet no teorētiskiem modeļiem uz lietišķiem tirgus pētījumiem, tostarp pieprasījuma prognozēšanu, ieinteresēto pušu iesaisti un politikas scenāriju analīzi, lai novērtētu *CB* sistēmas reālo nepieciešamību, mērogojamību un konkurētspēju.

ATSAUCES

- [1] S. Parsons, M. J. Allen, F. Abeln, M. McManus, and C. J. Chuck, "Sustainability and life cycle assessment (LCA) of macroalgae-derived single cell oils," *J Clean Prod*, vol. 232, pp. 1272–1281, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.315.
- [2] Y. Mao, H. Yang, Y. Zhou, N. Ye, and J. Fang, "Potential of the seaweed *Gracilaria lemaneiformis* for integrated multi-trophic aquaculture with scallop *Chlamys farreri* in North China," *J Appl Phycol*, vol. 21, no. 6, pp. 649–656, Nov. 2009, doi: 10.1007/s10811-008-9398-1.
- [3] R. Araújo *et al.*, "Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy," *Front Mar Sci*, vol. 7, Jan. 2021, doi: 10.3389/fmars.2020.626389.
- [4] DCNA, "Importance of Seagrass and Macroalgae in the Protection of Coastlines," Nov. 01, 2020.
- [5] D. Krause-Jensen and C. M. Duarte, "Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration," *Nature Geoscience* 2016 9:10, vol. 9, no. 10, pp. 737–742, Sep. 2016, doi: 10.1038/ngeo2790.
- [6] M. D. Torres, S. Kraan, and H. Domínguez, "Seaweed biorefinery," Jun. 01, 2019, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s11157-019-09496-y.
- [7] L. Ge, P. Wang, and H. Mou, "Study on saccharification techniques of seaweed wastes for the transformation of ethanol," *Renew Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 84–89, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.RENENE.2010.06.001.
- [8] "The European Green Deal - European Commission." Accessed: Apr. 02, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [9] "Communication from the Commission: Towards a strong and sustainable EU algae sector - European Commission." Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: https://oceans-and-fisheries.ec.europa.eu/publications/communication-commission-towards-strong-and-sustainable-eu-algae-sector_en
- [10] "EU4Algae – European Commission." Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: https://maritime-forum.ec.europa.eu/theme/blue-economy-and-fisheries/blue-economy/eu4algae_en
- [11] M. Barbier, B. Charrier, R. Araujo, S. L. Holdt, B. Jacquemin, and C. Rebours, "PHYCOMORPH EUROPEAN GUIDELINES FOR A SUSTAINABLE AQUACULTURE OF SEaweEDS KEY FACTS PEGASUS".
- [12] K. Spilling, *Biofuels from Algae Methods and Protocols Methods in Molecular Biology*, Humana Press. Helsinki, 1980. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/7651>
- [13] E. T. Kostas, J. M. M. Adams, H. A. Ruiz, G. Durán-Jiménez, and G. J. Lye, "Macroalgal biorefinery concepts for the circular bioeconomy: A review on biotechnological developments and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111553.
- [14] Y. Li *et al.*, "Optimization study on the hydrogen peroxide pretreatment and production of bioethanol from seaweed *Ulva prolifera* biomass," *Bioresour Technol*, vol. 214, pp. 144–149, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2016.04.090.
- [15] J. B. Guinée, G. Huppes, and R. Heijungs, "Developing an LCA guide for decision support," *Environmental Management and Health*, vol. 12, no. 3, pp. 301–311, Aug. 2001, doi: 10.1108/09566160110392416.
- [16] J. B. Guinée, "Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards," *J LCA*, vol. 5, pp. 311–313, 2002.
- [17] M. Bučas, D. Daunys, and S. Olenin, "Recent distribution and stock assessment of the red alga *Furcellaria lumbricalis* on an exposed Baltic Sea coast: Combined use of field survey and modeling methods," *Oceanologia*, vol. 51, no. 3, pp. 341–359, 2009, doi: 10.5697/OC.51-3.359.
- [18] Blue BIO COFUND, "Total Value Chain Optimization of seaweeds *Furcellaria lumbricalis*, A bioeconomical ALGAE demonstration."
- [19] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, and D. G. Altman, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement," *BMJ*, vol. 339, no. 7716, pp. 332–336, Jul. 2009, doi: 10.1136/BMJ.B2535.
- [20] Maciej Serda *et al.*, "IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries: Co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass: IEA Bioenergy Task 42 – Countries Report," *Uniwersytet śląski*, vol. 7, no. 1, pp. 343–354, 2010, doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.
- [21] F. Cherubini, "The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals," *Energy Convers Manag*, vol. 51, no. 7, pp. 1412–1421, Jul. 2010, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2010.01.015.
- [22] A. Golberg, A. Liberzon, E. Vitkin, and Z. Yakhini, "Design and Analysis of Offshore Macroalgae Biorefineries," in *Biofuels From Algae Methods and Protocols*, 1st ed., 2018, pp. 9–33. doi: 10.1007/7651_2018_127.

- [23] F. Fernand, A. Israel, J. Skjermo, T. Wichard, K. R. Timmermans, and A. Golberg, "Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 35–45, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.10.046.
- [24] M. Segheta, X. Hou, S. Bastianoni, A. B. Bjerre, and M. Thomsen, "Life cycle assessment of macroalgal biorefinery for the production of ethanol, proteins and fertilizers – A step towards a regenerative bioeconomy," *J Clean Prod*, vol. 137, pp. 1158–1169, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.195.
- [25] L. Watson and M. Dring, "Business Plan for the Establishment of a Seaweed Hatchery and Grow-out Farm," 2011.
- [26] M. Mac Monagail and L. Morrison, "The seaweed resources of Ireland: a twenty-first century perspective," *J Appl Phycol*, vol. 32, no. 2, pp. 1287–1300, Apr. 2020, doi: 10.1007/S10811-020-02067-7/FIGURES/3.
- [27] M. Teresa, C. Gómez, and A. Lähdenmäki-Uutela, "European and National Regulations on Seaweed Cultivation and Harvesting," Helsinki, 2021.
- [28] D. Brockmann, C. Pradinaud, J. Champenois, M. Benoit, and A. Hélias, "Environmental assessment of bioethanol from onshore grown green seaweed," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 9, no. 6, pp. 696–708, Nov. 2015, doi: 10.1002/bbb.1577.
- [29] M. Zollmann, B. Rubinsky, A. Liberzon, and A. Golberg, "Multi-scale modeling of intensive macroalgae cultivation and marine nitrogen sequestration," *Communications Biology* 2021 4:1, vol. 4, no. 1, pp. 1–11, Jul. 2021, doi: 10.1038/s42003-021-02371-z.
- [30] J. Langlois, J. F. Sassi, G. Jard, J. P. Steyer, J. P. Delgenes, and A. Hélias, "Life cycle assessment of biomethane from offshore-cultivated seaweed," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 6, no. 4, pp. 387–404, Jul. 2012, doi: 10.1002/BBB.1330.
- [31] R. P. John, G. S. Anisha, K. M. Nampoothiri, and A. Pandey, "Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol," *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 1, pp. 186–193, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2010.06.139.
- [32] M. H. Huesemann, L. J. Kuo, L. Urquhart, G. A. Gill, and G. Roesijadi, "Acetone-butanol fermentation of marine macroalgae," *Bioresour Technol*, vol. 108, pp. 305–309, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2011.12.148.
- [33] S. G. Wi, H. J. Kim, S. A. Mahadevan, D. J. Yang, and H. J. Bae, "The potential value of the seaweed Ceylon moss (*Gelidium amansii*) as an alternative bioenergy resource," *Bioresour Technol*, vol. 100, no. 24, pp. 6658–6660, Dec. 2009, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2009.07.017.
- [34] J. W. Van Hal, W. J. J. Huijgen, and A. M. López-Contreras, "Opportunities and challenges for seaweed in the biobased economy," *Trends Biotechnol*, vol. 32, no. 5, pp. 231–233, 2014, doi: 10.1016/j.tibtech.2014.02.007.
- [35] R. Peñalver, J. M. Lorenzo, G. Ros, R. Amarowicz, M. Pateiro, and G. Nieto, "Seaweeds as a Functional Ingredient for a Healthy Diet," *Marine Drugs* 2020, Vol. 18, Page 301, vol. 18, no. 6, p. 301, Jun. 2020, doi: 10.3390/MD18060301.
- [36] I. Michalak and K. Chojnacka, "Seaweeds As a Component of the Human Diet," *Algae Biomass: Characteristics and Applications*, pp. 57–71, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-74703-3_6.
- [37] C. B. Singh, K. A. M. Xavier, G. Deshmukhe, V. Gudipati, S. S. Shitole, and A. K. Balange, "Fortification of Extruded Product with Brown Seaweed (*Sargassum tenerrimum*) and Its Process Optimization by Response Surface Methodology," *Waste Biomass Valorization*, vol. 9, no. 5, pp. 755–764, May 2018, doi: 10.1007/S12649-017-9831-2.
- [38] R. Kumari, I. Kaur, and A. K. Bhatnagar, "Enhancing soil health and productivity of *Lycopersicon esculentum* Mill. using *Sargassum johnstonii* Setchell & Gardner as a soil conditioner and fertilizer," *J Appl Phycol*, vol. 4, no. 25, pp. 1225–1235, Aug. 2013, doi: 10.1007/S10811-012-9933-Y.
- [39] K. Prasad *et al.*, "Detection and quantification of some plant growth regulators in a seaweed-based foliar spray employing a mass spectrometric technique sans chromatographic separation," *J Agric Food Chem*, vol. 58, no. 8, pp. 4594–4601, Apr. 2010, doi: 10.1021/JF904500E.
- [40] G. Sarkar, N. Jatar, P. Goswami, R. Cyriac, K. Suthindhiran, and M. A. Jayasri, "Combination of different marine algal extracts as biostimulant and biofungicide," vol. 41, no. 9, pp. 1163–1171, May 2018, doi: 10.1080/01904167.2018.1434201.
- [41] R. Villares, E. Fernández-Lema, and M. E. López-Mosquera, "Evaluation of beach wrack for use as an organic fertilizer: Temporal survey in different areas," *Thalassas*, vol. 32, no. 1, pp. 19–36, May 2016, doi: 10.1007/S41208-015-0003-5.

- [42] J. B. Hall, W. W. Seay, and S. M. Baker, "Nutrition and Feeding of the Cow-Calf Herd: Essential Nutrients, Feed Classification and Nutrient Content of Feeds," *Virginia Cooperative Extension*, 2009, [Online]. Available: www.ext.vt.edu
- [43] I. Michalak *et al.*, "Effect of macroalgae enriched with microelements on egg quality parameters and mineral content of eggs, eggshell, blood, feathers and droppings," *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, vol. 95, no. 3, pp. 374–387, Jun. 2011, doi: 10.1111/J.1439-0396.2010.01065.X.
- [44] J. A. Aguilar-Briseño *et al.*, "Sulphated polysaccharides from *Ulva clathrata* and *Cladosiphon okamuranus* seaweeds both inhibit viral attachment/entry and cell-cell fusion, in NDV infection," *Mar Drugs*, vol. 13, no. 2, pp. 697–712, Feb. 2015, doi: 10.3390/MD13020697.
- [45] G. L. Yan, Y. M. Guo, J. M. Yuan, D. Liu, and B. K. Zhang, "Sodium alginate oligosaccharides from brown algae inhibit *Salmonella Enteritidis* colonization in broiler chickens," *Poult Sci*, vol. 90, no. 7, pp. 1441–1448, Jul. 2011, doi: 10.3382/PS.2011-01364.
- [46] B. Abbaspour, S. S. Davood, and A. Mohammadi-Sangcheshmeh, "Dietary supplementation of *Gracilariopsis persica* is associated with some quality related sera and egg yolk parameters in laying quails," *J Sci Food Agric*, vol. 95, no. 3, pp. 643–648, Feb. 2015, doi: 10.1002/JSSFA.6844.
- [47] Md. M. Islam *et al.*, "Effect of fermented seaweed by-product supplementation on reproduction of Hanwoo cows and growth and immunity of their calves," *Anim Prod Sci*, vol. 56, no. 11, pp. 1828–1833, Jul. 2015, doi: 10.1071/AN14972.
- [48] P. McDonnell, S. Figat, and J. V. Odoherty, "The effect of dietary laminarin and fucoidan in the diet of the weanling piglet on performance, selected faecal microbial populations and volatile fatty acid concentrations," *Animal*, vol. 4, no. 4, pp. 579–585, Oct. 2010, doi: 10.1017/S1751731109991376.
- [49] L. O'Sullivan *et al.*, "Prebiotics from marine macroalgae for human and animal health applications," *Mar Drugs*, vol. 8, no. 7, pp. 2038–2064, 2010, doi: 10.3390/MD8072038.
- [50] S. Charoensiddhi, M. A. Conlon, C. M. M. Franco, and W. Zhang, "The development of seaweed-derived bioactive compounds for use as prebiotics and nutraceuticals using enzyme technologies," *Trends Food Sci Technol*, vol. 70, pp. 20–33, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.TIFS.2017.10.002.
- [51] Miao H Q, Elkin M, Aingorn E, Ishai-Michael R, Stein C A, and Vlodavsky I, "Inhibition of heparanase activity and tumor metastasis by laminarin sulfate and synthetic phosphorothioate oligodeoxynucleotides," *Int J Cancer.*, vol. 83, no. 3, pp. 424–431, Oct. 1999, Accessed: Dec. 22, 2022. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10495437/>
- [52] Dalin R, Hiroyuki N, Hideomi A, Takahiro N, and Kazutoshi N, "Study on Antihypertensive and Antihyperlipidemic Effects of Marine Algae," *Fisheries Science*, vol. 60, no. 1, pp. 83–88, 1994, Accessed: Dec. 22, 2022. [Online]. Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/fishsci1994/60/1/60_1_83/_pdf
- [53] J. Winberg, P. C. Ranson, and M. Skropeta, "Selecting Australian marine macroalgae based on the fatty acid composition and anti-inflammatory activity," *J Appl Phycol*, vol. 27, no. 5, pp. 2111–2121, 2015, Accessed: Dec. 22, 2022. [Online]. Available: <http://ro.uow.edu.au/smhpapers/2610>
- [54] W. A. J. P. Wijesinghe, G. Ahn, W. W. Lee, M. C. Kang, E. A. Kim, and Y. J. Jeon, "Anti-inflammatory activity of phlorotannin-rich fermented *Ecklonia cava* processing by-product extract in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages," *J Appl Phycol*, vol. 25, no. 4, pp. 1207–1213, Aug. 2012, doi: 10.1007/S10811-012-9939-5.
- [55] D. Pádua, E. Rocha, D. Gargiulo, and A. A. Ramos, "Bioactive compounds from brown seaweeds: Phloroglucinol, fucoxanthin and fucoidan as promising therapeutic agents against breast cancer," *Phytochem Lett*, vol. 14, pp. 91–98, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.PHYTOL.2015.09.007.
- [56] M. Murray, A. L. Dordevic, L. Ryan, and M. P. Bonham, "An emerging trend in functional foods for the prevention of cardiovascular disease and diabetes: Marine algal polyphenols," *Crit Rev Food Sci Nutr*, vol. 58, no. 8, pp. 1342–1358, May 2018, doi: 10.1080/10408398.2016.1259209.
- [57] R. Chandra, R. Parra, and H. M. N. Iqbal, "Phycobiliproteins: A Novel Green Tool from Marine Origin Blue-Green Algae and Red Algae," *Protein Pept Lett*, vol. 24, no. 2, pp. 118–125, Aug. 2016, doi: 10.2174/0929866523666160802160222.
- [58] S. Sekar and M. Chandramohan, "Phycobiliproteins as a commodity: Trends in applied research, patents and commercialization," *J Appl Phycol*, vol. 20, no. 2, pp. 113–136, Apr. 2008, doi: 10.1007/S10811-007-9188-1/TABLES/9.
- [59] E. M. Balboa *et al.*, "Potential of antioxidant extracts produced by aqueous processing of renewable resources for the formulation of cosmetics," *Ind Crops Prod*, vol. 58, pp. 104–110, 2014, doi: 10.1016/J.INDCROP.2014.03.041.

- [60] V. S. Chang and * Teo, "Evaluation of heavy metal, antioxidant and anti-tyrosinase activities of red seaweed (*Eucheuma cottonii*)," *Int Food Res J*, vol. 23, no. 6, pp. 2370–2373, 2016.
- [61] H. J. Hwang, "Skin Elasticity and Sea Polyphenols," *Seanol Science Center Review*, no. 1, pp. 1–10, 2010, Accessed: Dec. 22, 2022. [Online]. Available: www.seanolscience.org
- [62] V. Godvin Sharmila, M. Dinesh Kumar, A. Pugazhendhi, A. K. Bajhaiya, P. Gugulothu, and J. Rajesh Banu, "Biofuel production from Macroalgae: present scenario and future scope," 2021, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/21655979.2021.1996019.
- [63] Y. Zhao, N. Bourgougnon, J. L. Lanoisellé, and T. Lendormi, "Biofuel Production from Seaweeds: A Comprehensive Review," *Energies* 2022, Vol. 15, Page 9395, vol. 15, no. 24, p. 9395, Dec. 2022, doi: 10.3390/EN15249395.
- [64] J. J. Liu, R. Dickson, H. Niaz, J. W. Van Hal, J. W. Dijkstra, and P. Fasahati, "Production of fuels and chemicals from macroalgal biomass: Current status, potentials, challenges, and prospects," Nov. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2022.112954.
- [65] M. Aizawa, K. Asaoka, M. Atsumi, and T. Sakou, "Seaweed bioethanol production in Japan - The ocean sunrise project," *Oceans Conference Record (IEEE)*, 2007, doi: 10.1109/OCEANS.2007.4449162.
- [66] J. V. Lamouroux, "Furcellaria lumbricalis (Hudson) J.V.Lamouroux 1813," 1813, *Paris*. Accessed: Feb. 10, 2023. [Online]. Available: https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=14
- [67] P. Kersen, H. Orav-Kotta, J. Kotta, and H. Kukk, "Effect of abiotic environment on the distribution of the attached and drifting red algae *Furcellaria lumbricalis* in the Estonian coastal sea," in *Estonian Journal of Ecology*, Dec. 2009, pp. 245–258. doi: 10.3176/eco.2009.4.01.
- [68] HELCOM, "Furcellaria lumbricalis," Bundesamt für Naturschutz, 2013.
- [69] "Vetik OÜ." Accessed: Mar. 20, 2023. [Online]. Available: <https://vetik.eu/#about>
- [70] G. Martin, T. Paalme, and K. Torn, "Growth and production rates of loose-lying and attached forms of the red algae *Furcellaria lumbricalis* and *Coccotylus truncatus* in Kassari Bay, the West Estonian Archipelago Sea," in *Hydrobiologia*, Jan. 2006, pp. 107–115. doi: 10.1007/s10750-005-1010-y.
- [71] R. Paoli, B. Bjarnason, T. Ilmjärv, and F. Romagnoli, "Off-Shore and On-Shore Macroalgae Cultivation and Wild Harvesting: An LCA-Based Evaluation from Baltic Sea Region Case Studies," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 27, no. 1, pp. 606–626, Jan. 2023, doi: 10.2478/rtuect-2023-0045.
- [72] P. Fasahati, R. Dickson, C. M. Saffron, H. C. Woo, and J. J. Liu, "Seaweeds as a sustainable source of bioenergy: Techno-economic and life cycle analyses of its biochemical conversion pathways," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 157, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.112011.
- [73] F. Romagnoli *et al.*, "Furcellaria lumbricalis macroalgae cascade biorefinery: a Life Cycle Assessment study in the Baltic Sea Region," *J Clean Prod*, vol. 478, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143861.
- [74] A. Arias *et al.*, "Conceptual design and environmental evaluation of the Biorefinery approach for R-phycoerythrin extraction and purification," *N Biotechnol*, vol. 86, pp. 73–86, May 2025, doi: 10.1016/j.nbt.2025.01.010.
- [75] A. Giwa, "Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of biogas production from marine algae and cattle manure biorefineries," *Bioresour Technol*, vol. 244, pp. 1470–1479, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2017.05.143.
- [76] ISO, "ISO 14044:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines," 2006, *International Organization for Standardization*. Accessed: Jan. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>
- [77] F. Romagnoli *et al.*, "Microalgae cultivation in a biogas plant: Environmental and economic assessment through a life cycle approach," *Biomass Bioenergy*, vol. 182, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.biombioe.2024.107116.
- [78] N. Ferronato, R. Paoli, F. Romagnoli, G. Tettamanti, D. Bruno, and V. Torretta, "Environmental impact scenarios of organic fraction municipal solid waste treatment with Black Soldier Fly larvae based on a life cycle assessment," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 12, pp. 17651–17669, Mar. 2024, doi: 10.1007/s11356-023-27140-9.
- [79] "Hyndla." Accessed: Mar. 20, 2023. [Online]. Available: <https://hyndla.is/english/>
- [80] M. Goedkoop, M. Oele, J. Leijting, T. Ponsioen, and E. Meijer, "Introduction to LCA with SimaPro Title: Introduction to LCA with SimaPro," 2016. [Online]. Available: www.pre-sustainability.com
- [81] G. Wernet *et al.*, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, pp. 1218–1230, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.

- [82] V. A. Mantri, Y. Shah, & S. Thiruppathi, and S. Thiruppathi, "Feasibility of farming the agarose-yielding red alga *Gracilaria dura* using tube-net cultivation in the open sea along the Gujarat coast of NW India," *Applied Phycology*, vol. 1, no. 1, pp. 12–19, 2020, doi: 10.1080/26388081.2019.1648181.
- [83] M. D. Edwards and M. J. Dring, "Open-sea cultivation trial of the red alga, *Palmaria palmata* from seeded tetraspores in Strangford Lough, Northern Ireland," 2011, doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.04.007.
- [84] S. Lin, D. Usino, D. Isaksson, L. Lindblad, and G. Peters, "Life cycle assessment of the use of marine biocides in antifouling paint - A comparison of the environmental profiles between conventional copper-based and innovative Selektope paint," Gothenburg, 2014.
- [85] S. Fazio, L. Zampori, A. De Schryver, O. Kusche, L. Thellier, and E. Diaconu, "Guide for EF compliant data sets," Luxembourg, 2020.
- [86] Uniworkboats SIA, "Peschereccio a strascico - ST-50 - Uniworkboats SIA - entro bordo / in alluminio," Accessed: Feb. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.nauticexpo.it/prod/uniworkboats-sia/product-66044-539847.html>
- [87] F. Piccinno, R. Hischier, S. Seeger, and C. Som, "From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies," *J Clean Prod*, vol. 135, pp. 1085–1097, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.164.
- [88] National Center for Biotechnology Information, "PubChem Compound Summary for CID 33258, Allura Red AC." Accessed: Jul. 19, 2023. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Allura-Red-AC>
- [89] National Center for Biotechnology Information, "PubChem Compound Summary for CID 24346, Sodium disulphite." Accessed: Jul. 19, 2023. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-disulphite>
- [90] D. Saha and S. Bhattacharya, "Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: A critical review," Dec. 2010. doi: 10.1007/s13197-010-0162-6.
- [91] K. Hayashi, G. Gaillard, and T. Nemecek, "Life cycle assessment of agricultural production systems: Current issues and future perspectives," *Good Agricultural Practice (GAP) in Asia and Oceania*, 2005, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/240634920>
- [92] A. E. Nilsson, K. Bergman, L. P. Gomez Barrio, E. M. Cabral, and B. K. Tiwari, "Life cycle assessment of a seaweed-based biorefinery concept for production of food, materials, and energy," *Algal Res*, vol. 65, p. 102725, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.ALGAL.2022.102725.
- [93] I-REC Standard Foundation, "Understanding EAC Schemes and Roadmaps for Their Development," 2020.
- [94] M. A. J. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe 2016 v1.1.1. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," Bilthoven, 2017. [Online]. Available: www.rivm.nl/en
- [95] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, and S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment Theory and Practice*. 2018.
- [96] "Orbis." Accessed: Nov. 24, 2024. [Online]. Available: <https://login.bvdinfo.com/R1/Orbis>
- [97] "teatmik.ee." Accessed: Nov. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.teatmik.ee/>
- [98] "Sweden | Alfa Laval." Accessed: Nov. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.alfalaval.se/>
- [99] Tommie. Ponsioen, Gohar. Nuhoff-Isakhanyan, Theun. Vellinga, Willy. Baltussen, Koen. Boone, and Geert. Woltjer, *Monetisation of sustainability impacts of food production and consumption*. Wageningen Economic Research, 2020.
- [100] C. Benoît Norris *et al.*, "Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020," 2020.
- [101] International Organization of Standardization, "ISO 14075:2024 - Environmental management - Principles and framework for social life cycle assessment," Oct. 2024.
- [102] J. Martínez-Blanco *et al.*, "Application challenges for the social Life Cycle Assessment of fertilizers within life cycle sustainability assessment," *J Clean Prod*, vol. 69, pp. 34–48, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.044.
- [103] G. Norris, "Chapter 8: The Social Hotspots Database Context of the SHDB," Nov. 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/287215286>
- [104] L. Tonucci, A. Mascitti, A. M. Ferretti, F. Coccia, and N. d' Alessandro, "The Role of Nanoparticle Catalysis in the Nylon Production," *Catalysts*, vol. 12, no. 10, p. 1206, Oct. 2022, doi: 10.3390/CATAL12101206/S1.
- [105] C. B. Norris, D. Aulisio, and G. A. Norris, "Working with the Social Hotspots Database - Methodology and findings from 7 social scoping assessments," in *Leveraging Technology for a Sustainable World - Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 581–586. doi: 10.1007/978-3-642-29069-5_98.

- [106] W. Kloeppfer, "Life cycle sustainability assessment of products (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95)," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 13, no. 2, pp. 89–95, Feb. 2008, doi: 10.1065/LCA2008.02.376/METRICS.
- [107] C.-L. Hwang and K. Yoon, "Methods for Multiple Attribute Decision Making," pp. 58–191, 1981, doi: 10.1007/978-3-642-48318-9_3.
- [108] M. Grinberg, R. Ackermann, and M. Finkbeiner, "Ecological scarcity method: Adaptation and implementation for different countries," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 10, no. 1, pp. 9–15, 2012, doi: 10.2478/v10145-012-0019-5.
- [109] M. Troell, P. J. G. Henriksson, A. H. Buschmann, T. Chopin, and S. Quahe, "Farming the Ocean—Seaweeds as a Quick Fix for the Climate?," 2022, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/23308249.2022.2048792.
- [110] F. Gkatzoglou, T. Papadimitriou, and P. Gogas, "Fuel Price Networks in the EU," *Economies* 2024, vol. 12, no. 5, p. 102, Apr. 2024, doi: 10.3390/ECONOMIES12050102.



Riccardo Paoli dzimis 1996. gadā Varēzē (Itālijā). Insubrijas Universitātē ieguvis bakalaura grādu vides un darba drošības inženierijā (2018) un maģistra grādu vides un darba ilgtspējas inženierijā (2021). Kopš 2021. gada ir Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta pētnieks, patlaban ieņem arī ilgtspējas inženiera amatu uzņēmumā "ABB". Doktora studiju laikā bija viespētnieks Teksasas Universitātē Ārlingtonā, 2022. gadā saņēma Jaunā zinātnieka balvu Baltijas jūras zinātnes dienā.

Zinātniskās intereses ietver tīrāku ražošanu, aprites ekonomikas pieejas un ilgtspējas stratēģijas, īpaši – sarežģītās vērtību ķēdēs un jaunās tehnoloģijās.