

ВОДОРОДЪТ КАТО ГОРИВО ЗА МОРСКИ ТРАНСПОРТ НА КЪСИ РАЗСТОЯНИЯ.

ЧАСТ 2: ЕКОЛОГИЧНА И ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА, БЕЗОПАСНОСТ, РЕГУЛАТОРНА РАМКА И МНОГОКРИТЕРИАЛНА РАМКА ЗА ОЦЕНКА НА ПРИЛОЖИМОСТТА

Инж. Калоян Вангелов

Технически университет - Варна

Резюме: Тази статия е втора част от изследване върху приложимостта на водорода като корабно гориво при морския транспорт на къси разстояния. Извършена е оценка по “целия жизнен цикъл на горивото” (well-to-wake), която показва, че при сертифициран нисковъглероден произход на водорода намалението на емисиите може да надхвърли 80% спрямо референтния дизелов вариант. Систематизирани са основните икономически показатели на водородните енергийни системи – приравнена себестойност на водорода, капиталови и оперативни разходи, обща стойност на притежание – в съпоставка с конвенционалните и алтернативните варианти при отчитане на въздействието на Европейската методика за търговия с емисии и на Регламента FuelEU Maritime. Разгледани са концепцията за безопасност, методите за идентифициране на опасностите и за количествена оценка на риска, както и състоянието на регулаторната рамка на ИМО, Европейския съюз и класификационните организации. Формулирана е многокритериална рамка за оценка на приложимостта на водорода при конкретен маршрут, включваща четиринадесет критерия в пет групи с обобщен индекс на приложимост. Рамката е приложена илюстративно към условен маршрут в западната част на Черно море, като са изведени критичните ограничения, чието преодоляване е предпоставка за успешно внедряване.

Ключови думи: водород; морски транспорт на къси разстояния; оценка по жизнен цикъл; обща стойност на притежание; FuelEU Maritime; безопасност; регулаторна рамка; многокритериален анализ

HYDROGEN AS A FUEL FOR SHORT SEA SHIPPING.

PART 2: ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASSESSMENT, SAFETY, REGULATORY FRAMEWORK AND MULTI-CRITERIA APPLICABILITY ASSESSMENT

Eng. Kaloyan Vangelov

Technical University - Varna

Abstract: This paper is the second part of a study on the applicability of hydrogen as a marine fuel in short sea shipping. An environmental well-to-wake assessment is carried out, showing that when hydrogen has a certified low-carbon origin, the reduction of life-cycle emissions exceeds 80% compared with a reference diesel system. The economic indicators of

hydrogen energy systems – levelized cost of hydrogen, capital and operating expenditures, total cost of ownership – are systematised in comparison with conventional and alternative options, taking into account the impact of the EU Emissions Trading System and the FuelEU Maritime regulation. The safety concept, the methods for hazard identification and quantitative risk assessment, as well as the state of the regulatory framework of the IMO, the European Union and the classification societies are examined. A multi-criteria framework for assessing the applicability of hydrogen on a specific route is formulated, comprising fourteen criteria in five groups with a formalised composite index. The framework is applied illustratively to a hypothetical route in the western Black Sea, identifying the critical areas that must be addressed for successful implementation is a precondition for successful implementation.

Keywords: *hydrogen; short-sea shipping; life cycle assessment; total cost of ownership; FuelEU Maritime; safety; regulatory framework; multi-criteria analysis*

1 Въведение

Първата част на това изследване систематизира технологичните предпоставки за използване на водорода като корабно гориво при морски транспорт на къси разстояния: производствени методи според въглеродния им интензитет, формите за съхранение на борда, типове горивни клетки и натрупания демонстрационен опит, заедно с аналитичните зависимости за предварително оразмеряване на корабна водородна енергийна система. Основният извод от първата част е, че при кораби с мощност от стотици киловати до няколко мегавата, хибридната система горивна клетка–батерия с компресирано съхранение на водорода представлява най-напредналото техническо решение, потвърдено в търговска експлоатация [8, 11, 36].

Техническата осъществимост е необходимо, но не и достатъчно условие за внедряване. Решението за преминаване към водородно гориво при конкретна линия изисква многокритериална оценка, в която наред с техническите съображения трябва да се отчетат екологичните показатели по целия жизнен цикъл на горивото, икономическата оценка с отчитане на регулаторните механизми, изискванията за безопасност при превоз на пътници и работа в пристанищна среда, състоянието на нормативната уредба и капацитетът за подготовка на екипажи и брегови персонал [9, 10, 19]. Публикуваните изследвания разглеждат тези измерения предимно поотделно – оценки по жизнен цикъл [7, 37, 39], технико-икономически анализи [1, 24, 31], изследвания на безопасността [20, 29, 34], прегледи на регулаторната рамка [10, 13, 38], – докато интегрираните подходи, позволяващи съпоставима оценка на конкретни маршрути, остават сравнително редки [30].

Целта на втората част на анализа е да допълни съществуващите изследвания, като: (1) систематизира екологичните и икономическите показатели на водородните корабни енергийни системи в съпоставка с алтернативните варианти; (2) анализира концепцията за безопасност и състоянието на регулаторната рамка; (3) формулира многокритериална рамка за оценка на приложимостта на водорода при конкретен маршрут с обобщен индекс на приложимост; (4) приложи рамката илюстративно към условен маршрут в западната част на Черно море.

В статията раздел 2 представя екологичната оценка, раздел 3 – икономическата оценка, раздел 4 разглежда безопасността, раздел 5 – регулаторната рамка, раздел 6 извежда оценъчната рамка и илюстративното ѝ прилагане и раздел 7 обобщава изводите.

2 Екологична оценка по жизнен цикъл

2.1 Методът „оценка по целия жизнен цикъл на горивото”

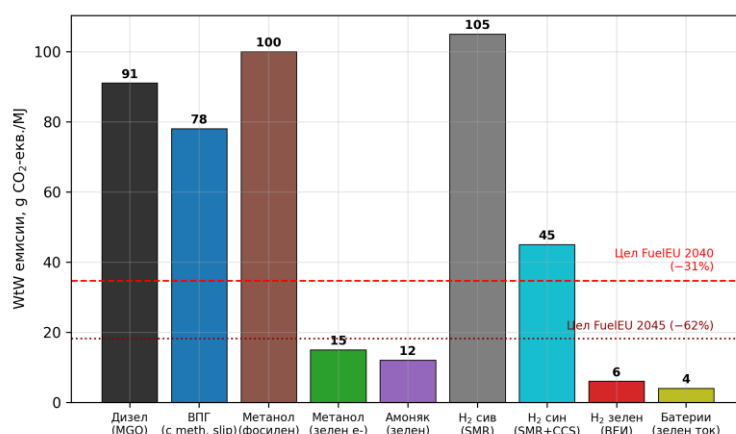
Коректното сравнение на корабните горива изисква отчитане на емисиите по целия жизнен цикъл на горивото – от добива на първичния енергиен ресурс, през производството, преработката и транспорта, до крайното преобразуване на борда. Този подход, обозначаващ като „оценка по целия жизнен цикъл на горивото” (well-to-wake, WtW), е възприет както в ревизираната стратегия на ИМО от 2023 г., така и в Регламента FuelEU Maritime [6], и измества по-тесния подход „емисии при използване на борда” (tank-to-wake, TtW), отчитащ единствено емисиите на борда [10, 13, 38]. Разграничението е от съществено значение именно за водорода: при използване в горивни клетки той няма никакви въглеродни емисии на борда, за разлика от пълният профил на емисиите от производствената и логистична верига [7, 31, 39].

Балансът на емисиите по WtW може да се формализира като сума от емисионните приноси на отделните звена:

$$E_{WtW} = E_{пр} + E_{тр} + E_{прб} + E_{TtW} \quad (1)$$

където: $E_{пр}$ са специфичните емисии при производството на горивото, $g\ CO_2\text{-екв.}/MJ$; $E_{тр}$ – емисиите при транспорта и разпределението; $E_{прб}$ – емисиите при преработката и промяната на агрегатното състояние (компресиране, втечняване); E_{TtW} – емисиите при преобразуването на борда. При водород, използван в горивно клетъчна система, емисиите при преобразуването на борда са нулеви по отношение на CO_2 , а останалите членове зависят от конкретната верига [7, 39].

Прилагането на (1) към основните горивни варианти е представено на Фиг. 1. Стойностите са систематизирани по данни от оценките по жизнен цикъл в литературата [7, 16, 33, 37, 38] и илюстрират основния извод: зеленият водород и акумулаторните системи с електроенергия от възобновяеми източници постигат WtW интензитет под $10\ g\ CO_2\text{-екв.}/MJ$, синият водород заема междинно положение, а сивият водород надхвърля референтния дизелов вариант – обстоятелство, което прави производствения произход определящ за екологичния смисъл на прехода.



Фиг. 1. Въглероден интензитет по жизнения цикъл на корабните горивни варианти. За ВПГ е отчетено изпускането на неизгорял метан

2.2 Резултати от оценките по жизнен цикъл в литературата

Количествените оценки по жизнен цикъл за водородни плавателни средства съвпадат в основните си изводи. Wang, *et al.* [39] разработват рамка за количествена оценка на жизнения цикъл на водородните кораби и чрез изследване на конкретен случай показват, че при зелен водород намалението на емисиите по WtW надхвърля 80–90% спрямо референтния дизелов вариант, докато при сив водород емисионният ефект е пренебрежим или неблагоприятен. Сравнителното изследване на Wang and Aung [37] за водороден плавателен съд спрямо конвенционална енергийна система потвърждава определящата роля на производствения произход. Evers, *et al.* [7] анализират въглеродния отпечатък на водородния вътрешноводен транспорт и установяват, че критичните звена на веригата са електроенергийният микс при електролизата и енергоемкостта на компресирането и втечняването. Knight, *et al.* [18] допълват тези резултати с приложен анализ на технологични методи за производство за кораби от вътрешноводния транспорт, а оценката на Kanz, *et al.* [16] за океански превози с течен водород показва, че транспортният етап от веригата може да добави съществен въглероден отпечатък при неоптимизирани вериги.

За практиката на късите маршрути от тези изследвания произтичат три оперативни извода. Първо, доставката на водород следва да фиксира сертифициран производствен произход (гаранции за произход, съответствие с изискванията за възобновяеми горива от небиологичен произход), тъй като екологичният ефект на проекта зависи от него. Второ, енергията за компресиране (10–15% от енергийното съдържание на горивото) или за втечняване (25–35%) трябва да бъде включена в баланса и по възможност осигурена от възобновяеми източници на място. Трето, късата логистична верига при локално производство води до по-благоприятен профил на емисиите по WtW спрямо доставяния отдалеч водород – съществен аргумент в полза на локалното пристанищно производство на водород [21, 26, 31].

2.3 Локални замърсители и значение за крайбрежните райони

Освен парниковите газове, преминаването към водородни горивни клетки практически свежда до нула емисиите на серни оксиди, азотни оксиди и прахови частици – замърсители с пряко въздействие върху здравето на населението в пристанищните градове [12, 40]. Фериботите, пътническите плавателни съдове и пристанищните влекачи оперират в непосредствена близост до населени места, като съществена част от емисиите им се генерира по време на престой, маневриране и заставане на кей. Замяната на дизеловите спомагателни двигатели с горивни клетки премахва съответните локални емисии в пристанищната зона – ефект, потвърден от Inal, *et al.* [15] за кораб за генерални товари и в оценките за пристанищните влекачи [24]. Прегледът на вариантите за декарбонизация на пристанищата на Holder, *et al.* [12] посочва водородните технологии като една от малкото групи решения, които могат едновременно да обслужват корабите, пристанищната механизация и тежкотоварния наземен транспорт, със системен ефект върху качеството на въздуха в целия пристанищен район.

2.4 Съпоставка с алтернативните корабни горива

За пълна екологична оценка е необходимо водородът да бъде съпоставен с останалите нисковъглеродни варианти за сегмента на късите разстояния. За втечнения природен газ е изградена най-развитата алтернативна инфраструктура за бункерование, но потенциалът му за декарбонизация е ограничен: намалението на въглеродните емисии при изгаряне е 20–25% спрямо дизеловото гориво, а изпускането на неизгорял метан по веригата и в двигателя – парников газ с многократно по-висок потенциал за глобално затопляне от въглеродния диоксид – може да намали или дори да неутрализира положителния ефект по WtW [3, 33]. Поради това втечненият природен газ следва да се разглежда като преходна стъпка, чийто опит в правилата, процедурите и подготовката на персонала е преносим към водорода, а не като негов дългосрочен заместител [17, 38].

Амонякът не съдържа въглерод и при изгаряне не отделя CO₂ с по-лесна за организиране логистична верига в сравнение с водорода и се очертава като предпочитан вариант за океанското корабоплаване, но острата му токсичност, разяждащо действие и рисковете от емисии на диазотен оксид – парников газ с потенциал за глобално затопляне 265 пъти над този на въглеродния диоксид – ограничават приложимостта му при пътнически кораби и за гъсто населени пристанищни райони, тоест именно за средата на късите маршрути [33, 34, 35].

Метанолът е течно, лесно за съхраняване и обработка гориво с бързо нарастващ обем от поръчки за контейнеровози. Неговото ограничение е, че съдържа въглерод и екологичната му обоснованост зависи изцяло от достъпа до възобновяем или биогенен въглероден диоксид при синтеза, което ограничава мащаба на производство на действително нисковъглеродния метанол [3, 33, 35].

Акумулаторните системи постигат най-нисък WtW интензитет при електроенергия от възобновяеми източници и доминират при късите маршрути с чести престои и мощна брегова зарядна инфраструктура; с нарастване на дължината на маршрута и на енергийната потребност масата и обемът на батериите нарастват непропорционално и водородът се очертава като по-подходящ вариант [28, 30]. В този

смисъл водородът и батериите не се конкурират, а заемат съседни области в спектъра от решения за нулеви емисионни на борда, като хибридните системи съчетават предимствата им. Горната граница на приложимостта на водорода по размер на кораба също е предмет на изследване: оценката за круизен кораб показва, че при големите пътнически кораби водородът е приложим предимно за покриване на битовото и спомагателното натоварване, докато пълното водородно захранване остава ограничено от обемния баланс [22] – още едно потвърждение, че най-подходящата област на приложение на технологията при текущото ѝ състояние са именно корабите на къси маршрути. Изложените съображения са систематизирани в Таблица 1.

Таблица 1
Съпоставка на горивните варианти за морски транспорт на къси разстояния

Показател	Водород (горивни клетки)	ВПП	Дизел	Амоняк	Метанол	Батерии
Емисии на CO ₂ при работа на борда	няма при горивно клетъчна система	-20–25%	база	няма	ограничено намаление при фосилен метанол	няма
Потенциал по WtW при нисковъглероден произход	много висок	нисък	не е приложимо	висок (при контрол на N ₂ O)	висок само при е-метанол или биометанол	много висок
Локални замърсители	няма при горивно клетъчна система	ниски	високи	NO _x ; токсичност	ниски	няма
Токсичност	ниска	ниска	средна	много висока	средна	не е приложимо
Зрялост на бункероване	начална	развита	напълно развита	начална	развиваща се	развита
Пригодност за пътнически съдове на къси линии	висока	средна	(изходна база)	ниска	средна	висока при най-къси линии

3 Икономическа оценка

3.1 Себестойност на водорода и енергиен паритет с дизеловото гориво

Икономическата ефективност на водородния плавателен съд в значителна степен се определя от цената на горивото. В литературата текущата цена на зеления водород в Европа се оценява в диапазона 4÷8 EUR/kg, синият – 2÷4 EUR/kg, а сивият – 1÷2,5 EUR/kg [5, 31]. Прогнозите на DNV предвиждат изравнена себестойност на зеления водород под 3 EUR/kg в региони с благоприятен възобновяем ресурс през тридесетте години на века.

Съпоставката с дизеловото гориво може да се извърши чрез енергийния паритет при отчитане на ефективността на преобразуването. Цената на единица полезна енергия на вала е:

$$c_{\text{вал}} = \frac{c_{\text{гориво}}}{\eta \cdot LHV} \quad (2)$$

където: $c_{\text{гориво}}$ е цената на горивото, EUR/kg; η – коефициент на полезно действие (КПД); LHV – долната топлина на изгаряне, kWh/kg. При КПД на горивно клетъчната система 0,50 и КПД на дизеловата уредба 0,42 и при цена на дизеловото гориво 700 EUR/t, енергийният паритет по (2) настъпва при цена на водорода около 2,9 EUR/kg без отчитане на въглеродното ценообразуване. Включването на разходите за квоти по Европейската методика за търговия с емисии и на санкционния механизъм по FuelEU Maritime измества прага на паритет към 4–5 EUR/kg в хоризонта на 2030 г. – равнище, съпоставимо с прогнозните цени на зеления водород за същия период [1, 5, 31].

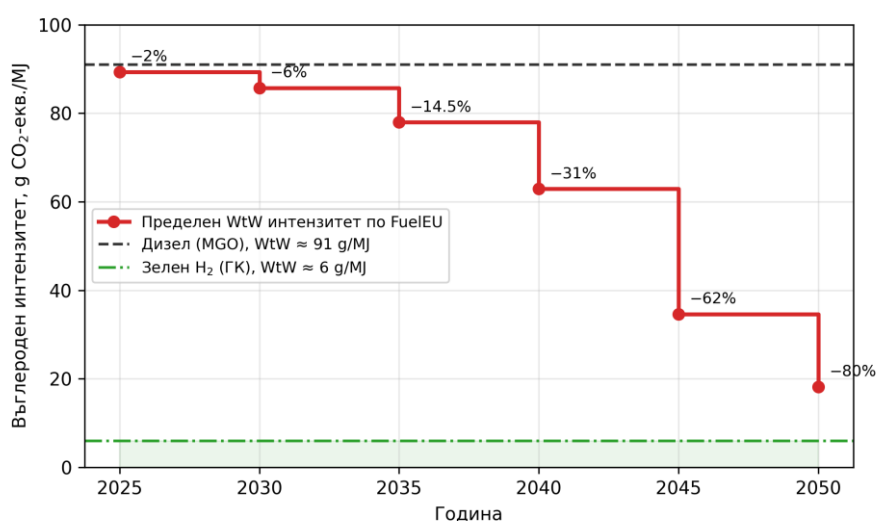
3.2 Регулаторно ценообразуване: EU ETS и FuelEU Maritime

Регулаторните механизми на Европейския съюз увеличават разходите за използване на конвенционални горива. Санкцията по FuelEU Maritime при превишаване на пределния въглероден интензитет може да се представи в опростен вид като:

$$C_{\text{FuelEU}} = \max\left(0; \frac{CI_{\text{д}} - CI_{\text{цел}}}{CI_{\text{д}}}\right) \cdot \frac{E_{\text{год}}}{41\,000} \cdot 2\,400 \quad (3)$$

където: $CI_{\text{д}}$ е действителният среден въглероден интензитет на използваната на борда енергия, g CO₂-екв./MJ; $CI_{\text{цел}}$ – пределната стойност за съответния период; $E_{\text{год}}$ – годишната използвана енергия, MJ; 41 000 MJ/t – енергийният еквивалент на един тон VLSFO; 2 400 EUR – базовата санкция за тон енергиен еквивалент. Пределната стойност $CI_{\text{цел}}$ следва низходяща стъпаловидна траектория, представена на Фиг. 2: от –2% спрямо референтната стойност 91,16 g CO₂-екв./MJ през 2025 г. до –80% през 2050 г.

Фигурата откроява структурната логика на регламента: дизеловото гориво покрива изискванията до около 2030 г., след което разликата между действителния и пределния интензитет – и съответно санкцията по (3) – нараства стъпаловидно. Зеленият водород, напротив, остава под кривата на пределните стойности през целия период до 2050 г., а като възобновяемо гориво от небиологичен произход се ползва и от коефициент 2 при отчитането до 2033 г. [1, 13]. Допълнителен разходен фактор е Европейската методика за търговия с емисии, която от 2024 г. обхваща морския транспорт и добавя разход за всеки тон емитиран CO₂ с пазарната цена на квотите. Комбинираният ефект на двата механизма е, че ценовата разлика между дизеловото гориво и нисковъглеродните алтернативи се стеснява предвидимо, което позволява финансовото моделиране на прехода да се извършва при относително предвидими допускания.



Фиг. 2 Траектория на пределния въглероден интензитет по FuelEU Maritime в съпоставка с дизеловото гориво и зеления водород

3.3 Капиталови и оперативни разходи. Общи разходи за експлоатация.

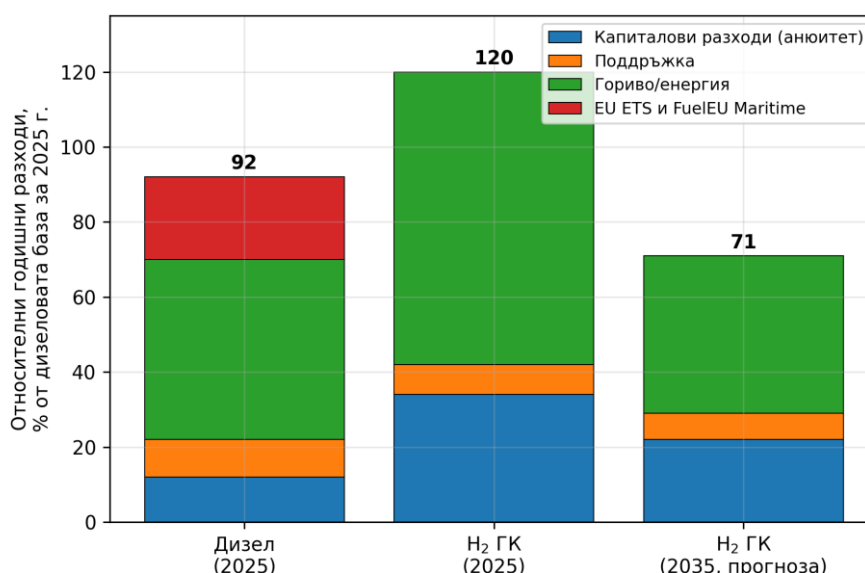
Специфичните капиталови разходи на корабните PEM горивно клетъчни системи понастоящем са от порядъка на 1500–3000 EUR/kW – няколко пъти по-високи от тези на дизеловите агрегати (250–400 EUR/kW), – към което се добавят водородните резервоари (800–1500 EUR за килограм съхраняван водород при композитни резервоари за съхранение под високо налягане) и акумулаторната батерия на хибридната система [8, 9]. Прогнозите очертават устойчиво намаление: серийното производство за автомобилния и тежкотоварния сектор понижава разходите и при корабните приложения, като се очаква специфичен капиталов разход под 1000 EUR/kW към 2030 г. [5, 8, 9]. По отношение на оперативните разходи горивните клетки се отличават с по-малко движещи се части и по-ниска потребност от поддръжка, но изискват периодична подмяна на горивно клетъчните стекове – при съвременен експлоатационен ресурс над 30 000 часа това означава един до два цикъла на подмяна за живота на съда [8, 9]

Обобщаващият показател за съпоставка е общата стойност на притежание (total cost of ownership, TCO), формализирана чрез нетната настояща стойност на потоците от разходи:

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_t + C_{\text{гориво},t} + C_{\text{рег},t}}{(1+r)^t} \quad (4)$$

където: $CAPEX$ са първоначалните капиталови разходи, EUR; $OPEX_t$ – оперативните разходи през година t (поддръжка, подмяна на стекове); $C_{\text{гориво},t}$ – разходите за гориво или енергия; $C_{\text{рег},t}$ – регулаторните разходи (квоти по EU ETS, санкции по FuelEU Maritime); r – дисконтовата норма; N – разглежданият експлоатационен период, години.

Структурата на годишните разходи по (4), нормирана спрямо референтния дизелов вариант за 2025 г., е съпоставена на Фиг. 3 за три конфигурации: дизелова уредба при текущи условия, водородна горивно клетъчна система при текущи цени и същата система при прогнозните условия за 2035 г. Съпоставката се основава на диапазоните, докладвани в технико-икономическите оценки [1, 9, 23, 24, 28, 30], и има илюстративен характер.



Фиг. 3 . Илюстративна структура на относителните годишни разходи: дизелова уредба (2025 г.), водородна горивно клетъчна система (2025 г.) и прогнозна водородна система (2035 г.), нормирани спрямо референтния дизелов вариант

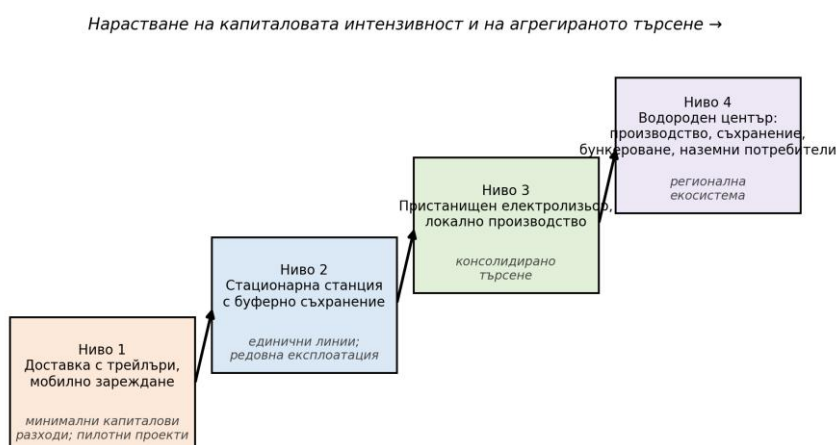
Фигурата откроява три обстоятелства. Първо, при текущи условия водородната система е с около 20% по-висок общ годишен разход, формирана предимно от цената на горивото и от капиталовите разходи. Второ, при дизеловата уредба вече възниква съществен регулаторен разход, който по траекторията на Фиг. 2 ще нараства стъпаловидно. Трето, при прогнозните условия за 2035 г. – поевтинял зелен водород, понижени капиталови разходи, пълна тежест на регулаторните механизми върху дизела – водородната система достига по-ниско разходно равнище от референтния дизелов вариант. Публикуваните оценки за конкретни съдове – пристанищния влекач HyForce [24], преоборудването на Ro-Pax линии [1, 23], фериботните проектни разработки [4, 28, 30] – съвпадат в основните си изводи, че разходният паритет може да бъде достигнат в рамките на текущия инвестиционен цикъл, а публичните механизми за подпомагане покриват значителна част от разликата през преходния период [19].

Числов пример илюстрира прилагането на (2)–(4) към пътнически съд от разглеждания клас. При дневна енергийна потребност 2880 kWh на вала (по примера от първата част на изследването), 350 експлоатационни дни годишно и ефективност на горивно клетъчната система 0.50, годишното потребление на водород по енергийния баланс възлиза на около 60,5 t. При цена на зеления водород 6 EUR/kg годишният разход

за гориво е около 363 хил. EUR; при прогнозна цена 3 EUR/kg – около 181 хил. EUR. Еквивалентната дизелова уредба с ефективност 0,42 изразходва около 246 t гориво годишно, което при 700 EUR/t дава 172 хил. EUR преки горивни разходи; към тях обаче се добавят разходите по Европейската методика за търговия с емисии (при 3,2 t CO₂ на тон гориво и цена на квотите 80 EUR/t – около 63 хил. EUR годишно) и нарастващата по траекторията от Фиг. 2 санкция по (3), която за периода след 2035 г. става съизмерима с преките горивни разходи. Съпоставката потвърждава качествения извод от Фиг. 3: при текущи цени водородният вариант е по-скъп, при прогнозните условия за средата на тридесетте години съпоставката се изменя в полза на водородния вариант.

3.4 Брегова инфраструктура и агрегиране на търсенето

Бреговата инфраструктура е най-капиталоемкият елемент на водородния проект и определя неговата организационна сложност. Нивата на инфраструктурна готовност образуват естествена последователност, представена на Фиг. 4 от автомобилна доставка на компресиран водород и мобилно зареждане през стационарна станция с буферно съхранение и пристанищен електролизьор до развит пристанищен водороден център с производство, съхранение, бункерование и снабдяване на разнородни потребители [12, 26, 27, 32].



Фиг. 4. Нива на готовност на бреговата инфраструктура за снабдяване с водород

Опитът на реализираните проекти показва, че началните нива могат да бъдат реализирани с мобилни решения – MV Sea Change и демонстрационният съд с мощност 500 kW са зареждани по този начин, – но устойчивата редовна експлоатация изисква преход към стационарна инфраструктура [11, 36]. Оптимизационните модели за пристанищни водородни системи установяват, че икономическата жизнеспособност на инфраструктурата зависи от съчетаването на няколко групи потребители: фериботната линия изпълнява ролята на основен потребител, около който се добавят пристанищната техника, наземният транспорт и прилежащата индустрия. Бункероването на компресиран водород при типичните за късите маршрути количества (стотици килограми) се

извършва за десетки минути и може да бъде съвместено с нощните или обедните престои на фериботните разписания.

4 Безопасност

4.1 Свойства на водорода и произтичащи рискове

Водородът има специфичен рисков профил, съществено различен от този на конвенционалните корабни горива. Определящите свойства са широките граници на запалимост (4–75 об.% във въздух), минималната енергия на запалване от порядъка на 0,02 mJ – десетократно по-ниска от тази на метана и бензиновите пари – и високата скорост на разпространение на пламъка [17, 20, 34]. Тези характеристики могат да доведат до по-висок риск в затворени обеми в сравнение с метана, ако не са осигурени подходяща вентилация и детекция. Същевременно изключително ниската му плътност (около 14 пъти по-лека от въздуха) и високата дифузивност водят до бързо издигане и разсейване при изтичане в открити или добре вентилирани пространства – свойство, което при подходящо проектиране се превръща в предимство по отношение на безопасността. Специфичен за течния водород е и криогенният риск, свързан с температурата на съхранение от $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$: контактът с конструкционни материали, предназначени за криогенни условия, води до нискотемпературна водородна крехкост, а изтичането предизвиква интензивно образуване на криогенни пари [17, 29].

Основните сценарии на опасност при корабни водородни системи обхващат: изтичане и разсейване в затворени помещения; пожар и експлозия; преход от дефлаграция към детонация; струйни пожари при изтичане под високо налягане; криогенни въздействия при течен водород; водородно крехкостно разрушаване на металите – постепенна загуба на пластичност на стоманите при продължителен контакт с водород под налягане. Прегледът на Kim and Chun [17] върху материалната съвместимост и стандартите за безопасност при системи за съхранение на течен водород извежда като критични въпросите за подбора на криогенно съвместими материали, за термичните напрежения при циклично охлаждане и за незавършеността на действащата нормативна база в тази област.

Водородното крехкостно разрушаване заслужава отделно внимание, доколкото засяга не само резервоарите, а цялата газова система – тръбопроводи, арматура, съединения. Механизмът се състои в дифузия на атомарен водород в кристалната решетка на метала, натрупване в зоните на концентрация на напрежения и последваща загуба на пластичност с риск от крехко разрушаване при напрежения под границата на провлачване. Чувствителността нараства с якостта на стоманата, поради което високоякостните конструкционни стомани са по-уязвими от аустенитните неръждаеми стомани и от алуминиевите сплави, предпочитани за водородни системи. Проектната практика предвижда подбор на материали с потвърдена съвместимост с водородна среда, ограничаване на остатъчните напрежения при заваряване, периодичен контрол на критичните съединения и отчитане на цикличното натоварване при определяне на експлоатационния ресурс – изисквания, които при корабните условия на вибрации и солен аерозол придобиват допълнителна тежест.

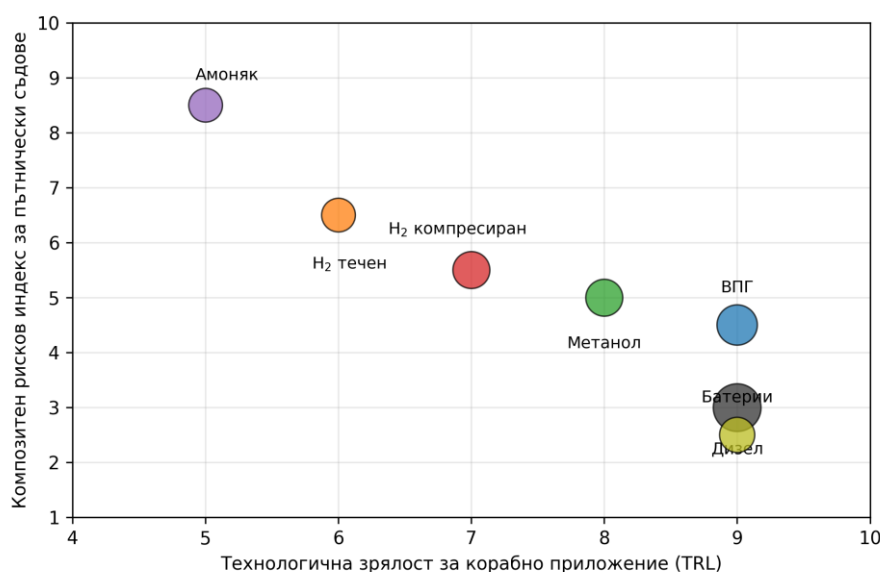
4.2 Изтичане и вентилация в корабни помещения

Поведението на водорода при изтичане в корабни помещения е обект на систематични числени изследвания. Lee and Park [20] моделират характеристиките на изтичането, дифузията и вентилацията на водород в корабни условия и установяват, че определящи за формирането и разсейването на запалими облаци са геометрията на помещението, разположението на вентилационните отвори спрямо мястото на изтичане и кратността на въздухообмена. Поради ниската плътност на газа запалимите концентрации се формират първо в горните нива на помещенията, което налага разполагане на детекторите и на смукателната вентилация във високите точки на помещенията и изключване на потенциални източници на запалване в тези зони. Проектната практика, потвърдена от реализираните съдове, предвижда разполагане на резервоарите и на горивно клетъчните модули на открити палуби или в специализирани помещения с независима вентилация, детекция на водород с автоматично изключване и предпазни мембрани с отвеждане към безопасни зони [11, 36, 41].

4.3 Методи за идентифициране на опасностите и количествена оценка на риска

Систематичната идентификация на опасностите (hazard identification, HAZID) е задължителният първи етап при проектирането на водороден плавателен съд, доколкото действащата нормативна уредба изисква доказване на еквивалентно ниво на безопасност чрез рисков анализ. Van Rheenen, *et al.* [34] извършват HAZID за алтернативните горива, базирани на водород на борда и установяват, че водородът, амонякът и течните органични носители на водород имат качествено различни рискови профили – съответно запалимост, токсичност и необходимост от химическо преобразуване на борда, – които изискват специфични за горивото концепции за безопасност. За пътнически съдове това разграничение има непосредствено значение: острата токсичност на амоняка е трудно съвместима с превоза на пътници, докато рисковете, свързани с водорода, могат да бъдат ограничени чрез конструктивни и организационни мерки [35].

Количествената оценка на риска (quantitative risk assessment, QRA) допълва качествената идентификация с анализ на честотата и на последствията. Russian [29] прилага честотен анализ към операцията по смяна на контейнеризиран резервоар с течен водород на пътнически кораб и демонстрират методологията за доказване на приемливо ниво на риск при нови концепции за бункерование. Inal and Senol [14] разработват анализ на риска за водородни кораби чрез интуиционистки размит анализ на дървото на отказите – подход, който компенсира недостига на статистически данни за откази на водородно оборудване в корабна среда чрез експертни оценки с отчитане на неопределеността. Композитният рисков профил на горивните варианти в съпоставка с технологичната им зрялост е представен на Фиг. 5 съгласно качествена оценка на цитираните автори: водородът заема междинно положение между утвърдените горива и амоняка, като компресираният вариант е по-благоприятен от течния поради отсъствието на криогенни рискове.



Фиг. 5. Съпоставка на горивните варианти по технологична зрялост за корабно приложение и обобщен рисков индекс за пътнически съдове

Общият извод на публикуваните изследвания е балансиран: рисковете на водорода са реални, но управляеми с наличния инструментариум за корабна оценка на риска, при условие че концепцията за безопасност се интегрира от най-ранния проектен етап, а не се добавя впоследствие. Сертификацията на експлоатираните съдове – MV Sea Change от Бреговата охрана на САЩ, MF Hydra от норвежката морска администрация – потвърждава, че този подход е приложим в действащата регулаторна среда [36, 41].

5 Регулаторна рамка

5.1 Международна уредба: IMO

Международният кодекс за безопасност на кораби, използващи газове или други горива с ниска температура на възпламеняване (IGF Code), в сила от 2017 г., съдържа подробни задължителни правила единствено за втечнения природен газ. За водорода и другите алтернативни горива кодексът препраща към процедурата за алтернативно проектиране съгласно Конвенцията SOLAS, която изисква индивидуално доказване на еквивалентно ниво на безопасност – процес, свързан със значителна продължителност, разходи и регулаторна неопределеност за първите пилотни проекти. Wang, *et al.* [39] систематизират състоянието и перспективите на техническите стандарти за водородни кораби и посочват разпокъсаността на националните и класификационните изисквания като съществена бариера. Georgoroulou [10] извършва детайлна идентификация на регулаторните празноти за водорода като корабно гориво по цялата верига – проектиране, бункероване, експлоатация, аварийно реагиране, подготовка на екипажите – и очертават стъпките за преодоляването им.

Процесът на разработване на нормативни изисквания в IMO се развива в тази посока: разработени са временни насоки за кораби с горивно клетъчни енергийни уредби, а Подкомитетът по превоз на товари и контейнери (CCC) финализира временни

насоки за безопасност на кораби, използващи водород като гориво, които подлежат на одобрение от Комитета по морска безопасност [10, 13]. До пълното им влизане в сила и последващото им интегриране в IGF Code одобрението на водородни съдове остава по индивидуалната процедура, чиято приложимост е потвърдена от реализираните проекти [36, 41].

5.2 Класификационни организации и национална компетентност

Класификационните организации изпреварват международната уредба със собствени правила и насоки за водородни горивни системи – DNV, Lloyd's Register, Bureau Veritas, RINA, ABS и ClassNK поддържат такива документи, които на практика служат като проектна основа при отсъствието на завършени задължителни международни правила. Inal [13] обобщава законодателната рамка за водорода и горивните клетки в корабоплаването и подчертава, че сътрудничеството между корабособственика, класификационната организация и националната морска администрация от най-ранния проектен етап е определящо за успешното одобрение.

За морския транспорт на къси разстояния съществува и фактор, който улеснява процедурата: при линии изцяло в национални води одобрението е в компетентността на националната морска администрация, което позволява по-гъвкава процедура на съгласуване и по-кратки процедури, отколкото при международните рейсове [28, 36]. Прецедентите на MV Sea Change и MF Hydra показват, че националните администрации, работещи съвместно с класификационните организации, са в състояние да сертифицират изцяло водородни пътнически съдове по действащата уредба [36, 41]. За българския контекст това означава, че пилотен проект по крайбрежна линия би се одобрявал от Изпълнителна агенция „Морска администрация” съвместно с избраната класификационна организация – процедура, за която международният опит вече осигурява методическа основа [25].

5.3 Регулаторни изисквания към екипажите и бреговия персонал

Отделен регулаторен дефицит са изискванията за подготовка на екипажите и бреговия персонал. Международната конвенция за вахтената служба и нормите за подготовка и освидетелстване на моряците (STCW) не съдържа специфични изисквания за работа с водородни горивни системи, поради което ранните оператори разработват собствени програми за подготовка съвместно с класификационните организации и производителите на оборудването [9, 19, 36]. Обхватът на необходимите компетентности включва свойствата на водорода, поведението при изтичане, действията при аварийни ситуации, работата с оборудване под високо налягане и – при течен водород – с криогенна техника [17]. Систематизирането на тези изисквания в национална рамка за подготовка е предпоставка за устойчиво разширяване на водородния флот отвъд единичните пилотни проекти [19, 25]. По-широкият извод на публикуваните изследвания е, че успешното внедряване изисква интегриран системен подход към проектирането, при който корабът, бреговата инфраструктура, снабдителната верига, регулаторната процедура и подготовката на персонала се разглеждат като единна система още от концептуалния етап [2].

6 Многокритериална рамка за оценка на приложимостта

6.1 Обосновка и структура на рамката

Изложените в раздели 2–5 и в първата част на изследването резултати показват, че решението за преминаване към водородно гориво при конкретна линия зависи от разнородни по природа фактори – технически, инфраструктурни, икономически, регулаторни и свързани с безопасността, които не се поддават на пряко сумиране. Публикуваните интегрирани подходи прилагат многокритериален анализ към избора на гориво или енергийна система [30, 35], но липсва рамка, насочена към оценка на приложимостта на водорода при отделен маршрут на къси разстояния. Настоящият раздел формулира такава рамка.

Рамката обхваща четиринадесет критерия, групирани в пет групи: А – експлоатационен профил на маршрута; Б – техническа осъществимост; В – инфраструктура и снабдяване; Г – икономика; Д – безопасност и регулаторна среда (Таблица 2). Всеки критерий се оценява по петстепенна скала ($s_i = 1$ – силно неблагоприятно; 5 – силно благоприятно) въз основа на данни за конкретния маршрут и на резултатите, систематизирани в двете части на изследването.

6.2 Математическо описание на обобщения индекс

Обобщена оценка на приложимостта се формира като претеглена сума на нормираните оценки по критериите:

$$I = \sum_{i=1}^{14} w_i \cdot \frac{s_i}{5}, \quad \sum_{i=1}^{14} w_i = 1 \quad (5)$$

където: $s_i \in \{1,2,3,4,5\}$ – оценката по i -тия критерий; w_i – неговото тегло; делението на 5 нормира индекса в интервала $0 < I \leq 1$. Теглата се определят за конкретния контекст чрез експертна оценка – например по метода на аналитичната йерархия (analytic hierarchy process, АНР), при който попарните сравнения на критериите от група експерти се агрегират в тегловен вектор с проверка на съгласуваността [30, 35].

Процедурата протича в четири стъпки. Първо, експертите попълват матрица на попарните сравнения $A = [a_{ij}]$, в която елементът a_{ij} изразява относителната значимост на критерий i спрямо критерий j по деветстепенната скала на Saaty ($a_{ij} = 1$ – равна значимост; $a_{ij} = 9$ – изключително силно предпочитание; $a_{ji} = 1/a_{ij}$). Второ, тегловният вектор се извлича като нормиран собствен вектор на матрицата, съответстващ на максималната собствена стойност λ_{max} . Трето, съгласуваността на сравненията се проверява чрез индекса на съгласуваност (CR):

Таблица 2

Критерии на многокритериалната рамка за оценка на приложимостта на водорода при маршрут на къси разстояния

Група	Критерий	Съдържание на оценката
А. Експлоатационен профил	A1. Енергийна потребност	Съответствие на дневната енергийна потребност с реалистичен обем на съхранение
	A2. Регулярност	Фиксирани разписания и пристанища; предвидимост на профила на натоварване
	A3. Престои	Съвместимост на престоите с продължителността на бункероването
Б. Техническа осъществимост	B1. Мощностен профил	Съответствие с диапазона на зрелите горивно клетъчни системи
	B2. Обемен и масов баланс	Приемливост на загубата на полезен обем и товароподемност
	B3. Хибридна архитектура	Възможност за оптимално разпределение на мощността между горивна клетка и батерия
В. Инфраструктура и снабдяване	V1. Произход на водорода	Наличие на сертифициран нисковъглероден водород
	V2. Логистична верига	Локално производство или доставка; сигурност на снабдяването
	V3. Инфраструктурна готовност	Ниво по последователността от фиг. 4
Г. Икономика	G1. общи разходи за притежание и експлоатация	Съотношение спрямо алтернативите при отчитане на регулаторните механизми
	G2. Достъп до финансиране	Грантови и концесионни механизми
Д. Безопасност и регулаторна среда	D1. Рисков профил на маршрута	Пътникопоток, интензивност на трафика, близост до населени места
	D2. Регулаторна осъществимост	Национални води; готовност на администрацията и класификационната организация
	D3. Капацитет за обучение и експлоатация	Достъп до подготвен персонал и програми за обучение

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

където: n е редът на матрицата; RI – среден случаен индекс за матрици от същия ред; оценките се приемат за съгласувани при коефициент на съгласуваност $CR < 0,10$, в противен случай сравненията се преразглеждат.

Четвърто, индивидуалните тегловни вектори на експертите се обединяват чрез геометрично осредняване. Прилагането на тази процедура с експертен състав от преподаватели по корабостроене и корабни енергийни уредби и представители на бранша е предвидено като следваща стъпка на изследването.

За целите на илюстративното прилагане в настоящата статия са приети равни тегла в рамките на групите при групово разпределение: А – 20%, Б – 20%, В – 25%, Г – 20%, Д – 15%, отразяващо извода от раздели 2–3, че инфраструктурата и снабдяването са определящото ограничение при текущото състояние на технологията.

Интерпретацията на индекса се извършва по прагови стойности:

$$\geq 0,70 ; \quad 0,50 \leq I < 0,70 ; \quad I < 0,50 \quad (7)$$

съответстващи на: висока приложимост – препоръчва се преминаване към проектна фаза; условна приложимост – необходими са целеви мерки по критериите с ниски оценки; ниска приложимост – при текущите условия се препоръчват алтернативни решения. Диагностичната стойност на рамката произтича от разреза по критерии: ниските оценки посочват конкретните области, чието преодоляване би променило класификацията на маршрута.

Устойчивостта на резултата спрямо избора на тегла се проверява чрез анализ на чувствителността:

$$\frac{\partial I}{\partial w_i} = \frac{s_i}{5} - \frac{s_j}{5} \quad (8)$$

при прехвърляне на тегло от критерий j към критерий i : индексът е устойчив, когато класификацията по (7) се запазва при разумни вариации на тегловния вектор ($\pm 25\%$ относително изменение на груповите тегла).

6.3 Илюстративно прилагане към условен маршрут в западната част на Черно море

За илюстрация на процедурата рамката е приложена към условен пътнически маршрут на къси разстояния в западната част на Черно море със следните приети характеристики: дължина на прехода 15–25 морски мили, 6–8 курса дневно по фиксирано разписание, пътнически кораб с инсталирана мощност под 1 MW, базово пристанище с корабостроителна и академична инфраструктура, отсъствие на изградена водородна инфраструктура и на действащо местно производство на нисковъглероден водород. оценките по критериите са условни и отразяват качествената оценка, изведена в раздели 2–5: те следва да бъдат заменени с данни от енергийно моделиране и експертно оценяване при последващо изследване на конкретен случай. оценките по критериите и приносът им към обобщената оценка са представени в Таблица 3.

Профилът на оценките е представен и графично на Фиг. 6. Експлоатационният профил (A1–A3) и мощностният диапазон (B1) получават високи оценки – именно характеристиките, които правят късите маршрути подходящо поле за водорода. Ниски са оценките по критериите B1 (отсъствие на сертифициран нисковъглероден водород в региона), B3 (инфраструктурна готовност на начално ниво на готовност по Фиг. 4) и Г1 (обща стойност на притежание при текущи цени), а междинни – по B2, Д2 и Д3.

Обобщена оценка по (5) при приетите тегла възлиза на $I \approx 0,62$, което по праговете (7) класифицира маршрута в зоната на условната приложимост. Според анализът на чувствителността по (8) класификацията се запазва при вариации на груповите тегла в границите $\pm 25\%$, тоест резултатът е устойчив.

Таблица 3

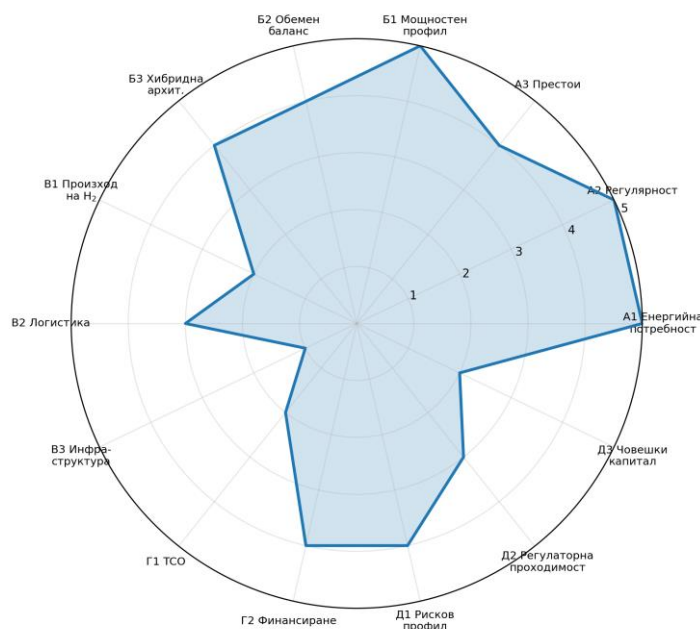
Илюстративни оценки по критериите на рамката за условия черноморски маршрут

Критерий	Оценка s_i	Тегло w_i	Принос $w_i \cdot s_i/5$	Кратка обосновка
A1. Енергийна потребност	5	0,067	0,067	дневна потребност под 3 MWh – може да се покрие с компресирано съхранение
A2. Регулярност	5	0,067	0,067	фиксирано разписание, едно базово пристанище
A3. Престои	4	0,067	0,053	нощен престой достатъчен за бункероване
Б1. Мощностен профил	5	0,067	0,067	под 1 MW – в диапазона на зрелите системи
Б2. Обемен и масов баланс	4	0,067	0,053	загубата на полезен обем е приемлива при новостроящ се съд
Б3. Хибридна архитектура	4	0,067	0,053	профилът на натоварване позволява оптимално разпределение
В1. Произход на водорода	2	0,083	0,033	липсва местно сертифицирано нисковъглеродно производство в региона
В2. Логистична верига	3	0,083	0,050	възможна автомобилна доставка на компресиран водород; сигурността изисква буфер
В3. Инфраструктурна готовност	1	0,083	0,017	начално ниво на готовност; няма изградена бункеровъчна точка
Г1. Обща стойност на притежание	2	0,100	0,040	при текущи цени – по-висока от референтния дизелов вариант
Г2. Достъп до финансиране	4	0,100	0,080	налични са европейски механизми и национални програми
Д1. Рисков профил на маршрута	4	0,050	0,040	умерен пътничкопоток; открити акватории
Д2. Регулаторна осъществимост	3	0,050	0,030	национални води; липсва прецедент пред администрацията
Д3. Капацитет за обучение и експлоатация	2	0,050	0,020	липсват специализирани програми за подготовка; налична е академична база
Обобщена оценка I		1,000	$\approx 0,62$	условна приложимост по (7)

Оттук произтича и практическата последователност за българския контекст: изграждане на локално производство с гарантиран произход (В1), поетапно развитие на бункеровъчната инфраструктура от ниво 1 към ниво 3 (В3) и използване на европейските финансови механизми за покриване на преходната разходна разлика (Г2) – мерки, които биха класифицирали маршрута в зоната на високата приложимост [12, 25, 26]. Тези изводи са в съгласие с наличното българско изследване за водородната мобилност, което установява аналогични инфраструктурни и икономически ограничения при интегрирането на водородни транспортни системи [25].

7 Заключение

Настоящото изследване показва, че оценката на приложимостта на водорода като корабно гориво при морския транспорт на къси разстояния изисква интегриран подход, обхващащ екологичното, икономическото, измеренията свързани с безопасността и правилата наред с техническото.



Фиг. 6. Профил на оценките по критериите на рамката за условия черноморски маршрут (илюстративни стойности)

Екологичната оценка по метода „оценка по целия жизнен цикъл на горивото“ потвърждава, че екологичният ефект от използването на водород зависи от пълната верига на горивото – производство, доставка, съхранение и преобразуване на енергията, като при сертифициран нисковъглероден произход намалението на емисиите надхвърля 80% спрямо референтния дизелов вариант, наред с премахването на локалните замърсители при експлоатация на борда, докато при водород от изкопаем произход без улавяне на въглерода преходът губи екологичния си смисъл.

Икономическата оценка се измества в полза на водорода под съвместното действие на поевтиняващото производство и на регулаторните механизми на ЕС, като разходният паритет с дизеловото гориво за къси маршрути попада в рамките на текущия инвестиционен цикъл, а публичните инструменти за подпомагане покриват значителна част от преходната разлика. Рисковете, свързани с безопасността, са управляеми чрез инструментариума за оценка на риска при условие, че концепцията за безопасност се включи в ранните етапи на проектиране. Сертификацията на експлоатираните кораби потвърждава осъществимостта на действащата регулаторна процедура, а финализирането на временните насоки на ИМО се очаква да намали регулаторната неопределеност.

Формулираната многокритериална рамка обединява тези измерения в единен инструмент с обобщен индекс на приложимост, тълкуване чрез прагови стойности и

проверка на чувствителността. Илюстративното ѝ прилагане към условен маршрут в западната част на Черно море класифицира маршрута в зоната на условната приложимост и извежда като критични не корабната технология а снабдяването с нисковъглероден водород и бреговата инфраструктура. Рамката формира методическата основа за последващо изследване на конкретен случай с енергийно моделиране на реален маршрут, експертно определяне на теглата и сценарийна икономическа оценка, което представлява непосредственото продължение на настоящата работа.

Използвана литература

1. Ammar NR., Seddiek IS. Sustainability and Economic Viability: Transitioning RORO Pax Ships to Green and Blue Hydrogen Fuels. Sustainability. 2026;18(2):885.
2. Bionda A., Pirrone L., Sakellariadis N., Boonen EJ. Sustainable Waterborne Transportation with Hydrogen: An Ecosystem Approach to Design. Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Maritime Applications. Cham: Springer; 2025.
3. Dere C., Inal OB. Comparative Evaluation of Hydrogen with Other Conventional and Alternative Marine Fuels. Transactions on Maritime Science. 2025;14(3).
4. Di Ilio G., Bionda A., Ponzini R., Salvatore F., Cigolotti V., Minutillo M., Georgopoulou C., Mahos K. Towards the design of a hydrogen-powered ferry for cleaner passenger transport. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;95:1261-73.
5. DNV. Energy Transition Outlook 2026 – Hydrogen to 2060: From pilots to scale for renewable and low-carbon hydrogen and synthetic fuels. Høvik: DNV; 2026.
6. EU. Regulation (EU) 2023/1805 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport (FuelEU Maritime). Official Journal of the European Union. 2023;L 234:48-100.
7. Evers VHM., Kirkels AF., Godjevac M. Carbon footprint of hydrogen-powered inland shipping: Impacts and hotspots. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023;185:113629.
8. Fan H. Two decades of hydrogen-powered ships (2000–2024): Evolution, challenges, and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025;219:115878.
9. Fu Z., Lu L., Zhang C., Xu Q., Zhang X., Gao Z., Li J. Fuel cell and hydrogen in maritime application: A review on aspects of technology, cost and regulations. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2023;57:103181.
10. Georgopoulou C. On the identification of regulatory gaps for hydrogen as maritime fuel. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2025;75:104224.
11. Guan W. A 500 kW hydrogen fuel cell-powered vessel: From concept to sailing. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;89:1466–81.

12. Holder D., Percy SD., Yavari A. A Review of Port Decarbonisation Options: Identified Opportunities for Deploying Hydrogen Technologies. *Sustainability*. 2024;16(8):3299.
13. Inal OB. Decarbonization of shipping: Hydrogen and fuel cells legislation in the maritime industry. *Brodogradnja*. 2024;75(2):75205.
14. Inal OB., Senol YE. Hydrogen powered ships: Risk analysis by using Intuitionistic Fuzzy Fault Tree Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2026;198:152781.
15. Inal OB., Zincir B., Dere C., Charpentier JF. Hydrogen Fuel Cell as an Electric Generator: A Case Study for a General Cargo Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(3):432.
16. Kanz O., Bittkau K., Ding K., Rau U., Reinders A. Life Cycle Global Warming Impact of Long-Distance Liquid Hydrogen Transport from Africa to Germany. *Hydrogen*. 2023;4(4):760–73.
17. Kim MS., Chun KW. A Comprehensive Review on Material Compatibility and Safety Standards for Liquid Hydrogen Cargo and Fuel Containment Systems in Marine Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(10).
18. Knight M., Blanco-Davis E., Platt O., Armin M. Life-Cycle and Applicational Analysis of Hydrogen Production and Powered Inland Marine Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(8).
19. Latapi M., Davíðsdóttir B., Jóhannsdóttir L. Drivers and barriers for the large-scale adoption of hydrogen fuel cells by Nordic shipping companies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(15):6099–119.
20. Lee CY., Park SK. Numerical Study on the Characteristics of Hydrogen Leakage, Diffusion and Ventilation in Ships. *Energies*. 2025;18(2):448.
21. Lipiäinen S., Sillman J., Vakkilainen E., Soukka R., Tuomaala M. Hydrogen transport options for a large industrial user: Analysis on costs, efficiency, and GHG emissions in steel mills. *Sustainable Production and Consumption*. 2024;44:1–13.
22. Mäkelä M., Niemi S., Nuortila C., Nyystilä L. Applicability of Hydrogen Fuel for a Cruise Ship. *Clean Technologies*. 2025;7(1):6.
23. Melideo D., Desideri U. The use of hydrogen as alternative fuel for ship propulsion: A case study of full and partial retrofitting of roll-on/roll-off vessels for short distance routes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;50:1045–55.
24. Menon NV., Chan SH. Technoeconomic and environmental assessment of HyForce, a hydrogen-fuelled harbour tug. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(11):6924–35.
25. Pencheva V., Asenov A. Hydrogen Mobility in Bulgaria—Analysis of the Challenges, Prospects and Opportunities for Integration of Transport Systems (Case Study from the City of Ruse. *World Electric Vehicle Journal*. 2026;17(2):100.
26. Pivetta D., Dall'Armi C., Sandrin P., Bogar M., Taccani R. The role of hydrogen as enabler of industrial port area decarbonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;189:113912.

27. Pivetta D., Volpato G., Carraro G., Dall'Armi C., Lio L., Lazzaretto A., Taccani R. Optimal decarbonization strategies for an industrial port area by using hydrogen as energy carrier. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;52:1084–103.
28. Rivarolo M., Montagna GN., Lamberti T., Barberis S. A feasibility study for zero-emission passenger boats for inland waterways based on hydrogen fuel cells. *Proceedings of ECOS 2024*; 20242024.
29. Russian E. *Quantitative Risk Assessment: Frequency Analysis of a Liquid Hydrogen Tank Container Swap Operation on a Passenger Ship*: IOS Press; 2025 2025.
30. Saadeldin M. Feasibility analysis of hydrogen fuel cell-powered passenger vessels: a multi-criteria and MILP-based analysis for sustainable inland navigation. *Ocean Engineering*. 2026;349:124186.
31. Sayer M., Ajanovic A., Haas R. Economic and environmental assessment of different hydrogen production and transportation modes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;65:626–38.
32. Shangguan Y., Tian X., Pang KW., Ruan Q., Jin Y., Wang S. Navigating the green shipping: Stochastic hydrogen hub deployment in inland waterways. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024;129:104126.
33. Shi J., Zhu Y., Feng Y., Yang J., Xia C. A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in Marine Engines. *Atmosphere*. 2023;14(3):584.
34. Van Rheenen E., Scheffers E., Zwaginga J., Visser K. Hazard Identification of Hydrogen-Based Alternative Fuels Onboard Ships. *Sustainability* [Internet]. 2023; 15(24):[16818 p.].
35. Van Rheenen ES., Padding JT., Slootweg JC., Visser K. Hydrogen carriers for zero-emission ship propulsion using PEM fuel cells: an evaluation. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2024;23(3):166-83.
36. Van Sickle E., Ralli P., Pratt JW., Klebanoff LE. MV Sea Change: The first commercial 100% hydrogen fuel cell passenger ferry in the world. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;105:389–404.
37. Wang H., Aung MZ. Life Cycle Analysis of Hydrogen Powered Marine Vessels—Case Ship Comparison Study with Conventional Power System. *Sustainability*. 2023;15(17):12946.
38. Wang Z., Li M., Zhao F., Ji Y., Han F. Status and prospects in technical standards of hydrogen-powered ships for advancing maritime zero-carbon transformation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;62:925–46.
39. Wang Z., Zhao F., Dong B., Wang D., Ji Y., Cai W., Han F. Life cycle framework construction and quantitative assessment for the hydrogen fuelled ships: A case study. *Ocean Engineering*. 2023;281:114740.
40. Zhaka V., Samuelsson B. Hydrogen as fuel in the maritime sector: From production to propulsion. *Energy Reports*. 2024;12:5249–67.
41. Zincir BA. Hydrogen as a Maritime Fuel: Navigating Technical, Safety, and Regulatory Challenges. *Sustainable Maritime Transportation*. 2025;4.