

DESIGNING A HYDROGEN SUPPLY CHAIN ACCORDING TO ENVIRONMENTAL, ECONOMIC AND SOCIAL CRITERIA

Ch. Asst. Prof. eng. Evgeniy Ganev, PhD

Innovative Processes and Systems Engineering Laboratory,
Institute of Chemical Engineering,
Bulgarian Academy of Sciences of Sofia, Bulgaria
E-mail: evgeniy_ganev@iche.bas.bg

Assoc. Prof. eng. Elisaveta Kirilova, PhD

Innovative Processes and Systems Engineering Laboratory,
Institute of Chemical Engineering,
Bulgarian Academy of Sciences of Sofia, Bulgaria
E-mail: elisavetakirilova.iche.bas@gmail.com

Prof. Venko Beschkov, DSc

Biochemical Engineering Laboratory,
Institute of Chemical Engineering, Bulgarian Academy of Sciences of Sofia
E-mail: vbeschkov@bas.bg

***Abstract:** This paper addresses the problem of optimal supply chain design for the production and distribution of hydrogen for road transport needs. The approach we developed, based on mixed integer linear programming, aimed at designing and planning an integrated hydrogen supply chain according to economic, environmental and social criteria. An optimization model has been developed to enable decision-making regarding hydrogen fuel production infrastructure, charging station infrastructure and location, and related amounts and logistics.*

***Keywords:** Hydrogen; Supply Chain Model; Optimal Design; Economic, Environmental and Social Criteria*

ВЪВЕДЕНИЕ

Водородът може да бъде асоцииран с енергията на бъдещето. Той се характеризира като високоефективен, екологосъобразен и устойчив енергиен носител. Като цяло енергийните процеси, които се извършват в природата са свързани по един или друг начин с участието на водорода. Водородът е перспективен енергиен носител, тъй като при използването му като гориво продукт на горенето е водна пара, т.е. практически няма парникови газови емисии в атмосферата. От друга страна, водородът е практически неизчерпаемо гориво, което го прави привлекателна алтернатива на изкопаемите горива (Beschkov, V.; Ganev, E. 2023). Съществено предимство на водорода като гориво е високото му енергийно съдържание на единица маса в сравнение с изкопаемите горива. Машабното въвеждане на водорода в транспорта, производството на енергия и промишлеността поставя някои важни предизвикателства. Първо, той има висока себестойност в сравнение с цената на повечето изкопаеми горива. На следващо място, възприетите традиционни методи за производство на водород, като разделяне на водата чрез електролиза и преобразуване на метан, водят до допълнително натоварване на атмосферата с парникови газове (Singla, S.; Shetti, N.P.; Basu, S.; Mondal, K.; Aminabhavi, T.M. 2022). Това мотивира прилагането на възобновяеми енергийни източници за електролитно производство на водород, като слънчева и вятърна енергия, хидроенергия и др. (Yang, Y.; Tong, L.; Yin, S.; Liu, Y.; Wang, L.; Qiu, Y.; Ding, Y. 2022). Важна стъпка за намаляване на цената на водорода като гориво е оптималното проектиране на ресурсно-осигурителната верига (SC) за неговите производство, дистрибуция и експлоатация (Kurtz, J.; Sprik, S.; Bradley, T. H. 2019).

Целта на това изследване е да се предложи оптимално проектиране на ресурсно-осигурителна верига за производство и разпространение на водород за нуждите на автомобилния транспорт. Приложен е разработения от нас подход, базиран на смесено

целочислено линейно програмиране (MILP) за проектиране и планиране на интегрирана ресурсно-осигурителна верига за водород (IHSC) по отношение на икономически, екологични и социални критерии. Разработеният оптимизационен модел ще даде възможност за вземане на решения относно инфраструктурата за производство на водородно гориво, инфраструктурата и местоположението на зарядните станции, както и свързаните с тях обеми и логистика.

ФОРМУЛИРОВКА НА МОДЕЛА

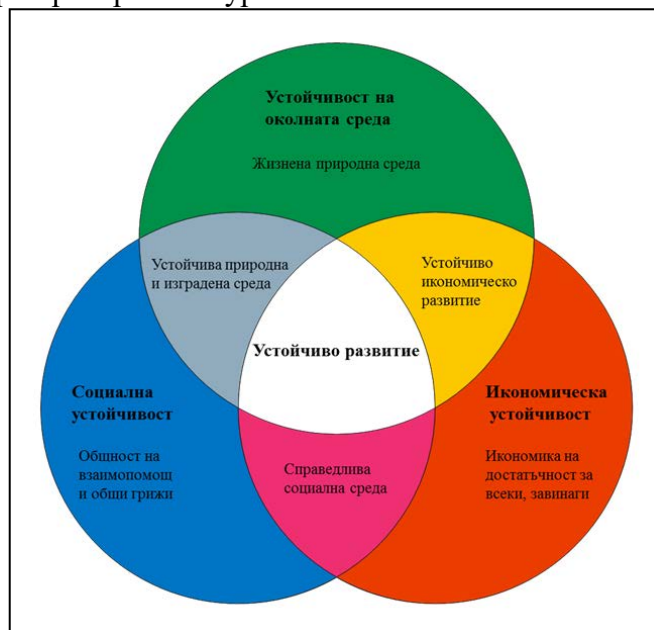
Статията предлага общ математичен модел, имащ за цел да помогне вземащите решения при проектирането и планирането на устойчива ресурсно-осигурителна верига, базирана на методологията „Оценка на жизнения цикъл“ (LCA). Моделът установява връзката със схемата за търговия с емисии за постигане на целите за устойчивост. SC гарантира връзката между икономическите, екологичните и социалните показатели (Ganev, E.; Ivanov, B.; Vaklieva-Bancheva, N.; Kirilova, E.; Dzhelil, Y., 2021).

Описание на математическия модел

За да опишем MILP модела, като за начало въвеждаме параметрите, които априори са постоянни и известни, и променливите, които са обект на оптимизация. Така описваме стъпка по стъпка математическия модел чрез представяне на целевата функция и всички ограничения. На първо място, въвеждаме множеството от времеви интервали на хоризонта на планиране $t = \{0, 1, 2, \dots, T\}$. Индексът t показва променливата или параметъра, съответстващи на t -тия интервал на планиране. Пълно описание на математическия модел, който се използва за проектирането на POB е представено в (Ganev, E.; Ivanov, B.; Vaklieva-Bancheva, N.; Kirilova, E.; Dzhelil, Y., 2021).

Основни зависимости за решаване на проблема

Анализът свързан с производството и дистрибуцията на водород ще се извърши по три критерия, икономически, екологичен и социален. Оптималното решение би се явило компромис между тези три критерия Фигура 1.



Фиг. 1. Концепция за устойчиво развитие и управление на IHSC (Ganev, E.; Beschkov, V. 2022)

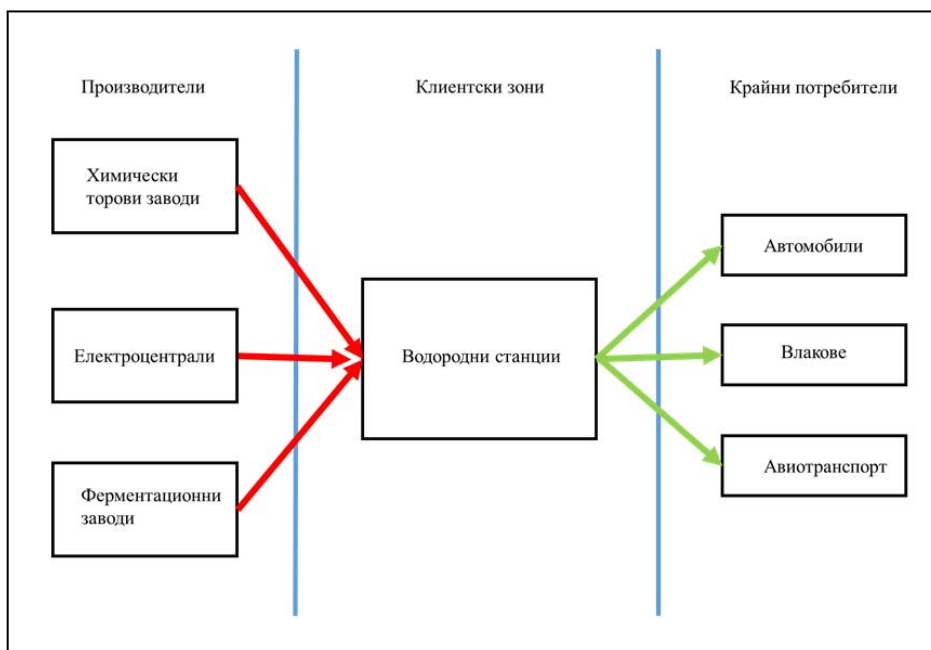
А/ Зависимости, свързани с общото въздействие върху околната среда TEI_t , $[kgCO_{2eq}/d]$

Сред различните подходи за оценка на въздействието на процесите и предприятията върху околната среда, методът LCA изглежда най-обещаващ. Той обобщава резултатите от различни аспекти на екологичните проучвания, включително емисиите на парникови газове, които са признати като вредни за околната среда и отговорни за изменението на климата. Екологичното въздействие на IHSC се отчита по отношение на общите емисии на парникови газове $[kg_{CO_2eq}]$, произтичащи от дейностите на SC и общите емисии се превръщат във въглеродни кредити, като се умножават по цената на въглерода (за kg_{CO_2eq}) на пазара.

Това изследване разглежда значимите парникови газове, отделени при производствата на биогорива: въглероден диоксид (CO_2), метан (CH_4) и диазотен оксид (N_2O). Отчитат се стойностите на тези параметри за описание на жизнения цикъл. Описанието на жизнения цикъл се извършва след групиране на парниковите газове (т.е. CO_2 , CH_4 и N_2O) в един показател по отношение на еквивалентните емисии на въглероден диоксид $[kg_{CO_2eq}/y]$ чрез използване на съответните им потенциали за глобално затопляне (GWPs) на базата на препоръката на Междуправителствената експертна група по изменение на климата (ARC4 Climate Change, 2007) за 100-годишен времеви хоризонт, както следва: 1 за CO_2 , 25 за CH_4 и 298 за N_2O .

Екологичната цел е да се сведе до минимум общото годишно количество емисии на парникови газове, генерирани от SC за водород. Формулирането на тази цел се основава на анализа на жизнения цикъл, който отчита следните етапи от жизнения цикъл на течните горива за транспортиране на базата на биомаса Фигура 2:

- Етап на производство на водород - състои се от различни подетапи в зависимост от вида на суровината, от която трябва да бъде произведен.
- Етап на транспортиране на водорода - отнася се до доставката на водород до клиентските зони.
- Етап на крайно потребление на водорода - етап, в който водородът се въвежда в резервоарите на превозните средства и се експлоатира за получаване на полезна работа.



Фиг. 2. Етапи на жизнения цикъл на водородното гориво

Под екологични критерии за оценка, ще се разбира общото въздействие върху околната среда по време на работа на IHSC чрез получените емисии на парникови газове при всеки

времени интервал $t \in T$. Тези емисии са равни на сбора от въздействието на всеки от етапите от жизнения цикъл върху околната среда. Емисиите на парниковите газове обикновено се определят както следва за всеки времеви интервал $t \in T$:

$$TEI_t = ELH_t + ELD_t + ETT_t + ESW_t + EAPP_t, \forall t \quad (1)$$

където,

TEI_t Общо екологично въздействие от работата на IHSC за целия жизнен цикъл, $[kg_{CO_2eq}/d]$;

ELH_t Общи емисии на парниковите газове при производството на водород;

ELD_t Общи емисии на парникови газове при производството на петролен дизел;

ETT_t Въздействие върху околната среда при транспортирането на суровини и продукция;

ESW_t Емисии, отделени при оползотворяването на отпадъците, генерирани от производството на водород за всеки времеви интервал $t \in T$;

$EAPP_t$ Емисии от използването на водорода като гориво, $[kg_{CO_2eq}/d]$.

Б/ Основни зависимости при общите разходи TDC_t , [\$/y]

Годишните оперативни разходи включват разходите за придобиване на суровина, местните разходи за крайния продукт, производствените разходи на крайните продукти и транспортните разходи за суровина и крайните продукти. В производствените разходи се вземат предвид както фиксираните годишни оперативни разходи, които са дадени като процент от съответната обща капиталова инвестиция, също така и нетната променлива цена, която е пропорционална на сумата за обработка. При разходите за транспорт се отчитат както фиксираните разстояния, така и разстоянието с променливите разходи. Икономическият критерий ще бъде разходите за съществуване на предприятието, които включват общите инвестиционни разходи за производствените мощности за водород и функционирането на IHSC (Ozlem A., Shah N., Parageorgiou L, 2012). Тази цена се изразява чрез зависимостта за всеки интервал от време $t \in T$:

$$THC_t = TIC_t + TPC_t + TPW_t + TTC_t + TTAXB_t + TIHSC_t + TOEC_t - TL_t - TA_t, \forall t \quad (2)$$

където,

THC_t Общи разходи на IHSC за година, [\$/y];

TIC_T Общи инвестиционни разходи за производствен капацитет на IHSC спрямо оперативния период на експлоатация и изкупуването на инсталацията за година, [\$/y];

TPC_t Производствени разходи при производство на водород, [\$/y];

TPW_t Производствени разходи за утилизиране на отпадъците от производството на водород, [\$/y];

$TIHSC_t$ Общи инвестиционни разходи за търговски капацитет на IHSC спрямо оперативния период на експлоатация и изкупуването на водородната станция за година, [\$/y];

$TOEC_t$ Оперативни разходи при крайните търговци на водород, [\$/y];

TTC_t Общи транспортни разходи на IHSC, [\$/y];

$TTAXB_t$ Въглероден данък, начислен според общата сума CO_2 , генериран при работата на IHSC, [\$/y];

TL_t Правителствени стимули за производството и потреблението на водород, [\$/y];

TA_t Обща стойност на съпътстващите продукти [\$/y];

В/ Модел на социалната оценка на IHSC Job_t , [Number of Jobs/y].

Моделът на социалната оценка за работата на IHSC определя очаквания общ брой на създадените работни места (J_t) като резултат на действието на всички елементи на системата по време на нейната работа:

$$Job_t = NJ1_t + LT_t NJ12_t + NJ2_t + LT_t NJ21_t, \quad \forall t \quad (3)$$

където, компонентите на (3.26) се определят съгласно отношенията при всеки времеви интервал $t \in T$, [Number of Jobs/y]:

$NJ1_t$ - брой работни места, създадени по време на инсталирането на съоръженията за водород;

$NJ12_t$ - брой работни места, създадени по време на работата на съоръженията за водород;

$NJ2_t$ - брой работни места, създадени по време на инсталирането на станциите за зареждане с водород;

$NJ21_t$ - брой работни места, създадени по време на работа на станциите за зареждане с водород.

Уравнение (3) може да се разглежда като опростен модел на критерия на социалната оценка (Ganev, E.; Ivanov, B.; Vaklieva-Bancheva, N.; Kirilova, E.; Dzhelil, Y., 2021).

Ограничения на модела

За проектиране на SC и съставяне на модел, посредством MILP, трябва да се вземат под внимание някои ограничения. Тези ограничения включват: ограничения на баланса на всички продукти, ограничения за ограничаване на капацитета, ограничения за заемане на минимален капацитет и ограничение на удовлетвореността от търсенето.

ИЗВОДИ

В тази статия се разглежда оптималното разположение на инсталациите за производство на водород и работата на интегрираните ресурсно-осигурителните вериги за водород (IHSC). Предложен е разработеният от нас подход на смесено целочислено линейно програмиране за проектиране и планиране на IHSC по отношение на икономически и екологични критерии (Ganev, E.; Ivanov, B.; Vaklieva-Bancheva, N.; Kirilova, E.; Dzhelil, Y., 2021). Разработен е оптимизационен модел, който дава възможност за вземане на решения по отношение на инфраструктурата за производство на водород, включително места за компримиране и зарядни станции.

Една от ценните характеристики на подхода е способността за идентифициране и решаване на различни проблеми, като местоположение на съоръженията и избор на суровини. Освен това самият модел би могъл лесно да бъде разширен, обхващайки въпросите на стратегическото планиране, като например възможности за инвестиране по отношение на нови производствени съоръжения, тяхното разполагане и въвеждането на екологични и други външни фактори при изчисляването на общите разходи. Оптимизационните критерии за всеки конкретен случай, ще отразяват целите на заинтересованата страна и могат да включват максимална икономическа ефективност, най-добро поведение по отношение на околната среда, минимални общи разходи и др. Друга характеристика на предложения подход е, че моделът не е излишно усложнен и прилагайки го, с лекота могат да бъдат решени належащи задачи, без да е необходимо да се разработват нови кодове или методи за оптимизация.

REFERENCES

ARC4 Climate Change 2007: Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report.

Beschkov, V.; Ganev, E. (2023) *Perspectives on the Development of Technologies for Hydrogen as a Carrier of Sustainable Energy*. Energies, 16, 6108.

Chi, J.; Yu, H. (2018) *Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production*. Chin. J. Catal, 39, 390–394.

Ganev, E.; Ivanov, B.; Vaklieva-Bancheva, N.; Kirilova, E.; Dzhelil, Y. (2021) *A Multi-Objective Approach toward Optimal Design of Sustainable Integrated Biodiesel/Diesel Supply Chain Based on First- and Second-Generation Feedstock with Solid Waste Use*. *Energies*, 14, 2261.

Ganev, E.; Beschkov, V. (2022) *Optimal synthesis and management of supply chains for production and utilization of biogas*. *Bul. Chem. Commun.*, 54, 205–210.

Kurtz, J.; Sprik, S.; Bradley, T. H. (2019) *Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability*. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 12010-12023

Ozlem A., Shah N., Papageorgiou L, (2012) *Economic optimisation of a UK advanced biofuel supply chain*, *Biomass and Bioenergy*, 4, 1, , 57-72.

Singla, S.; Shetti, N.P.; Basu, S.; Mondal, K.; Aminabhavi, T.M. (2022) *Hydrogen production technologies-membrane based separation, storage and challenges*. *J. Environ. Manag.*, 302, 113963.

Yang, Y.; Tong, L.; Yin, S.; Liu, Y.; Wang, L.; Qiu, Y.; Ding, Y. (2022) *Status and challenges of applications and industry chain technologies of hydrogen in the context of carbon neutrality*. *J. Clean. Prod.*, 376, 134347.