

Vandenilio transportavimo įvairiomis transporto priemonėmis techno-ekonominė analizė

Lietuvos energetikos agentūra

Parengė: Dr. Indrė Gečaitė

2026

Turinys

Vandenilio transportavimas esant 5–10 kt/metus kiekiui įvairiomis transporto priemonėmis	3
Vandenilio transportavimas esant 20–30 kt/metus kiekiui įvairiomis transporto priemonėmis	5
Vandenilio transportavimas esant 50–100 kt/metus kiekiui įvairiomis transporto priemonėmis	7
Vandenilio transportavimas esant 200–300 kt/metus kiekiui įvairiomis transporto priemonėmis	10
Apibendrinančios išvados	14

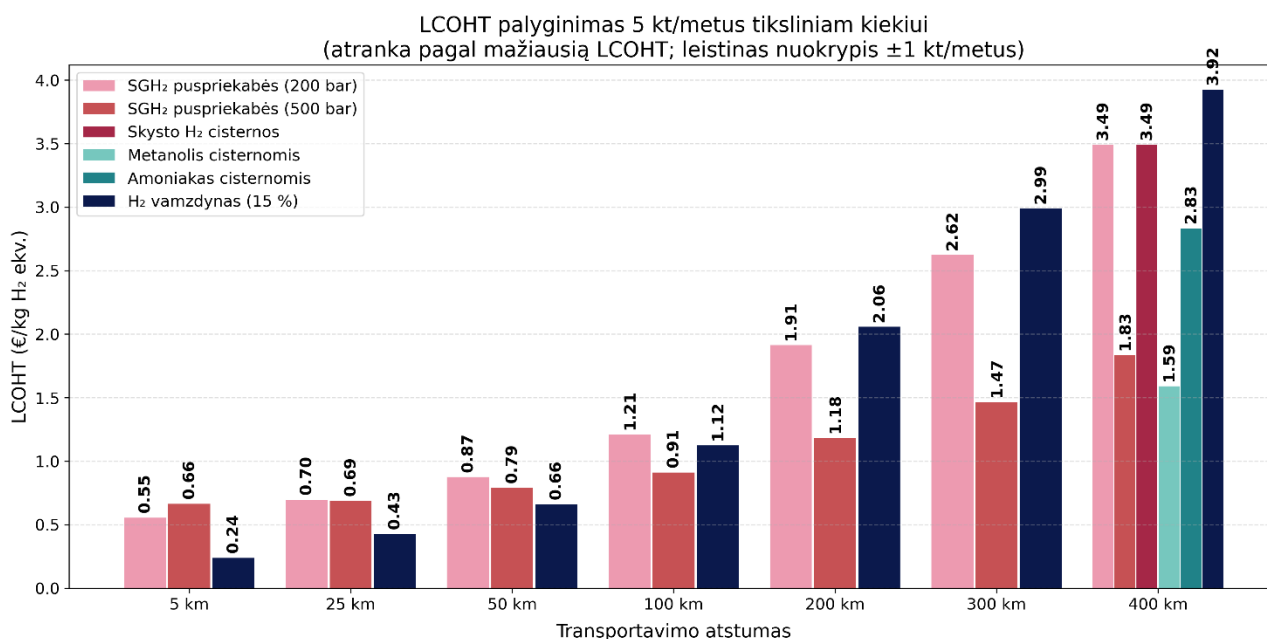
Vandenilio transportavimo įvairiomis transporto priemonėmis techno-ekonominė analizės rezultatai

Analizės metu buvo vertintos pagrindinės vandenilio ir jo išvestinių produktų transportavimo alternatyvos, siekiant palyginti jų ekonominį efektyvumą skirtingais atstumais ir tiekimo mastais. Vertinimas apėmė vamzdynų (6, 20, 48 colių diametro), kelių transporto sprendinius suslėgtam ir skystam vandeniliui bei metanoliui ir amoniakui, taip pat ir geležinkelių transportą metanoliui ir amoniakui, o visi scenarijai buvo analizuojami taikant vieningą kaštų metodiką. Rezultatai pateikti kaip vieneto kaštai eurais vienam pristatytam kilogramui vandenilio arba vandenilio ekvivalento, todėl skirtingas tiekimo grandines buvo galima tiesiogiai palyginti tarpusavyje. Analizė buvo atliekama nuosekliai, pradedant nuo techninių ir logistinių prielaidų suformavimo, transportavimo srautų ir infrastruktūros poreikio apskaičiavimo iki bendrų metinių kaštų įvertinimo ir jų perskaičiavimo į palyginamą galutinį rodiklį.

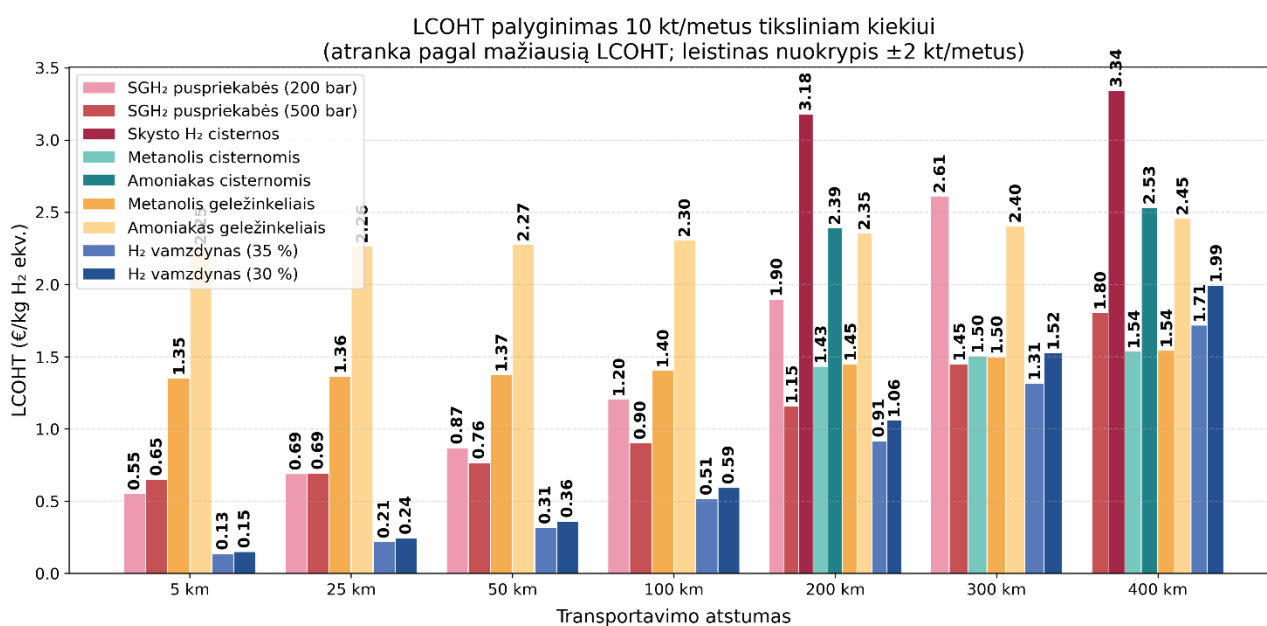
Žemiau pateikti grafikai leidžia gana aiškiai suprasti vieną svarbiausių vandenilio logistikos dėsningumų: universaliai geriausio transportavimo būdo nėra, nes optimalų rezultatą lemia ne vien atstumas ar kiekis, o jų derinys su infrastruktūros panaudojimo lygiu, transporto parko mastu, terminalų sudėtingumu ir tuo, ar galutiniame taške reikalingas grynas vandenilis, ar išvestinis produktas. Rezultatai ypač aiškiai parodo dar vieną svarbią išvalgą, jog lemiamas veiksnys dažnai yra ne pati technologija, o jos apkrovos mastas. Dėl to mažo diametro, bet pilnai išnaudotas skirstomasis vamzdynas prie kai kurių transportuojamo vandenilio kiekių išlieka ekonomiškai stipresnis už nominaliai didesnę perdavimo tinklo (20 colių) alternatyvą, o mobilios grandinės gana greitai praranda konkurencingumą didėjant kiekiui ir atstumui. Rezultatai pateikti lyginamosiomis vandenilio transportavimo sąnaudomis (LCOHT), išreikštomis vandenilio ekvivalentui.

Vandenilio transportavimas esant 5–10 kt/metus kiekiui įvairiomis transporto priemonėmis

Mažiausių kiekių scenarijų, 5 ir 10 kt per metus, grafikuose geriausiai matoma ankstyvos rinkos logika. Esant 5 kt per metus kiekiui, 6 colių vamzdynas su 15 proc. panaudojimo lygiu (apkrova) yra ekonomiškai pagrįstas tik trumpiausiuose atstumuose, tačiau jau nuo maždaug 25 km ekonomiškai išryškėja 500 bar suslėgto vandenilio puspriekabių pranašumas. Tai reiškia, kad esant tokiam transportuojamo vandenilio kiekiui, mažo diametro vamzdynas nėra universaliai ekonomiškiausias sprendinys visoje atstumų atkarpoje: jis geriausiai veikia kaip labai trumpa klasterio jungtis, o vidutiniuose ir ilgesniuose maršrutuose lankstesnė 500 bar logistika tampa patrauklesnė. 200 bar sprendinys čia išlieka racionalus tik trumpiausioje atkarpoje iki 25 km, kur paprastesnė logistinė grandinė ir mažesnės pradinės kapitalo investicijos dar kompensuoja mažesnę vieno reiso naudingumą.



1 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 6 colių (15 proc. panaudojimo lygis), suslėgto vandenilio puspriekabės (200 ir 500 bar.), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos, esant 5 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 5 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)



2 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 6 colių (30–35 proc. apkrova), suslėgto vandenilio vilkikai (200 ir 500 bar.), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos bei geležinkelis, esant 10 kt/metus kiekiui, 5–400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 10 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)

10 kt per metus grafike logika pasikeičia labai aiškiai 6 colių vamzdyno naudai. Kai tas pats diametras jau apkrautas apie 30–35 proc. jo pajėgumo lygiu, jis tampa pigiausiu variantu visame nagrinėjamame 5–300 km diapazone. Praktiniu požiūriu nebūtų racionalu tokio diametro liniją tiesti

100–200 ar juo labiau 300 km atstumu, nes tokiuose nuotoliuose lemiami tampa ne vien kilometro LCOHT, bet ir servitūtų, žemės naudojimo, leidimų, prijungimo mazgų, aplinkosauginių procedūrų ir ilgalaikio plėtros lankstumo klausimai, todėl mažo diametro vamzdynas labiau pagrįstas kaip lokalaus klasterio ar trumpos regioninės jungties sprendinys, o ne kaip ilgo koridoriaus infrastruktūra^{1,2}. Suslėgto vandenilio 200 bar puspriekabės trumpuose atstumuose, maždaug iki 25 km, išlieka santykinai konkurencingas sprendinys, užtikrinantis logistikos lankstumą, tačiau didėjant atstumui sparčiai praranda pozicijas. Tuo tarpu 500 bar puspriekabės išlieka stipriausia mobili suslėgto vandenilio alternatyva trumpuose ir vidutinio ilgio maršrutuose. Didėjant atstumui jos aiškiai pranašesnės už 200 bar variantą, tačiau jų ekonominis pranašumas yra ribotas: ilgesniuose nuotoliuose pradeda ryškėti ne tik jų pačių kaštų spartesnis augimas, bet ir alternatyvių nešiklių privalumai. Todėl ilgesniuose atstumuose, ypač 300–400 km diapazone, metanolio grandinė jau gali būti vertinama kaip racionali alternatyva nei mažo diametro vamzdynas ar mobilus gryno vandenilio transportavimas. Suskystinto vandenilio ir amoniako grandinės esant 10 kt per metus vandenilio kiekiui nėra ekonomiškai priimtinausias, tačiau tai nereiškia, kad jos neturi praktinės reikšmės. Jų taikymas labiau priklauso nuo konkrečios tiekimo grandinės struktūros, logistikos sąlygų ir galutinio produkto panaudojimo pobūdžio.

Vandenilio transportavimas esant 20–30 kt/metus kiekiui įvairiomis transporto priemonėmis

Esant vandenilio gamybos apimtims siekiančioms 20–30 kt/metus grafikai atskleidžia vieną svarbiausių naujų išvadų. Prie 20–25 kt/metus 6 colių skirstomasis vamzdynas pasiekia 75–95 proc. panaudojimo lygį ir išlieka aiškiu lyderiu visoje nagrinėjamoje atstumų atkarpoje. Tai reiškia, kad pereinamoji riba tarp skirstomojo ir perdavimo tinklo sprendimo nėra vien kiekio klausimas, tai labai priklauso nuo to, ar projektuojamas diametras jau pakankamai efektyviai apkrautas ekonominiu požiūriu. Kitaip tariant, gerai išnaudotas mažesnio diametro vamzdynas gali būti racionalesnis už didesnio diametro pasirinkimą, jei pastarasis naudojamas per mažu panaudojimo lygiu, o ateities vandenilio gamybos pajėgumų ženklus išaugimas nėra užtikrintas. Net ir įtraukus papildomus vamzdymo įrengimo bei eksploatavimo kaštus, tokius kaip žemės paėmimas ar servitutai, trasos parengimas, aplinkosauginės ir projektavimo procedūros, prijungimo mazgai, leidimų administravimas bei kitos nenumatytos sąnaudos, vamzdymo LCOHT, paskirstytas per 40 metų laikotarpį, išlieka ekonomiškai labai patrauklus ir daugeliu atvejų tebėra konkurencingas net padidėjus investicinei naštai.

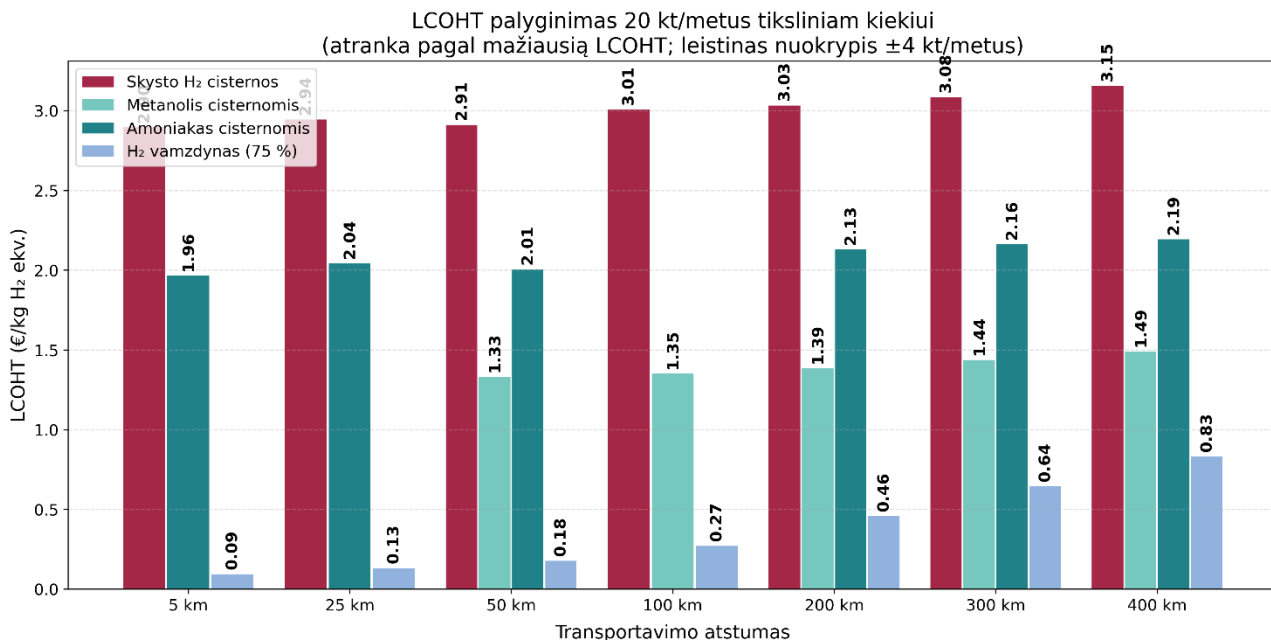
Svarbu paminėti, kad šių vandenilio kiekių rinka jau nebėra ankstyva, bet dar nėra pilnai susiformavusi, todėl matyti ne tik vamzdymo dominavimas, bet ir labai aiški mobiliųjų alternatyvų hierarchija. Suslėgto vandenilio 200 bar puspriekabių alternatyva išlieka stipri trumpesniuose atstumuose, tačiau greitai praranda konkurencingumą didėjant kiekiui bei atstumui (iki maždaug 50 km teorinė galimybė), kur 500 bar puspriekabės jau tampa racionaliausiu suslėgto vandenilio transportavimo pasirinkimu.

Taigi, esant 20–30 kt/metus kiekiui, mobilios transportavimo grandinės gali užtikrinti didesnę lankstumą ir greitą veiklos pradžią ankstyvoje projektų stadijoje, tačiau ilgesnėje perspektyvoje, kai

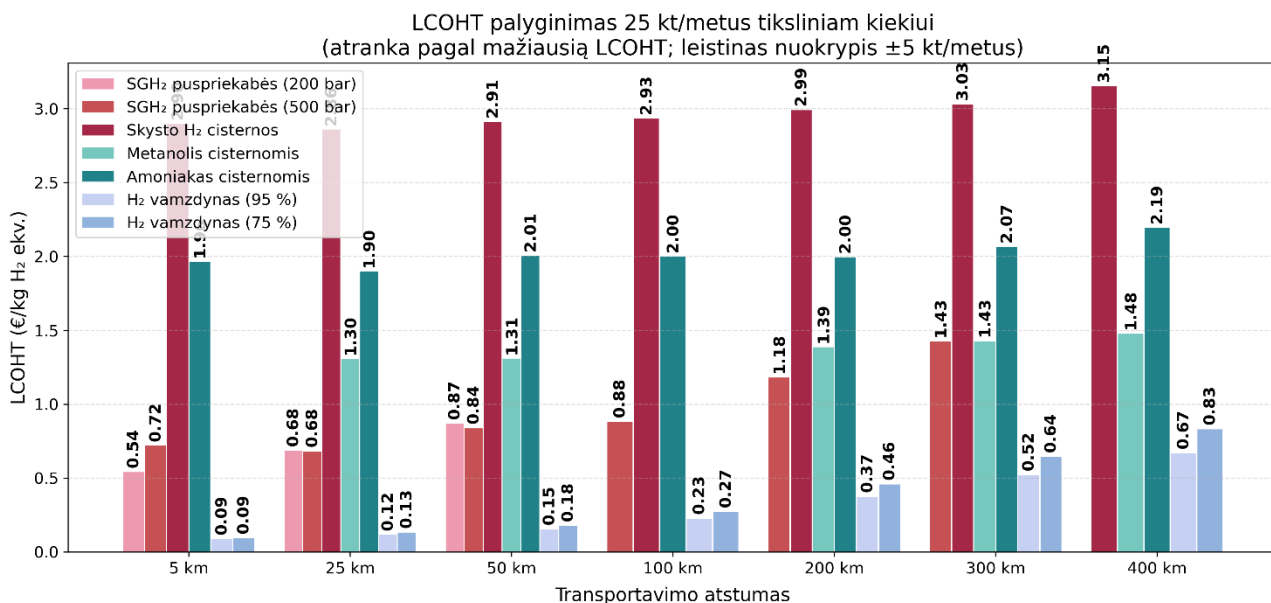
¹ Simbeck, D., & Chang, E. (2002). Hydrogen supply: Cost estimate for hydrogen pathways—Scoping analysis (NREL/SR-540-32525). National Renewable Energy Laboratory.

² National Renewable Energy Laboratory. (2005). Hydrogen, fuel cells & infrastructure technologies program (NREL/MP-560-34289). National Renewable Energy Laboratory

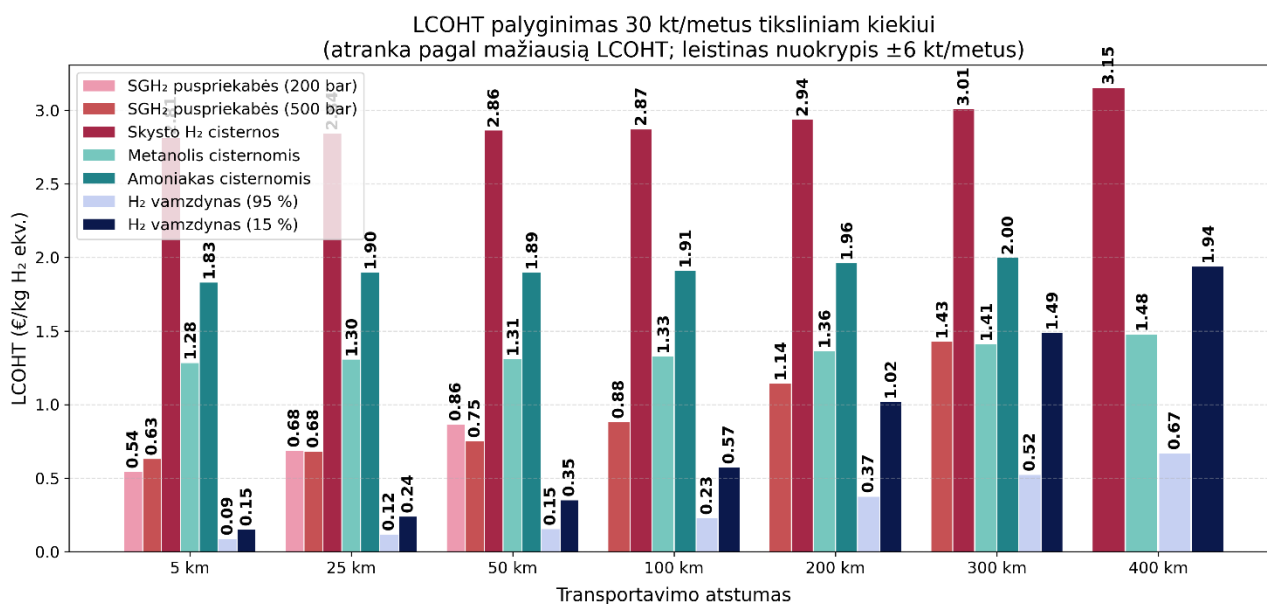
vandenilio gamybos apimtys tampa stabilios, o galutinis vartojimo centras yra aiškiai lokalizuotas, ekonomiškai patraukliu sprendiniu tampa gerai apkrauto 6 colių vamzdyno alternatyva.



3 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: 6 colių vamzdynais (75 proc. apkrova), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos, esant 20 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 20 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)



4 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 6 colių (75 ir 95 proc. apkrova), suslėgto vandenilio vilkikai (200 ir 500 bar.), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos, esant 25 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 25 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)



5 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 6 colių (95 proc. apkrova), vamzdynais 20 colių (15 proc. apkrova), suslėgto vandenilio vilkikai (200 ir 500 bar.), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos, esant 30 kt/metus kiekiui, 5–400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 30 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpu)

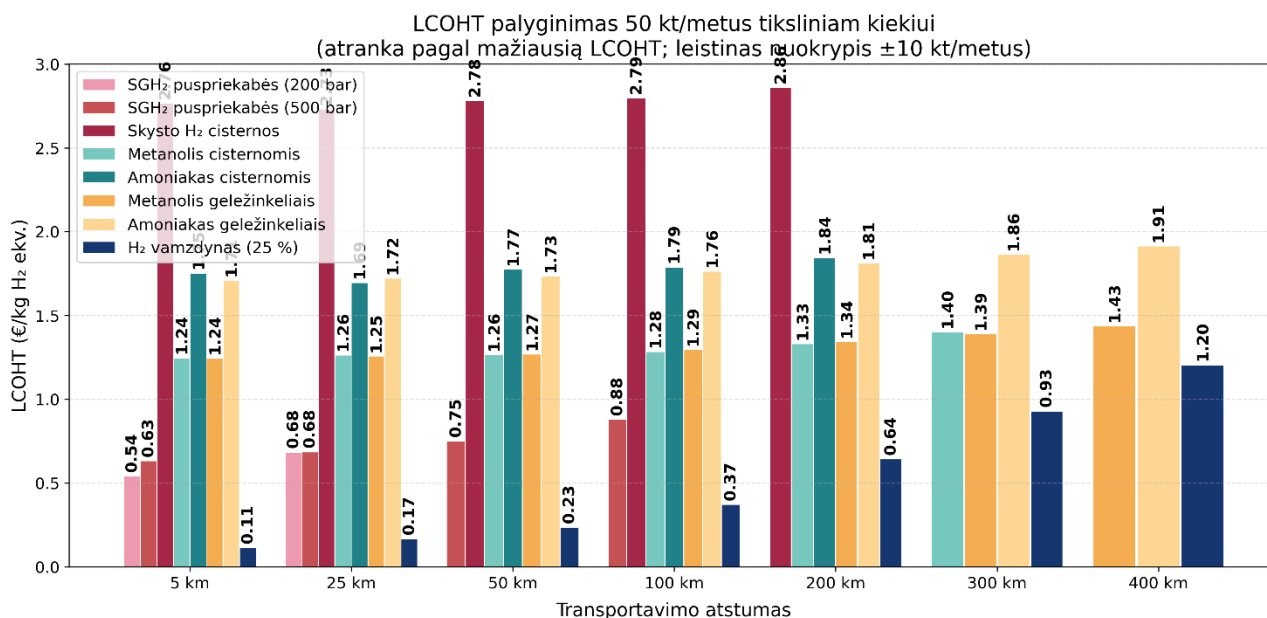
Suskystinto vandenilio transportavimo cisternomis opcija šiuose grafikuose pasižymi aiškiai aukštesnėmis LCOHT reikšmėmis nei suslėgto vandenilio 500 bar puspriekabių ar vamzdynų. Todėl esant 20–30 kt/metus kiekiams suskystinto vandenilio transportavimas nėra dominuojančiu pereinamosios infrastruktūros sprendiniu, tai labiau nišinė, technologiškai įgyvendinama, tačiau kaštų požiūriu konkurencingumu nepasižyminti alternatyva. Vis dėlto ilgesniuose maršrutuose, ypač apie 400 km ir daugiau, kai siekiama transportuoti gryną vandenilį, ši technologija išlieka viena iš nedaugelio techniškai realistiškų pasirinkimų, nors ekonominis patrauklumas ir išlieka ribotas. Vertinant platesnį alternatyvų spektrą, metanolio grandinė su atgaline konversija tam tikrais atvejais galėtų pasižymėti panašiais arba net mažesniais bendraisiais kaštais.

Amoniako ir metanolio transportavimo grandinės šiame kiekių lygyje išlieka antrinės, bet labai svarbios. Jų kreivės yra santykinai stabilesnės, bet aiškiai aukštesnės nei vamzdynų ir dažniausiai aukštesnės nei suslėgto vandenilio puspriekabių scenarijų. Tai rodo, kad šiame diapazone jos dar netampa tiesioginio vandenilio logistikos sprendiniu ir labiau atlieka alternatyvaus produkto transportavimo ar specifinės tiekimo logistikos vaidmenį.

Vandenilio transportavimas esant 50–100 kt/metus kiekiui įvairiomis transporto priemonėmis

50, 75 ir 100 kt/metus scenarijuose jau aiškiai išryškėja 20 colių perdavimo tinklo vamzdyno ekonominis pranašumas. Nuo 50 kt/metus šis sprendinys tampa ne tik mažiausių kaštų, bet ir sistemiškai racionalia alternatyva visame nagrinėjamame 5–400 km transportavimo atstumų diapazone, o didėjant transportuojamo vandenilio kiekiui jo konkurencinis pranašumas dar labiau stiprėja. Tai rodo, kad pasiekus tokį gamybos mastą nuolatinis ir pakankamai koncentruotas transportavimo poreikis jau sudaro tvirtas prielaidas pereiti nuo mobiliųjų logistikos grandinių prie

perdavimo tinklo infrastruktūros vystymo. Kartu šie grafikai rodo ir kitą svarbų dalyką: mobiliųjų vandenilio grandinių ekonomika šiame etape jau nebe konkuruoja su vamzdynu, o yra tik teorinė galimybė. Net ir trumpuose maršrutuose (<25 km), naudojant didesnės talpos 500 bar puspriekabės, reikalingas transporto parkas viršija 20 vilkikų. Toliau augant atstumui ir transportavimo apimtims, tokios logistinės grandinės eksploatavimas tampa sunkiai valdomas, o jos įgyvendinimas reikalauja neproporcingai didelių techninių ir žmogiškųjų resursų.

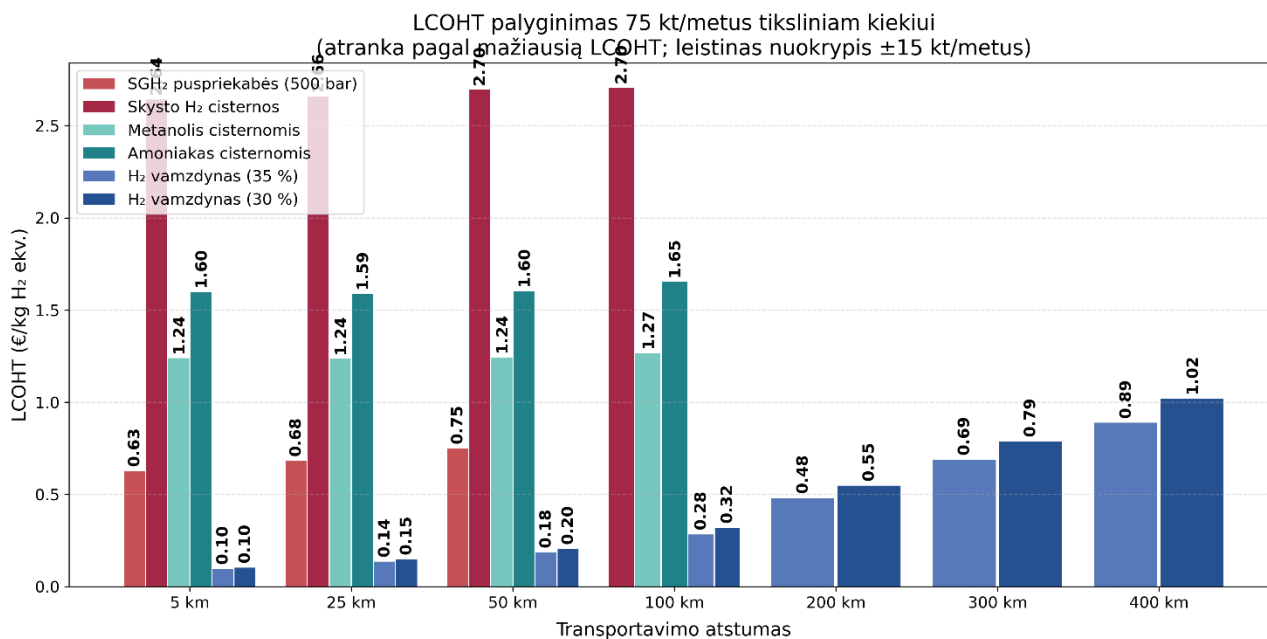


6 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 20 colių (25 proc. apkrova), suslėgto vandenilio vilkikai (200 ir 500 bar.), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos bei geležinkelis, esant 50 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 50 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)

Tokiu būdu suslėgto vandenilio transportavimo puspriekabėmis palyginimas šiuose grafikuose tampa sąlyginis, nurodantis ne optimalią, o teorinę galimybę. Transportavimas 200 bar puspriekabėmis šiame diapazone faktiškai praranda konkurencingumą dėl pernelyg didelio reikalingo transporto parko (>40 vilkikų) ir itin sudėtingos logistikos. Tuo tarpu 500 bar puspriekabių technologija išlieka techniškai įmanoma tik trumpuose atstumuose ir ribotame transportuojamų kiekių intervale. Kitaip tariant, 50–100 kt/metus apimtims mobilioji gryno vandenilio transportavimo grandinė dar gali būti modeliuojama kaip teoriškai įgyvendinama, tačiau praktiškai jau nebegali būti laikoma racionaliu pagrindiniu sprendimu. Vertinant realias diegimo sąlygas, tokio masto transporto parkui būtų reikalinga gerokai didesnė projekto teritorija, platesnė aptarnaujanti infrastruktūra, daugiau pagalbinių pastatų ir reikšmingi žmogiškieji išteklių, todėl faktiniai sistemos kaštai tikėtina būtų dar didesni nei rodo bazinis transportavimo modelis. Ši išvada ypač svarbi rinkos planavimo požiūriu: suslėgto vandenilio transportavimas sunkvežimiais labiau tinka kaip pereinamojo laikotarpio, papildoma ar rezervinė logistikos priemonė, bet ne kaip pagrindinė architektūra pastoviams didelio masto srautams.

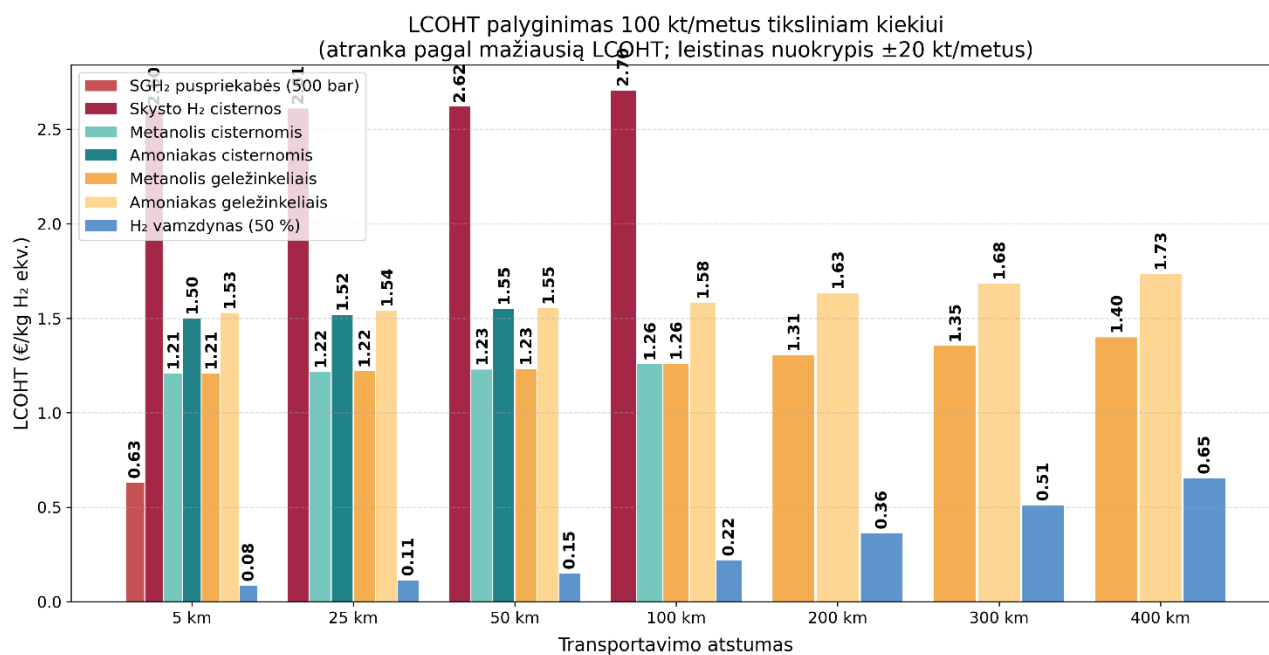
Suskystinto vandenilio transportavimas 50–100 kt/metus kiekių diapazone taip pat išlieka brangiausia vertintų alternatyvų. Nors dėl fiksuoto transportuojamo kiekio ši grandinė analizėje atsiskleidžia tik dalyje atstumų, jos LCOHT reikšmės aiškiai viršija tiek vamzdynų, tiek alternatyvių

metanolio ar amoniako transportavimo grandinių rodiklius. Tai leidžia daryti išvadą, kad suskystintas vandenilis šiame segmente pirmiausia išlieka specializuotu sprendiniu tais atvejais, kai prioritetas teikiamas būtent gryno vandenilio tiekimui, o ne mažiausių kaštų alternatyvai. Kartu svarbu pažymėti, kad esant tokioms apimtims jis išlieka iš esmės vienintele techniškai racionalia mobiliojo gryno vandenilio transportavimo forma esant vidutiniams ir dideliems atstumams, nors ekonominiu požiūriu ir neprilygsta kitoms nagrinėtoms tiekimo grandinėms.



7 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 20 colių (30 ir 35 proc. apkrova), suslėgto vandenilio vilkikai (500 bar.), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos, esant 75 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 75 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)

Amoniako ir metanolio grandinės 50–100 kt/metus apimtyse tampa gerokai svarbesnėmis alternatyvomis vamzdynams, tačiau ne todėl, kad būtų ekonomiškai pranašesnės už vandenilio tiekimą perdavimo tinklu. Jų reikšmė labiau išryškėja dėl to, kad mobilioji gryno vandenilio logistika šiame mastelyje susiduria su esminiais praktiniais ribojimais: pernelyg dideliu reikalingu transporto parku, sudėtingu operaciniu valdymu ir aukštais kaštais, ypač suskystinto vandenilio atveju. Tuo tarpu išvestinių produktų grandinės leidžia išlaikyti stabilesnę ir didesniems srautams atsparesnę kaštų struktūrą. Papildomą jų pranašumą lemia ir tai, kad tiek metanolis, tiek amoniakas tam tikrais atvejais gali būti naudojami tiesiogiai pramonėje, be atgalinės konversijos į vandenilį, o tai reikšmingai sumažina bendruosius tiekimo grandinės kaštus. Vertinant produkto pagrindu, o ne perskaičiuojant į vandenilio ekvivalentą, transportavimo kaštai gali būti mažesni maždaug 80 proc.



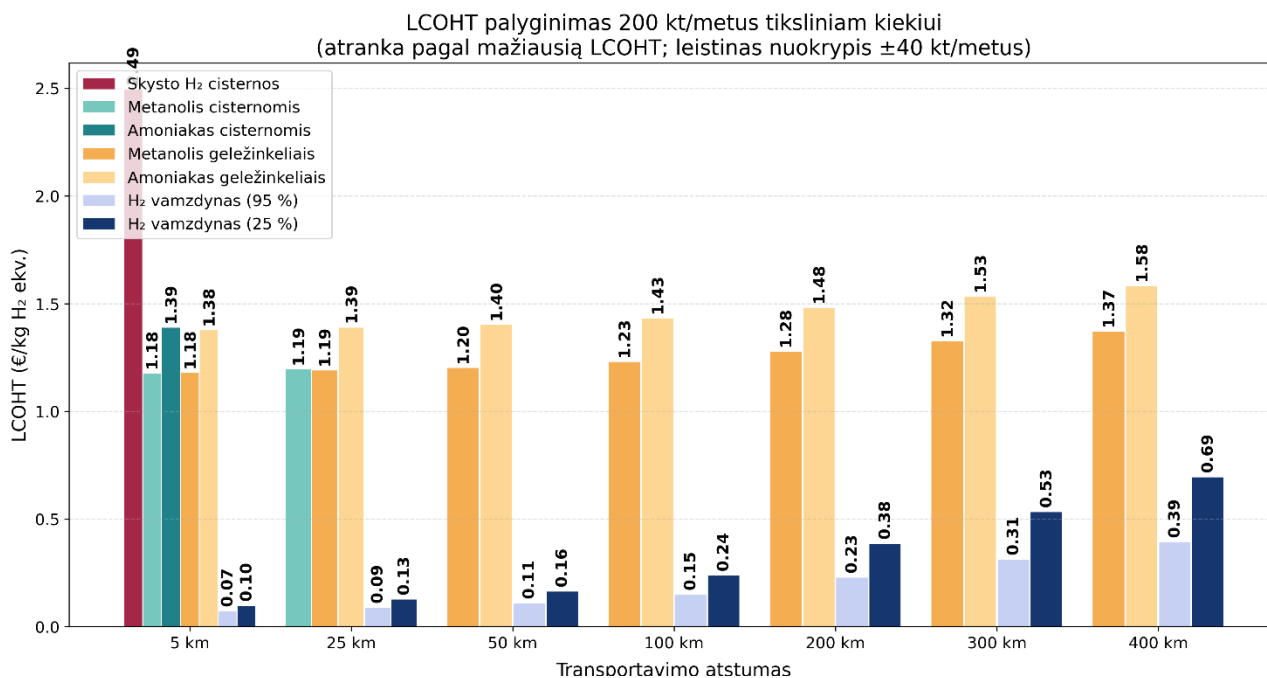
8 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 20 colių (50 proc. apkrova), suslėgto vandenilio vilkikai (500 bar.), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos ir geležinkelis, esant 100 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 100 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)

Vandenilio transportavimas esant 200–300 kt/metus kiekiui įvairiomis transporto priemonėmis

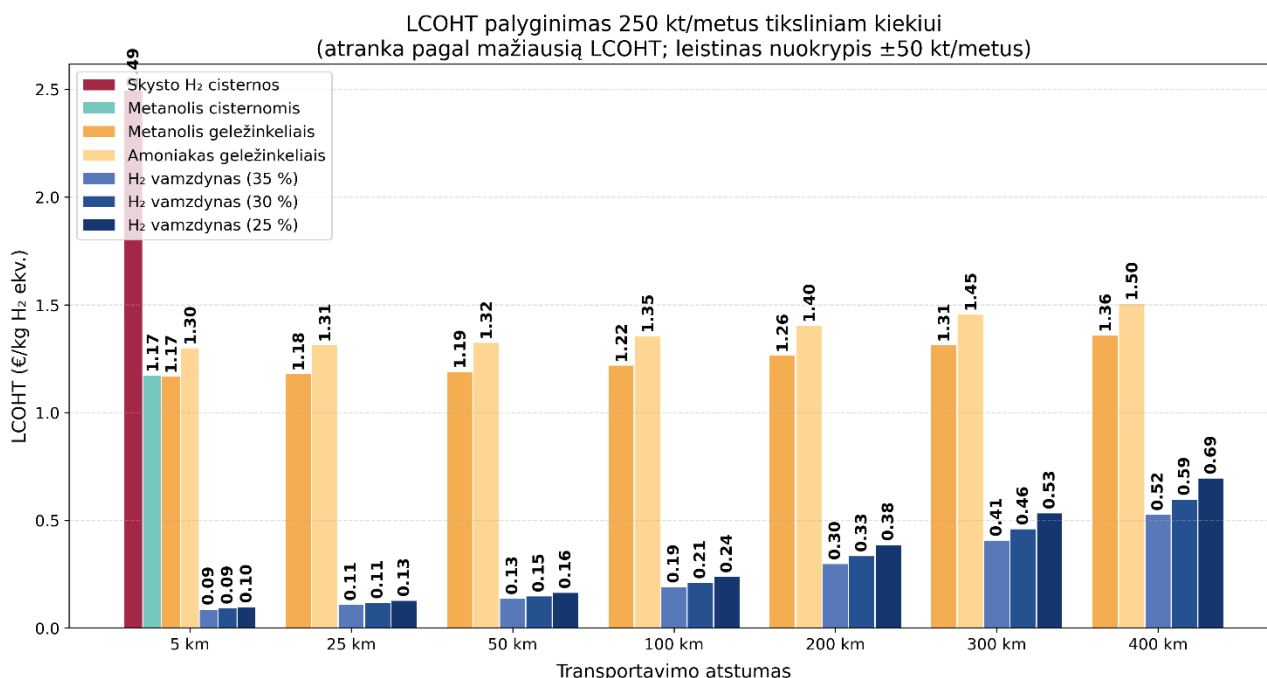
200 kt/metus kiekių scenarijus dar labiau patvirtina vamzdyninės logistikos dominavimą. Čia dvi vamzdyno alternatyvos aiškiai atsiskiria nuo visų kitų transportavimo būdų: labai aukštu panaudojimo lygiu veikiantis vamzdynas duoda mažiausią LCOHT visame atstumų diapazone, o mažesne apkrova veikianti didesnio diametro opcija išlieka labai konkurencinga, ypač ilgesniuose atstumuose. Tai reiškia, kad tokia vandenilio kiekių lygyje klausimas jau nebėra, ar perdavimo tinklo infrastruktūra ekonomiškai racionali, bet kokio diametro ir kokios augimo tendencijos infrastruktūra turėtų būti pasirinkta.

Papildomai galima išvelgti strateginę dilemą tarp šiandienos optimalaus sprendimo ir ateities perspektyvos. Aukštu panaudojimo lygiu apkrautas mažesnio diametro vamzdynas duoda žemiausias vieneto sąnaudas esamam vandenilio srautui, tačiau didesnio diametro pasirinkimas, nors ir mažiau apkrautas, vis tiek išlieka ekonomiškai stipria galimybe. Tai rodo, kad tam tikromis sąlygomis per didelis diameteras gali būti pateisinamas ne dėl šiandienos kaštų minimumo, o dėl būsimos rinkos plėtros.

Ši išvalga planavimo prasme yra labai svarbi, nes sprendimas tokia lygyje tampa nebe vien techninis. Jis susijęs su klausimu, ar infrastruktūra projektuojama tik dabartiniam srautui, ar iš karto kuriama kaip būsimos regioninio koridoriaus ašis. Todėl 200 kt/metus kiekiui diametro parinkimas jau yra ne vien ekonominis optimizavimas, bet ir strateginis teritorinio planavimo bei energetikos politikos pasirinkimas.

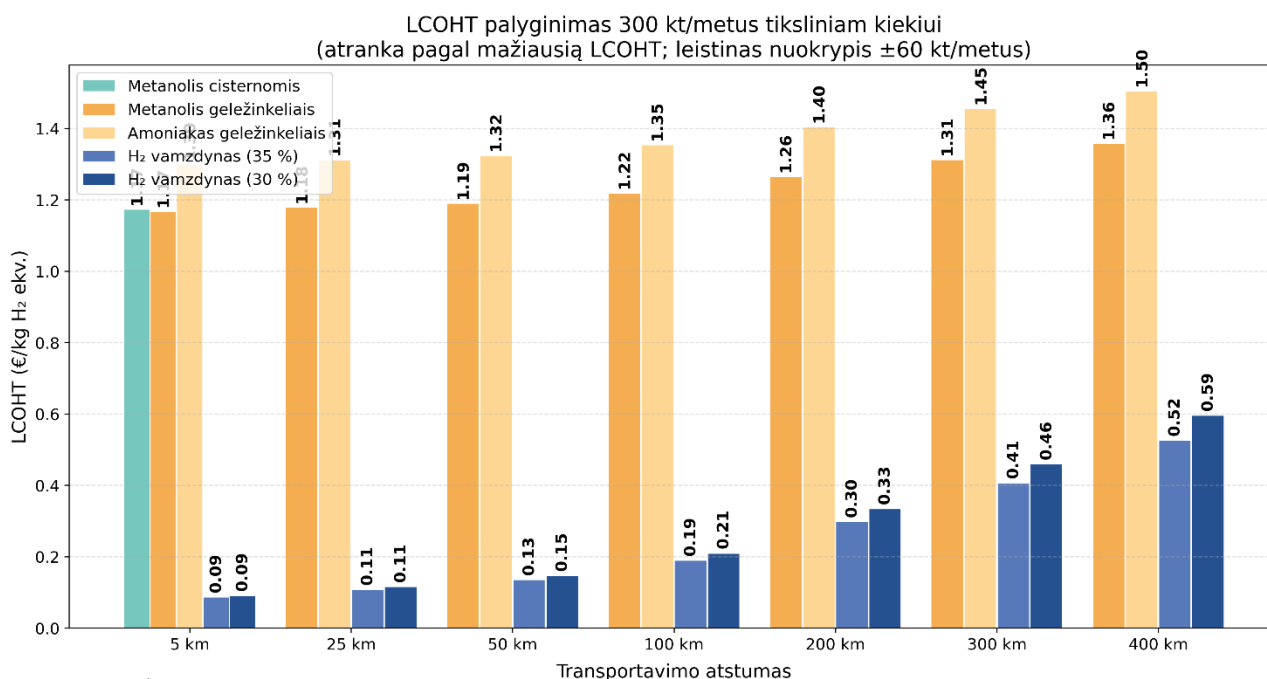


9 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 20 colių (95 proc. apkrova), vamzdynais 48 colių (25 proc. apkrova), suskystinto vandenilio cisternos, amoniako ir metanolio cisternos ir geležinkelis, esant 200 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 200 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)



10 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 48 colių (25/30/35 proc. apkrova), suskystinto vandenilio cisternos, metanolio cisternos ir amoniako bei metanolio geležinkelis, esant 250 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 250 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpų)

200–300 kt/metus diapazone amoniako ir metanolio transportavimo grandinių palyginimas aiškiai rodo, kad geležinkelis pradeda įgyti sisteminių pranašumą prieš autocisternų logistiką tuomet, kai transportuojami srautai tampa pakankamai dideli ir reguliarūs. Iš rezultatų matyti, kad būtent esant didesnėms apimtims geležinkelio scenarijai dažniausiai išlieka tarp pagrindinių nevamzdyninių alternatyvų. Tai leidžia daryti išvadą, kad 200–300 kt/metus scenarijuose geležinkelis tampa pagrindine sausumos logistikos grandine tiek amoniako, tiek metanolio transportavimui, o autocisternos labiau išlaiko papildančio sprendinio vaidmenį trumpesnėms distancijoms, mažesniems srautams ar nišinėms jungtims.



11 pav. Skirtingų vandenilio transportavimo technologijų LCOHT palyginimas: vamzdynais 48 colių (30/35 proc. apkrova), metanolio cisternos ir amoniako bei metanolio geležinkelis, esant 300 kt/metus kiekiui, 5-400 km atstumu (analizuojami tik tos technologijos, kurios pagal modelį patenkina 300 kt/m kiekį prie konkrečių atstumo atkarpu)

Pereinant prie labai stambių vandenilio gamybos projektų atvejų, kurie apima integruotus eksporto ar pramonės centrus, 250 ir 300 kt/metus grafikai rodo dar vieną aiškų pokytį. Čia vamzdynų LCOHT tampa itin žemas ir išlieka gerokai žemiau visų kitų alternatyvų visame nagrinėjamame atstumų diapazone. Be to, jautrumas atstumui tampa palyginti nedidelis, todėl sistema pradeda veikti jau nebe kaip pavienių maršrutų logistika, o kaip perdavimo tinklo infrastruktūrinė sistema.

Tuo pat metu labai aiškiai atsiskiria ir išvestinių produktų vaidmuo. 250–300 kt/metus grafikuose tarp ne vamzdyninių sprendinių ryškiausiai matomi geležinkelio variantai. Jų LCOHT išlieka aukštesnis už vamzdynų, tačiau jie tampa sistemiškai svarbūs kaip alternatyvi platforma tada, kai reikalinga ne pigiausia vandenilio ekvivalento galimybė, bet didelio krovinio, prekybinės logistikos, terminalų lankstumo ar galutinio produkto panaudojimo sprendimas.

Šis vertinimas negali apsiriboti vien pigiausia LCOHT reikšme. Svarbu žiūrėti ir į sisteminių adekvatumą. Vamzdynai reikalauja nuolatinio srauto, aukšto apkrovimo ir aiškios maršruto ašies, todėl fragmentuotoje rinkoje jų teorinis kainos pranašumas ne visada automatiškai reiškia geriausią investicinį sprendimą. Tačiau augant kiekiui mobilios vandenilio grandinės labai greitai susiduria su

mastelio riba, o išvestinių produktų logistika vis labiau diferencijuojasi į specializuotas nišas, ne kaip pigiausias vandenilio ekvivalento transportas, bet kaip funkciškai reikalinga prekybos, saugojimo ar galutinio produkto grandinė.

Žvelgiant į ateitį, šie rezultatai aiškiai patvirtina etapinės rinkos raidos logiką. Pirmajame etape, ties 5 kt/metus, svarbiausi tampa mobilūs sprendiniai, 200-500 bar suslėgto vandenilio transportavimas vidutiniuose ir ilgesniuose atstumuose, o mažo diametro vamzdynas išlieka stiprus tik labai trumpoje vietinio lygmens jungtyje. Antrajame etape, nuo maždaug 10 iki 30 kt/metus, gerai apkrautas 6 colių vamzdynas tampa stipriu ekonominiu sprendiniu, veikiantis kartu su mobiliąja logistika, ypač 500 bar puspriekabių transportu. Trečiajame etape, nuo 50 iki 200 kt/metus, jau akivaizdžiai dominuoja 20 colių skirstomojo tinklo logika, šiame etape mobilioji logistika greitai praranda savo pirminius pranašumus ir nebeįstengia aptarnauti padidėjusio kiekio, kur vienintelė mobili gryno vandenilio transportavimo alternatyva išlieka suskystintas vandenilis su aukštais kaštais. Ketvirtajame etape, 250–300 kt/metus zonoje, infrastruktūra pereina į stambių perdavimo sistemos koridorių ir eksporto centrų planavimo lygmenį. Čia taip pat išryškėja ir sustiprėja metanolio ir amoniako transportavimo geležinkeliu svarba. Išvestiniai produktai grafikuose atsiskleidžia ne kaip tiesioginiai pigiausio vandenilio ekvivalento transportavimo pakaitalai, o jų stiprybė išryškėja ten, kur svarbi prekyba, saugojimas, geležinkelio logistika ir galutinis produkto funkcionalumas. Pažymėtina ir tai, jog pačio produkto transportavimo kaštai yra apie 80 proc. mažesni nei vandenilio ekvivalento.

Apibendrinančios išvados

- 1) Nėra vieno universaliai geriausio vandenilio transportavimo būdo: optimalus sprendinys priklauso nuo metinio kiekio, atstumo, srauto pastovumo, infrastruktūros panaudojimo lygio, geografinės paklausos koncentracijos ir to, ar galutiniam vartotojui reikalingas grynas vandenilis, ar jo išvestinis produktas. Analizė aiškiai parodė, kad lemiamas veiksnys dažnai yra ne pati technologija, o jos apkrovimo režimas ir gebėjimas išlaikyti ekonomiškai pagrįstą veikimą konkrečiomis rinkos sąlygomis.
- 2) Mažų kiekių scenarijuose 5–10 kt/metus diapazonas nėra vientisas. Ties 5 kt/metus 6 colių vamzdynas išlieka ekonomiškai pagrįstas tik labai trumpose jungtyse, o didėjant atstumui konkurencingumas pereina mobilioms alternatyvoms: iki maždaug 25 km dar gali išlikti racionalus ir 200 bar suslėgto vandenilio transportavimas, tačiau vidutiniuose ir ilgesniuose atstumuose aiškiai išryškėja 500 bar puspriekabių pranašumas. Ties 10 kt/metus modelio LCOHT rezultatai jau rodo aiškų geriau apkrauto 6 colių vamzdyno ekonominį pranašumą, tačiau praktinėje tiekimo logikoje šiame etape vis dar išlieka reikšmingi ir mobilūs 200–500 bar sprendiniai, ypač tais atvejais, kai svarbus lankstumas, greitas veiklos pradėjimas, etapinis rinkos vystymas ar nenoras ankstyvoje stadijoje investuoti į ilgesnės trasos vamzdyninę infrastruktūrą. Be to ilgesniuose nuotoliuose lemiamais tampa ne vien vieneto kaštai, bet ir servitutų, trasos parengimo, leidimų, prijungimo mazgų, aplinkosauginių procedūrų bei ilgalaikės tinklo plėtros racionalumo klausimai.
- 3) 6 colių vamzdynas šiame modelyje veikia kaip lokalaus klasterio arba trumpos regioninės jungties infrastruktūra, o ne kaip pilnavertis perdavimo tinklas. Šis pasirinkimas ekonomiškai adekvatus ne tik ties 10 kt/metus, bet ir 20–30 kt/metus kiekių apimtyse, jei jo panaudojimo lygis pakankamai aukštas. Tai reiškia, kad mažo diametro vamzdyno racionalumas baigiasi ne tada, kai pasiekiamas iš anksto nustatytas kiekis, o tada, kai pradeda nebepakakti jo apkrovimo ir plėtros logikos.
- 4) Pereinamoji riba tarp skirstomojo ir perdavimo tinklo vamzdyno priklauso ne tik nuo transportuojamo kiekio, bet ir nuo numatomų ateities vystymosi tendencijų. 30 kt/metus lygis dar nebūtinai reiškia automatinį perėjimą į 20 colių perdavimo tinklo sprendinį, nes labai gerai apkrautas 6 colių vamzdynas šiame taške vis dar gali būti ekonomiškai stipresnis už menkai apkrautą didesnio diametro variantą. Vis dėlto tokio sprendimo racionalumas turi būti vertinamas ne vien pagal esamą srautą, bet ir pagal ilgalaikę rinkos augimo perspektyvą, nes vamzdyninė infrastruktūra projektuojama ilgam laikotarpiui, o vėlesnis perėjimas nuo 6 prie 20 colių diametro būtų techniškai, teritoriškai ir ekonomiškai sudėtingas. Todėl diametro pasirinkimas šiame etape tampa ne tik trumpalaikio ekonominio optimumo, bet ir strateginio tinklo vystymo klausimu. Aiškų 20 colių vamzdyno dominavimą modelio rezultatuose prasideda nuo 50 kt/metus ir išlieka iki maždaug 200 kt/metus.
- 5) Suslėgto vandenilio transportavimas 200 bar puspriekabėmis racionaliausias dažniausiai išlieka tik trumpiausiuose maršrutuose, apytikriai iki 25 km, ir esant mažiems transportuojamiems kiekiams iki 10 kt/metus, kai svarbios mažesnės pradinės investicijos ir paprastesnė logistinė grandinė. Didėjant atstumui ir ypač kiekiui virš maždaug 10–20 kt/metus, šios technologijos ekonominis konkurencingumas sparčiai silpnėja, nes neproporcingai auga reisų skaičius, vairavimo laikas, terminalinių operacijų poreikis ir

- reikalingo transporto parko mastas. Dėl to didesniuose atstumuose ir vidutiniuose ar didesniuose srautuose 200 bar sprendinys gana greitai pasitraukia iš ekonomiškai racionalių alternatyvų.
- 6) Suslėgto vandenilio transportavimas 500 bar puspriekabėmis išlieka stipriausia mobili gryo vandenilio alternatyva mažų kiekių ir trumpų bei vidutinių atstumų scenarijuose. Esant 5 kt/metus kiekiui, būtent ši technologija nuo maždaug 25 km tampa ekonomiškai stipriausia mobiliąja alternatyva, o 10–30 kt/metus diapazone dar išlaiko praktinę reikšmę kaip lankstus ir greitai įgyvendinamas sprendinys. Vis dėlto didėjant kiekiui jos vaidmuo vis labiau tampa antrinis gerai apkrauto vamzdyno atžvilgiu. 50–100 kt/metus scenarijuose 500 bar transportavimo grandinė modelyje dar gali būti atvaizduojama kaip techniškai įmanoma tam tikrose trumpų atstumų atkarpose, tačiau praktiškai jau nebegali būti laikoma ekonomiškai racionalia pagrindine transportavimo alternatyva.
 - 7) Suskystinto vandenilio transportavimas cisternomis modelio rezultatuose neužima dominuojančios ekonominės pozicijos ir visuose scenarijuose nepatenka tarp mažiausių kaštų alternatyvų. Tai rodo, kad ši technologija šiame vertinime nėra racionalus pereinamasis sprendinys tarp mobiliųjų suslėgto vandenilio grandinių ir vamzdyno infrastruktūros. Vis dėlto ji išlieka specializuota ir strategiškai reikšminga alternatyva tais atvejais, kai būtina mobili gryo vandenilio tiekimo forma vidutiniais ar didesniais atstumais turint didelį vandenilio kiekį, o prioritetas teikiamas ne minimaliam LCOHT, bet pačiai tiekimo formai ir techniniam įgyvendinamumui.
 - 8) Amoniakos ir metanolio grandinės pagal vandenilio ekvivalento LCOHT dažniausiai išlieka brangesnės už tiesioginį vandenilio transportavimą vamzdynais, tačiau jų vaidmuo didėja tada, kai mobilioji gryo vandenilio logistika pasiekia mastelio ribą. Jos tampa pagrindinėmis ne vamzdyninėmis alternatyvomis, ypač turint didelius transportuojamo vandenilio kiekius.
 - 9) Amoniakas išlieka svarbus ten, kur aktuali tarptautinė prekyba, centralizuoti dideli kiekiai ir galutinis panaudojimas chemijos ar trąšų sektoriuose. Jei nereikia pilnos atgalinės konversijos į gryną vandenilį galutiniame panaudojimo taške, jo ekonominis patrauklumas yra kur kas didesnis nei rodo vandenilio ekvivalento LCOHT. Tačiau kartu išlieka logistika su savitais iššūkiais: saugos, toksiškumo ir visuomeninio priėmimo.
 - 10) Metanolis savo ruožtu išlieka vienas patogiausių išvestinių produktų analizuojamose logistikos grandinėse, nes yra skystis aplinkos sąlygomis ir gali būti transportuojamas brandžia infrastruktūra. Jis aiškiai išsiskiria kaip svarbi nevamzdyninė alternatyva tais atvejais, kai vandenilį reikia transportuoti didesniais atstumais ir didesniais kiekiais, nes jo ekonominį patrauklumą lemia ne tik vandenilio nešiklio funkcija, bet ir galimybė metanolį tiesiogiai naudoti kaip galutinį produktą pramonėje.
 - 11) Didėjant transportuojamiems kiekiams, geležinkelis amoniako ir metanolio logistikos grandinėse pradeda įgyti aiškų sisteminių pranašumą prieš autocisternų logistiką. Pasiėkus 100–300 kt/metus kiekius būtent transportavimas geležinkeliu išlieka kaip pagrindinė ekonomiškai racionalė alternatyva sausumos kelių logistikoje, o autocisternų scenarijai, didėjant srautui, palaipsniui praranda konkurencingumą dėl ribotų mastelio galimybių. Todėl tokia kiekių lygyje autocisternos jau labiau atlieka papildančios, o ne pagrindinės logistikos funkciją.
 - 12) Nuo maždaug 200 kt/metus transportavimo sistema pereina į strateginės vandenilio perdavimo infrastruktūros planavimo lygmenį. Šiame etape labai aukštu panaudojimo lygiu

- eksploatuojamas vamzdynas generuoja itin žemas vieneto sąnaudas, todėl sprendimas jau nebėra vien klausimas, ar vamzdynas yra ekonomiškai pagrįstas. Pagrindiniu pasirinkimu tampa infrastruktūros mastas, jos diametras ir suderinamumas su numatoma ilgalaikė rinkos bei teritorinės plėtros trajektorija.
- 13) Didžiausio diametro (48 colių) vamzdynas modelyje išryškėja kaip ateities perdavimo tinklo infrastruktūros sprendinys. Esant 200 kt/metus srautui jis dar ne pilnai atitinka trumpalaikių kaštų minimumą, tačiau išlieka ekonomiškai labai konkurencingas. Tai rodo, kad tam tikromis sąlygomis didesnio diametro pasirinkimas gali būti pagrįstas ne vien esamo srauto optimizavimu, bet ir ilgalaikės rinkos augimo perspektyva, kai siekiama iš anksto sukurti pajėgumų rezervą būsimiems srautams.
 - 14) Ties 250–300 kt/metus transportavimo sistema pereina į stambių pramoninių centrų ir eksporto koridorių planavimo logiką. Šiame etape vamzdynai tampa pagrindine sisteminė infrastruktūros ašimi, o nevamzdyninės mobilios alternatyvos įgyvendinamos per amoniako ir metanolio geležinkelio grandines. Todėl sprendimų priėmimas šiame lygyje grindžiamas jau nebe pavienių logistikos grandžių optimizavimu, bet visos tiekimo sistemos architektūra, jos funkcinėmis rolėmis ir ilgalaikės plėtros kryptimi.
 - 15) Modelis patvirtina etapinės rinkos raidos logiką. Pirmajame etape, ties 5 kt/metus, pagrindinį vaidmenį atlieka mobilūs sprendiniai: 200 ir 500 bar suslėgto vandenilio transportavimas išlieka svarbiausias vidutiniuose ir ilgesniuose atstumuose, o 6 colių vamzdynas ekonomiškai pagrįstas tik labai trumpose vietinio lygmens jungtyse. Antrajame etape, nuo maždaug 10 iki 30 kt/metus, gerai apkrautas 6 colių vamzdynas tampa stipriu ekonominiu sprendiniu, tačiau vis dar veikia kartu su mobiliąja logistika, ypač 500 bar puspriekabių transportu. Trečiajame etape, nuo 50 iki 200 kt/metus, aiškiai išryškėja 20 colių perdavimo tinklo vamzdyno dominavimas: šiame lygyje mobilios suslėgto vandenilio grandinės jau praranda praktinį konkurencingumą, o vienintele techniškai racionalia mobiliąja gryno vandenilio alternatyva išlieka suskystintas vandenilis, nors ir pasižymintis aukštais kaštais. Ketvirtajame etape, nuo 200 kt/metus ir daugiau, sistema pereina į stambių perdavimo koridorių, eksporto centrų ir pramoninių centrų planavimo lygmenį. Šiame etape sustiprėja ir metanolio bei amoniako geležinkelio grandinių reikšmė, tačiau jų vaidmuo atsiskleidžia ne kaip tiesioginių pigiausių vandenilio ekvivalento pakaitalų, o kaip funkcionalių prekybos, saugojimo, geležinkelio logistikos ir galutinio produkto panaudojimo grandinių.
 - 16) Analizė rodo, kad vandenilio rinkos plėtra neturėtų būti grindžiama vienos technologijos dominavimo prielaida. Racionaliausias kelias yra ne vieno universalaus sprendinio paieška, bet tarpusavyje derinamų infrastruktūrinių ir logistinių grandinių formavimas pagal konkrečią rinkos brandą, srautų mastą, transportavimo atstumą ir galutinio panaudojimo pobūdį. Tai reiškia, kad mobilios gryno vandenilio grandinės, vamzdynai, metanolio ir amoniako tiekimo sprendiniai bei geležinkelio logistika turėtų būti vertinami kaip vienas kitą papildantys elementai, o ne kaip absoliučiai tarpusavyje konkuruojančios alternatyvos.
 - 17) Ilgalaikėje perspektyvoje transportavimo logistika turėtų būti planuojama ne kaip pavienių srautų nukreipimas į galutinį tašką, o kaip tarpusavyje susietų koridorių ir konsolidavimo mazgų sistema. Kelių transportas išlieka svarbus teritoriniam surinkimui ir lankstumui užtikrinti, tačiau vamzdynai ir geležinkelis įgauna strateginę reikšmę tada, kai gali perimti didesnius, reguliariesnius ir ilgesnio nuotolio srautus, taip mažindami priklausomybę nuo didelio masto kelių logistikos. Ši logika ypač svarbi toms tiekimo grandinėms, kurių

ekonominis efektyvumas jautriai priklauso nuo transporto rūšies ir kurios geriausiai veikia remdamosi struktūruota masine logistika. Todėl ilgalaikė vidaus ir eksporto sistema turėtų būti formuojama ne vien aplink pavienius paklausos taškus, bet ir aplink vidaus konsolidavimo mazgus, jungiančius kelių transportą su vamzdynų ir geležinkelio koridoriais.

- 18) Absoliutūs LCOHT dydžiai turi būti interpretuojami atsargiai. Supaprastinto techno-ekonominio vertinimo tipo analizė labai gerai atskleidžia skirtingų alternatyvų santykinę konkurencingumą, tačiau ji gali nepakankamai tiksliai atspindėti visas realaus projekto sąnaudas ir įgyvendinimo rizikas. Visų pirma, tokio tipo modeliai paprastai ribotai įvertina projektavimo, teritorijų planavimo, servitutų ir žemės paėmimo, trasos parengimo, prijungimo mazgų, terminalų integracijos, leidimų gavimo, aplinkosauginių ir saugos reikalavimų, vietos bendruomenių priimtumo, statybos grafiko, rangos rizikų, infliacijos, finansavimo sąlygų, rezervinių pajėgumų poreikio, realių eksploatavimo sutrikimų bei kitų projektui specifinių fiksuotų ar pusiau fiksuotų sąnaudų reikšmę. Dėl šios priežasties ypač trumpų atstumų scenarijuose modelio rezultatai turėtų būti vertinami pirmiausia kaip strateginės krypties ir santykinio konkurencingumo indikatorius, o ne kaip galutinis investicinis tarifas ar tiesiogiai taikytina projekto sąmata.