

ПІДХОДИ ДО ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ВОДНЕВИХ ЗАПРАВОК В УКРАЇНІ НА ОСНОВІ СЦЕНАРНОГО АНАЛІЗУ ТА GIS-МОДЕЛЮВАННЯ

Отримано 26 лют. 2026 р.; рекомендовано до публікації 23 бер. 2026 р.
Доступно онлайн 31 бер. 2026 р.

Кудря С. О.¹, Зур'ян О. В.²

Автор для кореспонденції: Зур'ян Олексій,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук,
професор
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

^{1,2} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Статтю присвячено розробленню науково обґрунтованого підходу до планування мережі водневих заправних станцій в Україні як складової розвитку водневої мобільності та реалізації цілей низьковуглецевого енергетичного переходу. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від точкового розміщення окремих H₂-заправок до формування цілісної мережі, здатної забезпечити просторову зв'язність, поетапність розгортання інфраструктури та масштабування ринку транспорту на паливних елементах за умов обмежених інвестиційних ресурсів і підвищених ризиків. У роботі запропоновано сценарно-GIS-орієнтований підхід до планування мережі H₂-заправок, який поєднує прогнозування попиту на водень, багатофакторну оцінку придатності потенційних локацій та формалізований механізм формування мережі. Обґрунтовано використання ієрархічної структури мережі типу «ядро – коридори – периферія» як базового принципу просторового планування. Розглянуто три базові сценарії розгортання H₂-заправної інфраструктури в Україні до 2035 року та показано їх відображення у вигляді схематичних моделей ієрархічної структури та сценарної еволюції мережі. Запропоновано математичну модель, у межах якої розвиток мережі формалізовано через сценарно залежні параметри, що враховують транспортний попит, ефективну доступність відновлюваних джерел енергії для електролізу, інфраструктурну готовність та специфічні для України ризикові чинники. Показано, що модель придатна для реалізації в GIS-середовищі та може бути використана для формування інтерактивної карти мережі H₂-заправок з деталізацією до рівня територіальних громад, що істотно розширює просторову глибину аналізу порівняно з наявними підходами, обмеженими рівнем областей. Узагальнено, що запропонований сценарно-GIS-орієнтований підхід забезпечує науково обґрунтоване бачення формування мережі H₂-заправних станцій в Україні та може слугувати методичною основою для стратегічного, інвестиційного й просторового планування розвитку водневої мобільності.

Ключові слова: освіта, фахівці, воднева мобільність; мережа H₂-заправних станцій; сценарний аналіз; GIS-моделювання; планування інфраструктури; відновлювані джерела енергії; електроліз водню; інвестиційна привабливість; територіальні громади.

Перелік використаних позначень та скорочень

ЄС – Європейський Союз

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

H₂ – водень

H₂-заправка – воднева заправна станція

GIS – геоінформаційна система (англ. *Geographic Information System*)

FCEV – транспортні засоби на паливних елементах (англ. *Fuel Cell Electric Vehicles*)

MCA – багатокритеріальний аналіз (англ. *Multi-Criteria Analysis*)

MCDA – багатокритеріальний аналіз прийняття рішень (англ. *Multi-Criteria Decision Analysis*)

LCA – оцінка повного життєвого циклу (англ. *Life Cycle Assessment*)

ВДМ – воднева мобільність

AЗС – автозаправна станція

ВДЕ-електроліз – виробництво водню шляхом електролізу з використанням відновлюваних джерел енергії

EU4Energy – регіональна ініціатива Європейського Союзу, спрямована на підтримку країн Східного партнерства у реформуванні енергетичних ринків/

S_i – інтегральний показник придатності локації для розміщення H₂-заправки

P_i – показник ефективної доступності відновлюваних джерел енергії для електролізу

T_i – показник транспортної інтенсивності та доступності

I_i – показник інфраструктурної готовності

R_i – інтегральний показник ризиків

Вступ. У контексті глобальних кліматичних викликів та необхідності скорочення викидів парникових газів розвиток водневої енергетики набуває дедалі більшої актуальності. Європейський Союз, Сполучені Штати Америки, Японія та інші країни з розвинутою економікою вже активно впроваджують стратегії переходу до низьковуглецевого енергетичного балансу, де водень, особливо зелений – отриманий електролізом води з використанням енергії відновлюваних джерел – відіграє ключову роль. Транспортний сектор – одне з основних джерел викидів CO₂ – розглядається як перспективний напрям використання водню, що створює потребу у відповідній інфраструктурі, зокрема заправних станціях для автотранспорту на паливних елементах.

Для України, яка має значний потенціал розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) – вітрової, сонячної та біоенергетики – водень розглядається не лише як інструмент декарбонізації, а і як стратегічний напрям для інтеграції в європейський енергетичний простір. Відповідно до «Проекту Дорожньої карти водневої енергетики України» [1] національні цілі передбачають поступове формування інфраструктури водневого транспорту, включно із заправними станціями. Водночас відсутність узгодженого бачення просторового планування цієї інфраструктури та недооцінка інвестиційних і соціальних ризиків стримують її розвиток.

З огляду на міжнародний досвід, в якому впроваджено низку комплексних моделей планування водневої інфраструктури, постає потреба в адаптації подібного підходу до українських умов. Така адаптація має враховувати технічні, економічні, соціальні та просторові чинники, що впливають на доцільність розміщення та графік розгортання заправних станцій на водні. Створення сценарної моделі розвитку таких об'єктів дасть змогу обґрунтувати потенційно привабливі напрями для інвесторів, а також сформулювати аналітичну основу для ухвалення стратегічних рішень на державному рівні.

Постановка завдання. Попри наявність стратегічних документів, що декларують підтримку розвитку водневої енергетики в Україні, питання формування інфраструктури заправних станцій для транспорту на паливних елементах залишається відкритим як у технічному, так і в просторовому вимірі. У світовій практиці планування водневої інфраструктури спирається на математичні моделі попиту [3], сценарне моделювання і геоінформаційний аналіз [3, 4]. Для України важливо адаптувати ці підходи з урахуванням її енергетичного потенціалу, транспортної структури та соціально-економічних особливостей.

Метою цієї роботи є обґрунтування сценаріїв розвитку мережі H₂-заправок для автотранспорту в Україні на основі системного аналізу, з урахуванням потенціалу виробництва зеленого водню, транспортної доступності, регіонального попиту, інфраструктурних передумов і наявних ризиків. Особливу увагу приділено математичному підходу до оцінки доцільності розміщення станцій

з подальшою можливістю візуалізації результатів у форматі GIS-моделі.

Завдання дослідження такі:

- узагальнення міжнародного досвіду просторового планування водневої інфраструктури;
- ідентифікація чинників, що впливають на доцільність будівництва H₂-заправних станцій в Україні;
- побудова багатофакторної моделі оцінки придатності регіонів до впровадження інфраструктури;
- розробка трьох сценаріїв розвитку заправної мережі (мінімальний, помірний, інтенсивний);
- формування методологічної основи для створення інтерактивної карти інвестиційної привабливості відповідних проєктів.

Зазначений підхід дає змогу поєднати аналітичну глибину з прикладним інструментарієм, що може бути корисним як для дослідників, так і для практиків – інвесторів, міських планувальників, представників органів державної влади

Огляд літератури

У сучасній науковій літературі розвиток водневої інфраструктури розглядається як ключова складова трансформації транспортного сектору в напрямі низьковуглецевого майбутнього. Так, автори [5] здійснили ґрунтовний огляд H₂-заправних станцій, наголошуючи на критичній залежності між зростанням парку автомобілів на паливних елементах та розгортанням інфраструктури. У дослідженнях [6] розглянуто американський досвід, де увага зосереджена на ефективному просторовому розміщенні HRS з урахуванням логістики та щільності трафіку. У роботі [7] у контексті Німеччини вказується на необхідність узгодження розвитку заправної мережі з можливостями енергосистеми.

Аналогічні проблеми аналізуються й у вітчизняних наукових публікаціях. Зокрема, у роботі [8] охарактеризовано основні виклики та напрями розвитку водневої мобільності в Україні з акцентом на міжсекторальній інтеграції інфраструктури. Особливу увагу слід приділити дослідженням у виданні «Відновлювана енергетика», зокрема роботі [9], де проаналізовано напрями розвитку водневої енергетики на базі ВДЕ в умовах повоєнного відновлення країни. У цьому ж журналі автор досліджує етапи формування національної водневої стратегії, підкреслюючи необхідність поєднання технологічних інновацій з державною політикою розвитку H₂-інфраструктури [10].

Серед прикладних досліджень варто виділити публікацію [11], присвячену реалізації автономної сонячно-водневої заправної станції для електромобілів, яка ілюструє можливості поєднання децентралізованого виробництва водню з автономними системами заправки [12]. Доповнюють огляд європейські моделі, як от дослідження просторового розміщення HRS для автобусного транспорту з урахуванням доступу до відновлюваних джерел [8].

Водночас важливий внесок у дослідження інвестиційної складової зеленого водню зроблено у дослідженнях авторів [13, 14], де детально розглянуто методичні підходи до оцінки інвестиційної привабливості водневих проєктів в Україні з позицій просторового планування, ризик-аналізу та сценарного моделювання. Ці публікації є методологічною основою для формування ГІС-карти та сценаріїв розміщення H₂-заправок, які розробляються у межах цього дослідження.

Таким чином, як міжнародні, так і вітчизняні дослідження підтверджують наукову й прикладну актуальність теми. Вони закладають основу для формування інтегрованої стратегії розвитку H₂-заправної інфраструктури в Україні з урахуванням енергетичних, логістичних, інфраструктурних і соціальних чинників.

Виклад основного матеріалу

З огляду на поставлену мету – обґрунтування можливих сценаріїв розвитку мережі H₂-заправок в Україні – важливо звернутися до успішного міжнародного досвіду у сфері просторового планування водневої інфраструктури. Як приклад високої ефективності комплексного підходу розглянуто модель, що впроваджується в штаті Каліфорнія (США), який є одним з лідерів у розбудові водневого транспорту. У зазначеному регіоні діє державна програма, спрямована на створення системи заправних станцій з розрахунком на забезпечення потреб декількох сотень тисяч водневих автомобілів вже до кінця поточного десятиліття.

Суттєвою особливістю каліфорнійського підходу є використання низки взаємодоповнюючих аналітичних інструментів. Так, модель STIEVE (Station Siting and Investment Evaluation) дає змогу визначити оптимальні локації для розміщення H₂-заправок на основі прогнозованого попиту, густоти трафіку, щільності населення й транспортної доступності. Комплементарна до неї модель SERA (Scenario Evaluation and Regional Analysis) виконує сценарний аналіз для різних регіонів з урахуванням вартості виробництва та логістики постачання водню. Додатково, модель GOOD (Grid Optimized Output Distribution) враховує параметри енергетичної інфраструктури, зокрема можливість використання відновлюваних джерел енергії для живлення електролізерів. Важливу роль у стандартизації та технічному контролі за роботою станцій відіграють інструменти HyStEP (оцінювання продуктивності / якості роботи обладнання H₂-станції) та HySCapE (оцінювання добової пропускної спроможності станції), що використовуються в практиці Каліфорнії для стандартизованої технічної валідації та порівняння проєктних рішень [15].

Результатом є інтегрована система стратегічного планування, включно з технічними, просторовими та економічними чинниками. Запропоновані моделі забезпечують прозору логіку інфраструктурного розвитку з чіткою прив'язкою до реальних інвестиційних планів, зокрема тих, що фінансуються через California Energy Commission. Такий досвід становить інтерес для України,

де подібні інструменти ще не є поширеними, але можуть бути адаптовані з урахуванням національних особливостей енергетики, транспорту і просторового розвитку.

Урахування світових підходів до водневої інфраструктури дозволяє краще зрозуміти потенціал розвитку H₂-заправок в Україні. Проте реалізація таких проєктів потребує глибокого аналізу внутрішніх передумов – від енергетичних можливостей до регуляторних рамок та економічної доцільності.

З погляду енергетичного потенціалу Україна має значні передумови для масштабного виробництва зеленого водню шляхом електролізу, що базується на ВДЕ. Особливо перспективними є південні та південно-східні регіони (Одещина, Миколаївщина, Херсонщина), де вже розроблено або ініційовано великі проєкти вітрових та сонячних електростанцій. Згідно з національною Водневою стратегією, ухваленою на основі аналітичного звіту 2021 року, Україна до 2030 року має потенціал для виробництва понад 1 млн тонн водню на рік, що дозволить як його експорт, так і внутрішнє споживання в транспорті та промисловості.

З технологічної точки зору Україна має фахову наукову базу, а також досвід у створенні демонстраційних установок електролізерів і H₂-заправних модулів. Ці компетенції можуть бути швидко масштабовані за умов доступу до інвестицій.

Економічні та інвестиційні чинники також демонструють позитивну динаміку. Публікації [13, 14] торкаються методичних підходів до просторової оцінки інвестиційної привабливості водневих проєктів з використанням ГІС-технологій, що дають змогу виявити оптимальні локації для H₂-заправок. Зокрема, у регіонах з високою автомобільною інтенсивністю, на перетині логістичних маршрутів та поблизу діючих або перспективних джерел ВДЕ.

Інституційно-регуляторне середовище перебуває на етапі активного формування. У національній стратегії декарбонізації, Плані відновлення України та в «зелених» ініціативах Мінвідновлення закладено основи для стимулювання інвестування у водневу інфраструктуру. Наразі формуються технічні стандарти на H₂-заправки з урахуванням європейських норм. Це відкриває можливість гармонізації з європейським ринком і залучення міжнародних партнерів (наприклад, у межах проєктів Hydrogen Corridor або EU4Energy).

З соціального боку, дедалі більша зацікавленість місцевих громад у розвитку енергетичних кластерів та еко-транспорту створює передумови для локального прийняття рішень щодо розміщення водневої інфраструктури.

Отже, в Україні існує сукупність позитивних передумов для розвитку мережі H₂-заправок. Їх реалізація потребує інтеграції просторового планування, наукових інновацій, нормативної бази та публічно-приватного партнерства, що й стане основою для наступного сценарного аналізу.

З огляду на виявлені передумови планування розвитку мережі H_2 -заправок в Україні потребує застосування сценарного підходу, який здатний врахувати невизначеність економічного, технологічного та геополітичного контексту. Такий підхід широко використовується в міжнародній практиці (зокрема, в Каліфорнії, Німеччині та Японії) для моделювання майбутніх конфігурацій інфраструктури відповідно до

змінних вхідних параметрів – від вартості електролізу до темпів зростання автопарку на паливних елементах.

На основі аналізу літературних джерел у межах цього дослідження запропоновано три базові сценарії розгортання H_2 -заправної інфраструктури в Україні до 2035 року (рис. 1.)

СЦЕНАРІЇ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ H_2 -ЗАПРАВOK В УКРАЇНІ ДО 2035 РОКУ



Рис. 1. Три базові сценарії розгортання H_2 -заправної інфраструктури в Україні до 2035 року

1. Базовий сценарій (інерційний розвиток)

Передбачає поступове формування водневої інфраструктури без істотних державних стимулів або великих приватних інвестицій. Заправки створюються переважно в межах пілотних проектів або міжнародної технічної допомоги (наприклад, у межах відновлення критичної інфраструктури після бойових дій). Очікуване охоплення – до 15–20 H_2 -заправок, переважно в обласних центрах та навколо Києва.

2. Помірно оптимістичний сценарій (керований розвиток)

Сценарій передбачає активну роль держави у формуванні регуляторного середовища, впровадження механізмів державно-приватного партнерства та стимулювання внутрішнього попиту (наприклад, через пільги для муніципального транспорту або логістичних компаній). Передбачається інтеграція з локальними джерелами ВДЕ, розвиток регіональних кластерів. До 2035 року можливе створення до 80 H_2 -заправок, що охоплюють основні транспортні коридори (Київ – Львів, Київ – Одеса, Київ – Харків, Харків – Дніпро).

3. Прискорений сценарій (водневий прорив)

Базується на активному залученні іноземних інвесторів, швидкій адаптації європейських стандартів та участі в

трансграничних ініціативах (як-от Central European Hydrogen Corridor (CEHC)). Цей сценарій враховує також можливу експансію H_2 -транспорту (легковий, вантажний, автобусний) під впливом декарбонізаційних зобов'язань. До 2035 року передбачається розгортання до 150–200 заправок, з рівномірним покриттям території України та інтеграцією в логістичні й експортні ланцюги.

Запропоновані сценарії розгортання мережі H_2 -заправок потребують кількісного обґрунтування та просторової інтерпретації, що зумовлює доцільність використання геоінформаційних систем (GIS) у поєднанні з багатофакторною моделлю оцінки. Такий підхід дає змогу перейти від описових сценаріїв до формалізованого інструменту підтримки інвестиційних та управлінських рішень.

У межах дослідження кожна потенційна локація розміщення H_2 -заправної станції розглядається як просторовий об'єкт з набором кількісних атрибутів, що відображають енергетичні, транспортні, соціально-економічні та ризикові характеристики території. Інтегральний показник доцільності розміщення заправки у точці і може бути описаний у вигляді зваженої суми:

$$S_i = \sum_{k=1}^n w_k \cdot X_{ik} - \sum_{j=1}^m r_j \cdot R_{ij},$$

S_i – інтегральний індекс інвестиційної привабливості H_2 -заправки у точці i ;

X_{ik} – нормалізовані позитивні чинники (потенціал ВДЕ, транспортна доступність, очікуваний попит, близькість до інфраструктури);

R_{ij} – нормалізовані чинники ризику (регуляторні, безпекові, соціальні, логістичні);

w_k, r_j – вагові коефіцієнти, що змінюються залежно від вибраного сценарію розвитку.

У GIS-середовищі кожен з факторів представлений у вигляді тематичного шару, зокрема:

- шару потенціалу виробництва зеленого водню (на основі ВДЕ та доступу до електромереж);
- шару транспортної інтенсивності (магістралі, логістичні коридори, вузли);
- шару споживчого попиту (урбанізація, автопарк, промислові зони);
- шару інфраструктурної готовності (АЗС, промзони, підстанції);
- шару ризиків (безпекові обмеження, соціальні фактори, регуляторні невизначеності).

Для кожного зі сценаріїв (базового, помірно оптимістичного та прискореного) задається свій набір вагових коефіцієнтів. Так, у базовому сценарії домінуючими є

фактори мінімізації ризиків та наявності готової інфраструктури, тоді як у прискореному сценарії зростає роль транспортного попиту та потенціалу ВДЕ, навіть за підвищеного рівня ризику. Це дає змогу отримати різні просторові конфігурації «пріоритетних зон» для інвестування.

Результатом GIS-моделювання є серія карт сценарного розвитку, на яких відображаються кластери високої доцільності розміщення H_2 -заправок. Такі карти можуть бути використані не лише як ілюстративний матеріал у науковій статті, а і як практичний інструмент для формування дорожніх карт розвитку водневої інфраструктури на національному та регіональному рівнях.

Запропонований підхід дає змогу перейти від якісного опису сценаріїв розвитку водневої мобільності до кількісної оцінки та просторової конкретизації рішень. Саме через варіювання набору факторів та їх вагових коефіцієнтів у формулі інтегрального показника S_i , забезпечується зв'язок між стратегічними сценаріями розвитку ринку водневого транспорту та конкретними просторовими рішеннями щодо розміщення H_2 -заправних станцій. Це дає змогу адаптувати модель до різних рівнів ризику, темпів зростання попиту та доступності інфраструктури, що є особливо важливим в умовах високої невизначеності.

Для ілюстрації відмінностей між сценаріями в табл. 1 наведено приклад набору ключових факторів та їх вагових коефіцієнтів, що використовуються під час розрахунку інтегрального показника доцільності розміщення H_2 -заправок:

Таблиця 1. Приклад факторів та вагових коефіцієнтів для різних сценаріїв розвитку мережі H_2 -заправок

Група факторів	Показник	Базовий сценарій	Помірно оптимістичний сценарій	Прискорений сценарій
Енергетичні	Потенціал ВДЕ (електроліз)	0,15	0,20	0,25
Транспортні	Інтенсивність трафіку, близькість до магістралей	0,15	0,20	0,25
Ринкові	Очікуваний попит на H_2 -транспорт	0,10	0,20	0,25
Інфраструктурні	Наявність існуючих АЗС, промзон, підстанцій	0,25	0,15	0,10
Соціально-інституційні	Підтримка громад, регуляторна готовність	0,20	0,15	0,10
Ризикові	Безпекові, логістичні, фінансові ризики*	- 0,15	- 0,10	- 0,05

* Ризикові фактори входять до формули зі знаком «мінус» та зменшують інтегральний показник S_i .

Як видно в табл. 1, у базовому сценарії пріоритет надається мінімізації ризиків та використанню вже наявної інфраструктури, що відповідає логіці пілотного впровадження H_2 -заправок за умов обмеженого попиту. У помірно оптимістичному сценарії ваги факторів стають більш збалансованими, зростає роль транспортної доступності та ринкового попиту, що відповідає етапу керованого розвитку мережі. Прискорений сценарій характеризується домінуванням факторів попиту та потенціалу ВДЕ, тоді як вплив ризиків істотно

зменшується, що відображає логіку масштабного інвестування та інтеграції України у міжнародні водневі коридори.

Таким чином, варіація вагових коефіцієнтів у GIS-моделі дає змогу формувати різні просторові конфігурації мережі H_2 -заправок, зберігаючи при цьому єдину методологічну основу. Це робить запропонований підхід універсальним інструментом для аналізу інвестиційної привабливості, підтримки стратегічного планування та

підготовки дорожніх карт розвитку водневої мобільності в Україні.

Для деталізації запропонованого підходу було виконано апробацію методики на рівні міста Києва, який розглядається як ключовий вузол потенційного розвитку водневої мобільності в Україні. Київ характеризується високою транспортною інтенсивністю, значною концентрацією споживачів, розвиненою інженерною інфраструктурою та наявністю логістичних зв'язків на національному й міжнародному рівнях, що робить його пріоритетною територією для інвестування в H₂-заправну інфраструктуру.

У межах дослідження було виділено п'ять умовних зон-кандидатів для розміщення H₂-заправних станцій, які відповідають різним типам міського простору: транспортні вузли, промислові зони, периферійні райони та

зони концентрації логістики. Для кожної з них виконано оцінку за розробленою багатофакторною моделлю.

Вихідні локації для оцінювання (Київ):

- Кільцева дорога (західна ділянка)
- Лівобережний промислово-логістичний вузол (Дарницький район)
- Південний в'їзд до міста (район Столичного шосе)
- Північний логістичний вузол (Оболонь – Вишгородський напрям)
- Промислова зона Святошине

Оцінювання здійснювалось за помірно оптимістичним сценарієм з використанням формули інтегрального показника:

$$S_i = 0,20P_i + 0,20T_i + 0,20D_i + 0,15I_i - 0,10R_i$$

Таблиця 2. Результати оцінювання потенційних локацій H₂-заправок у м. Києві

Локація	Потенціал ВДЕ, P	Трафік, T	Попит, D	Інфраструктура I	Ризик, R	Інтегральний показник, S_i
Кільцева дорога (Захід)	0,65	0,95	0,85	0,80	0,30	0,47
Столичне шосе (Південь)	0,70	0,90	0,80	0,75	0,35	0,44
Дарницький промвузол	0,60	0,85	0,75	0,70	0,40	0,40
Оболонський напрям	0,655	0,80	0,70	0,65	0,35	0,38
Святошинська промзона	0,50	0,70	0,65	0,75	0,30	0,36

Отримані результати свідчать, що найвищу інвестиційну привабливість мають локації, розташовані на зовнішніх транспортних кільцях та основних в'їздах до міста. Західна ділянка Кільцевої дороги демонструє максимальне значення інтегрального показника ($S_i = 0,47$), що пояснюється поєднанням надвисокої транспортної інтенсивності, доступу до інженерної інфраструктури та можливості обслуговування як міського, так і транзитного транспорту.

Південний в'їзд до Києва (Столичне шосе) є другим за пріоритетністю напрямком і може розглядатись як оптимальна локація для першої фази інвестування. Промислові та логістичні зони Лівобережжя доцільно додавати в наступні етапи розгортання мережі, орієнтуючись на вантажний та муніципальний транспорт.

Таким чином, запропонована методика дає змогу перейти від загальних сценаріїв розвитку водневої мобільності до конкретних інвестиційних рішень на рівні міста, забезпечуючи прозору та кількісно обґрунтовану логіку вибору локацій для розміщення H₂-заправних станцій.

У GIS-середовищі результати можуть бути представлені у вигляді теплової карти або рейтингового шару, де зони з $S_i > 0,45$ визначаються як першочергові інвестиційні зони, 0,40–0,45 – зони середнього пріоритету, а нижчі

значення – резервні території для подальших етапів розвитку мережі.

Для різних сценаріїв (базового, помірно оптимістичного та прискореного) у GIS-моделі змінюються лише вагові коефіцієнти факторів, тоді як просторові шари залишаються незмінними. Це дає змогу порівнювати сценарії між собою шляхом накладання тематичних карт і виявляти території, стабільно привабливі для інвестування, а також зони, чутливі до змін ринкових або регуляторних умов.

Отже, використання GIS забезпечує практичний зв'язок між стратегічними сценаріями розвитку водневої мобільності та конкретними просторовими рішеннями, даючи нагоду трансформувати результати наукового аналізу у формат, придатний для інвестиційного планування та розробки дорожніх карт розвитку водневої інфраструктури.

З урахуванням проведеного сценарного та GIS-аналізу розвиток H₂-заправної інфраструктури доцільно розглядати не як розміщення окремих заправних станцій, а як формування цілісної мережі, здатної забезпечити безперервність водневих транспортних маршрутів та масштабування ринку водневої мобільності.

Запропонований підхід передбачає ієрархічну структуру мережі H₂-заправок, яка містить три функціональні

рівні. Ядром мережі виступають вузлові заправні станції, розташовані у великих міських агломераціях та логістичних центрах (Київ, великі обласні центри), які забезпечують базовий попит та формують початковий ринок. Другий рівень охоплює коридорні заправки, розміщені вздовж основних транспортних магістралей і міжнародних маршрутів, що забезпечують зв'язність мережі та можливість міжрегіональних перевезень. Третій рівень формують локальні або спеціалізовані станції, орієнтовані на муніципальний, промисловий або комерційний транспорт.

У межах базового сценарію розвиток мережі обмежується формуванням ядра з мінімально необхідною кількістю вузлових заправок. Помірно оптимістичний сценарій передбачає доповнення ядра коридорними елементами, що забезпечує початкову зв'язність мережі на національному рівні. Прискорений сценарій орієнтований на повноцінне формування багаторівневої мережі

з високим ступенем покриття території та інтеграцією в європейські водневі транспортні коридори.

Таким чином, GIS-модель і багатофакторна система оцінювання використовуються не лише для вибору окремих локацій, а і як інструмент планування конфігурації мережі в цілому, визначення етапності її розгортання та пріоритетів інвестування. Це дає змогу перейти від локальних інвестиційних рішень до стратегічного бачення розвитку водневої заправної інфраструктури в Україні.

На основі сценарного аналізу та GIS-моделювання розвиток мережі водневих заправних станцій доцільно розглядати як ієрархічну просторово-функціональну систему, що формується поетапно та забезпечує масштабування ринку водневої мобільності. У межах такого підходу мережа H₂-заправок структурно поділяється на три взаємопов'язані рівні: ядро, коридори та периферію (рис. 2).

Схематичне представлення ієрархічної структури мережі H₂-заправок (ядро – коридори – периферія)

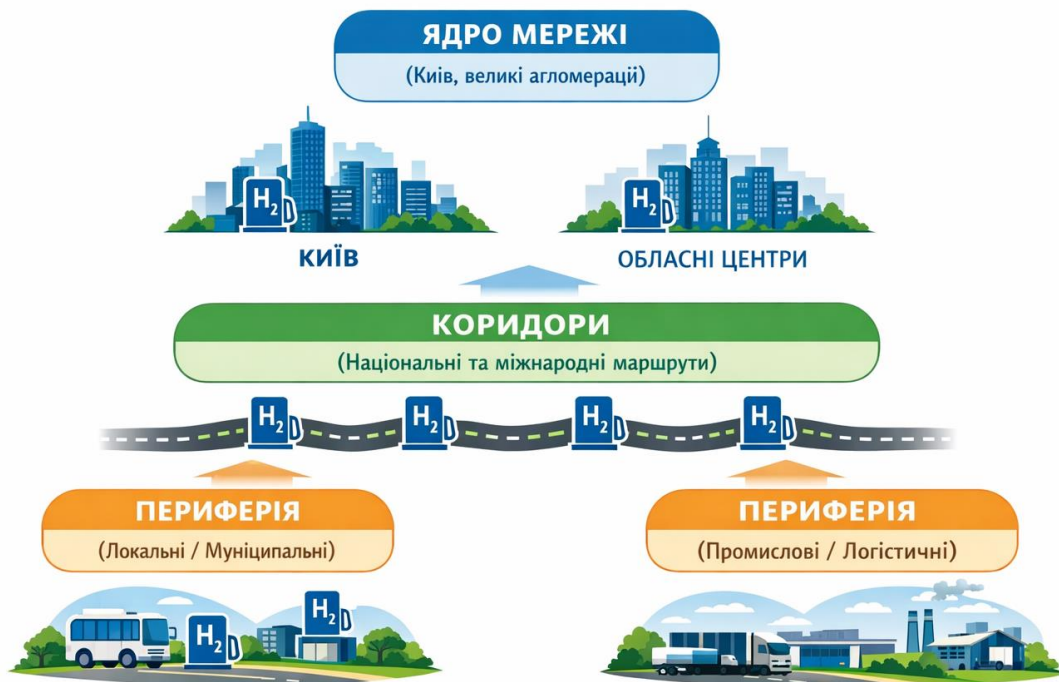


Рис. 2. Схематичне представлення ієрархічної структури H₂-заправок

Ядро мережі формується у великих міських агломераціях та логістичних центрах з найвищою концентрацією транспортного попиту, розвиненою інженерною інфраструктурою та інституційною готовністю. Саме ці вузлові заправні станції виконують роль «якорів» мережі, забезпечуючи базовий попит і створюючи початкові умови для комерційного використання водневого транспорту. У контексті України до ядра мережі належать Київ та інші найбільші обласні центри, де можливе поєднання міського, муніципального та вантажного водневого транспорту.

Коридорний рівень мережі – це заправні станції, розташовані вздовж основних національних і міжнародних транспортних магістралей. Їх призначення полягає в

забезпеченні просторової зв'язності мережі та можливості міжрегіональних і транзитних перевезень. Коридорні заправки з'єднують ядра між собою, формуючи безперервні водневі маршрути, і є критично важливими для розвитку вантажного та міжміського транспорту на паливних елементах.

Периферійний рівень охоплює локальні або спеціалізовані H₂-заправки, орієнтовані на конкретні сегменти попиту: муніципальний транспорт, промислові кластери, порти, логістичні хаби або регіони з перспективним, але ще не сформованим ринком. Периферійні елементи мережі відіграють роль адаптивного шару, що дає змогу поступово розширювати покриття без надмірних початкових інвестицій.

Такий трирівневий підхід забезпечує гнучке планування мережі H_2 -заправок, у межах якого GIS-модель використовується для визначення конкретних локацій на кожному рівні, а сценарний аналіз – для вибору темпів і послідовності їх розгортання. У базовому сценарії формується переважно ядро мережі, у помірно оптимістичному – додається коридорна зв'язність, тоді як прискорений сценарій передбачає повноцінне розгортання всіх трьох рівнів.

Подальша деталізація запропонованого підходу здійснюється шляхом адаптації ієрархічної схеми мережі H_2 -заправок до конкретних сценаріїв розвитку. На рис. 3 представлено три варіанти конфігурації мережі, які відповідають базовому, помірно оптимістичному та прискореному сценаріям і відображають різний рівень просторового охоплення та функціональної зрілості водневої інфраструктури.

Ієрархія розвитку мережі H_2 -заправок за різними сценаріями

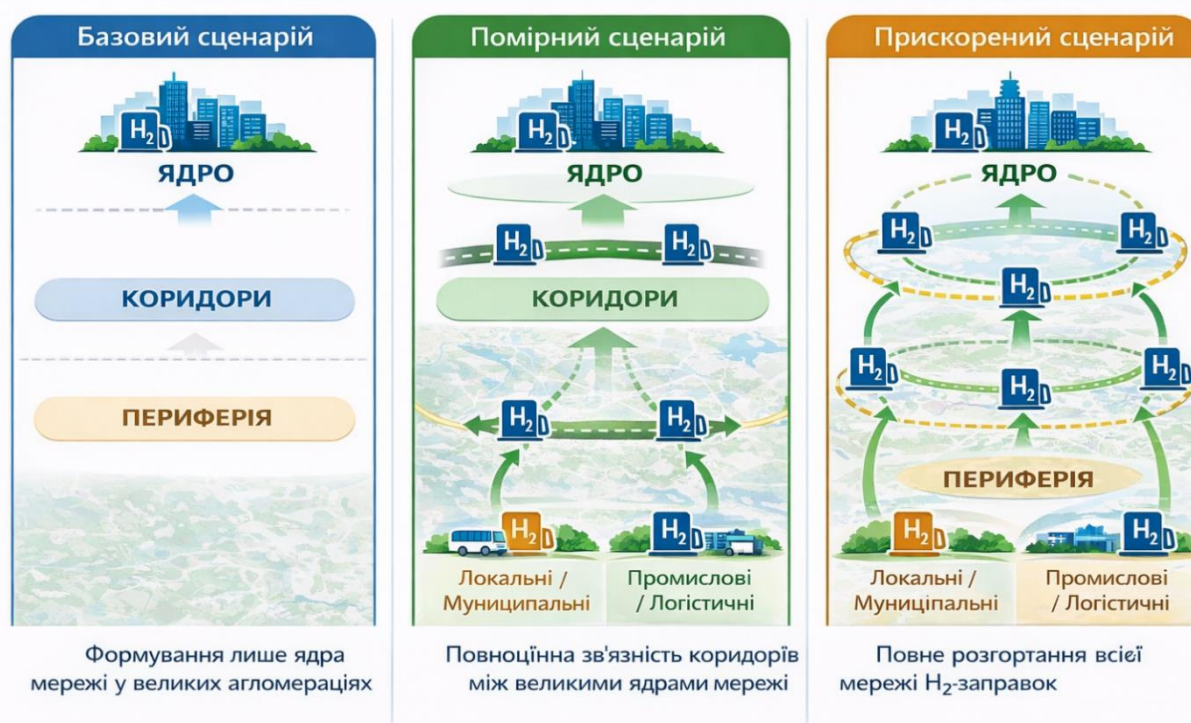


Рис. 3. Ієрархія розвитку мережі H_2 -заправок за різними сценаріями

У базовому сценарії мережа формується переважно навколо вузлових елементів – ядер, розташованих у найбільших міських агломераціях і логістичних центрах. Така конфігурація орієнтована на запуск пілотних проєктів, формування первинного попиту та мінімізацію інвестиційних і регуляторних ризиків. Просторова зв'язність між окремими елементами мережі на цьому етапі є обмеженою, а коридорні та периферійні заправки мають фрагментарний характер.

Помірно оптимістичний сценарій передбачає перехід від точкового розвитку до формування зв'язаної мережі за рахунок розвитку коридорних елементів уздовж основних транспортних напрямків. У цьому разі ядра мережі поєднуються між собою водневими коридорами, що забезпечує можливість міжміських і міжрегіональних перевезень та створює передумови для масштабування ринку водневого транспорту. Периферійні елементи на цьому етапі відіграють допоміжну роль і зосереджуються у зонах зі стабільним або прогнозованим попитом.

У прискореному сценарії реалізується повноцінна багаторівнева мережа, у якій ядро, коридори та периферія

функціонують як єдина система. Така конфігурація забезпечує високий рівень просторового покриття, резервування маршрутів і адаптивність мережі до зростання попиту на водневий транспорт. Периферійні заправні станції в цьому разі стають важливим елементом розширення мережі, орієнтованим на спеціалізовані сегменти – муніципальний, промисловий або логістичний транспорт.

Отже, представлена серія схем наочно демонструє еволюцію мережі H_2 -заправок від початкової вузлової структури до інтегрованої просторово-функціональної системи. Це підкреслює, що сценарний аналіз у поєднанні з GIS-моделюванням дає змогу не лише обґрунтувати розміщення окремих заправних станцій, а й сформувати цілісне бачення розвитку мережі водневої інфраструктури з урахуванням етапності, інвестиційних можливостей та стратегічних цілей декарбонізації.

Формування мережі H_2 -заправних станцій у межах різних сценаріїв розвитку водневої мобільності пропонується здійснювати на основі поєднання сценарного прогнозування попиту, багатофакторної просторової оцінки та елементів задачі оптимального розміщення інфраструктури. У цьому дослідженні кожне потенційне

місце розташування станції заправки H_2 розглядається як просторовий об'єкт, що характеризується набором кількісних атрибутів, що відображають енергетичні, транспортні, соціально-економічні та пов'язані з ризиком особливості території. Потенційні локації розміщення H_2 -заправок оцінюються за інтегральним показником придатності.

$$S_{i,s} = \sum_k w_{k,s} X_{i,k} - \sum_j r_{j,s} R_{i,j},$$

де $X_{i,k}$ – нормалізовані позитивні фактори (транспортна доступність, ефективна доступність ВДЕ для електролізу, інфраструктурна готовність), $R_{i,j}$ – фактори ризику, а вагові коефіцієнти $w_{k,s}$, $r_{j,s}$ залежать від вибраного сценарію.

Формування мережі здійснюється шляхом відбору набору локацій $y_i, t \in \{0,1\}$, що максимізує покриття прогнозованого попиту та забезпечує коридорну зв'язність між вузловими елементами мережі за умов бюджетних, інфраструктурних і просторових обмежень. У GIS-середовищі це реалізується як поєднання задачі покриття попиту та коридорного планування, результатом чого є сценарно залежна конфігурація мережі типу «ядро – коридори – периферія», придатна для подальшої візуалізації та використання в інвестиційному й просторовому плануванні розвитку водневої інфраструктури України

Українська специфіка розвитку мережі H_2 -заправок враховується в моделі через систему ризикових коефіцієнтів, що відображають інфраструктурні, регуляторні та безпекові обмеження, а також нерівномірність розвитку енергетичних і транспортних вузлів. Це дає змогу адаптувати сценарне планування та GIS-моделювання до умов трансформації енергетичного сектору України.

Запропоноване дослідження спрямоване на подолання розриву між загальними стратегіями розвитку водневої енергетики та практичними завданнями просторового планування інфраструктури водневої мобільності. На відміну від більшості існуючих робіт, у яких водневі заправні станції розглядаються як окремі інфраструктурні об'єкти, у цій статті зроблено акцент на формуванні мережі H_2 -заправок як цілісної просторово-функціональної системи, що розвивається поетапно та залежить від сценаріїв попиту, інвестиційних можливостей і ризиків.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні сценарного аналізу розвитку водневої мобільності з GIS-орієнтованою багатофакторною моделлю планування мережі заправних станцій, адаптованою до українських реалій. Запропоновано формалізований механізм переходу від стратегічних сценаріїв до конкретних просторових рішень, який дає змогу одночасно враховувати прогноз попиту, транспортну зв'язність, енергетичні обмеження, інфраструктурну готовність та регіональну специфіку ризиків. Особливістю підходу є використання ієрархічної структури мережі типу «ядро – коридори – периферія» як базового принципу планування, що забезпечує масштабованість і адаптивність мережі в часі.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати такі узагальнювальні висновки:

Висновок

Запропонований сценарно-GIS-орієнтований підхід забезпечує науково обґрунтоване бачення формування мережі H_2 -заправок в Україні та може використовуватися як методична основа для стратегічного й інвестиційного планування водневої мобільності.

1. Показано, що планування водневих заправних станцій на рівні цілісної мережі є методично обґрунтованішим за точкове розміщення окремих об'єктів, оскільки забезпечує просторову зв'язність, поетапність розгортання та масштабованість інфраструктури.
2. Обґрунтовано доцільність використання ієрархічної структури мережі типу «ядро – коридори – периферія» як базового принципу сценарного планування розвитку H_2 -заправок в умовах України.
3. Розроблено та формалізовано сценарно орієнтовану математичну модель планування мережі H_2 -заправок, що поєднує прогноз попиту, багатофакторну оцінку придатності локацій та просторові обмеження покриття і транспортної зв'язності з можливістю реалізації в GIS-середовищі.
4. Показано, що зміна параметрів і вагових коефіцієнтів моделі дає змогу формувати різні конфігурації мережі для базового, помірно оптимістичного та прискореного сценаріїв без зміни загальної методичної структури.
5. Отримано практичні просторові рішення на прикладі міста Києва та Київської області, які демонструють можливість переходу від сценарного бачення до конкретних рекомендацій щодо розміщення елементів мережі H_2 -заправних станцій.
6. Доведено, що врахування української специфіки ризиків – інфраструктурної неоднорідності, обмежень енергосистеми, логістичних і регуляторних чинників – є необхідною умовою формування реалістичних сценаріїв розвитку водневої заправної інфраструктури.

До перспектив подальших досліджень належать уточнення параметрів моделі на основі фактичних GIS-даних, інтеграція економічних показників вартості виробництва і логістики водню, а також розширення підходу на міжрегіональний і транскордонний рівні в контексті європейських водневих коридорів.

Рисунки 1–3 були створені авторами з використанням інструментів штучного інтелекту на основі розробленої в дослідженні методики та отриманих результатів.

ПОСИЛАННЯ

1. United Nations Economic Commission for Europe. *Hydrogen Roadmap Draft Report for Ukraine*. Draft report. Geneva: UNECE, 2021. Available online: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/Hydrogen%20Roadmap%20Draft%20Report_UKR%20March%202021.pdf
2. California Air Resources Board; California Energy Commission. *Joint Agency Staff Report on Assembly Bill 126: 2024 Annual Assessment of the Hydrogen Refueling Network in California*. Sacramento, CA: CARB & CEC, 2025. Available online: <https://www.energy.ca.gov/publications/2025/joint-agency-staff-report-assembly-bill-126-2024-annual-assessment-hydrogen>
3. Sujan, V., Fan, J., Jatana, G., Sun, R. *Nationally Scalable Hydrogen Fueling Infrastructure Deployment: A Megaregion Analysis and Optimization Approach*. arXiv preprint, 2024. Available online: <https://arxiv.org/abs/2410.06033>
4. Han, G., Pan, H., Liu, Y., Li, Q., Wang, P. A methodology for integrating hydrogen refueling stations in multi-microgrids and coordination of distribution systems and transmission system operators. *Energy*, 2025, Vol. 322, Article 135634. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135634>
5. Apostolou, D., Xydis, G. A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure: Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol. 113, Article 109292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109292>
6. Kurtz, J. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and lessons learned. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. Available online: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1506613>
7. Kluschke, P., Neumann, F. Interaction of a hydrogen refueling station network for heavy-duty vehicles and the power system in Germany for 2050. arXiv preprint, 2019. Available online: <https://arxiv.org/abs/1908.10119>
8. Миськів, Г. М., Іваницький, Р. С. Основні тенденції розвитку водневих технологій на транспорті. *Економіка та суспільство*, 2023, № 55. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-2>
9. Репкін, О. О. Aspects of the development of hydrogen energy in Ukraine by using energy from renewable sources. *Відновлювана енергетика*. 2023. Available online: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/417>
10. Кудря, С. О. Stages of green hydrogen energy development of Ukraine. *Відновлювана енергетика*, 2022. Available online: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/325>
11. Будько, І. В. Features of the implementation of a solar-hydrogen autonomous gas station for electric vehicles. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 2. Available online: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/467>
12. Filina-Dawidowicz, L., Miłek, D., Baziuké, D. The concept of an infrastructure location to supply buses with hydrogen: A case study of the West Pomeranian Voivodeship in Poland. *Energies*, 2025, Vol. 18, Article 3026. <https://doi.org/10.3390/en18123026>
13. Кудря, С. О., Зур'ян, О. В., Зур'ян, О. В. Принципи формування шару інвестиційної привабливості у GIS-карті проєктів зеленої водневої енергетики. *Відновлювана енергетика*. 2025. № 3(82). С. 145–154. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).145-154](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).145-154)
14. Мхітарян, Н. М., Кудря, С. О., Зур'ян, О. В. Концепція створення інтерактивної карти інвестиційної привабливості зеленого водню в Україні. *Відновлювана енергетика*. 2025. № 2(81). С. 151–161. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).151-161](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).151-161)
15. Governor's Office of Business and Economic Development (GO-Biz). *Hydrogen Station Permitting Guidebook*. Sacramento, CA, 2020. Available online: https://business.ca.gov/wp-content/uploads/2019/12/GO-Biz_Hydrogen-Station-Permitting-Guidebook_Sept-2020.pdf

APPROACHES TO PLANNING A HYDROGEN REFUELING STATION NETWORK IN UKRAINE BASED ON SCENARIO ANALYSIS AND GIS MODELING

Received Feb. 26, 2026; accepted Mar. 23, 2026
Available online Mar. 31, 2026

Kudria S.¹, Zurian O.²

Author for correspondence: Zurian Oleksii,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ Corresponding Member of the NAS of Ukraine,
Dr. of Sciences (Engin.), Professor
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² Dr. of Sciences (Engin.)
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

^{1,2} Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine

Abstract. *This paper presents the development of a scientifically grounded approach to planning a network of hydrogen refuelling stations in Ukraine as a key component of hydrogen mobility development and the low-carbon energy transition. The relevance of the study is driven by the need to move from point-based deployment of individual H₂ refueling stations to the formation of an integrated, spatially connected network capable of supporting market scaling under conditions of limited investment resources and increased uncertainty. The study proposes a scenario- and GIS-oriented framework for hydrogen refueling network planning that combines hydrogen demand forecasting, multi-criteria spatial assessment of potential locations, and a formalized mechanism for network formation. The feasibility of applying a hierarchical network structure of the “core – corridors – periphery” type is substantiated as a fundamental principle of spatial planning. Three baseline scenarios for the deployment of hydrogen refueling infrastructure in Ukraine up to 2035 are analyzed and represented through schematic models of network hierarchy and scenario-dependent network evolution. A mathematical model is developed in which network development is formalized through scenario-dependent parameters accounting for transport demand, effective availability of renewable energy sources for electrolysis, infrastructure readiness, and risk factors specific to Ukrainian conditions. It is shown that the proposed model is suitable for implementation in a GIS environment and can serve as a basis for the creation of an interactive hydrogen refueling network map with spatial resolution down to the level of territorial communities. This represents a significant advancement compared to previous approaches limited to regional or oblast-level analysis. It is concluded that the proposed scenario-based GIS framework provides a coherent and scientifically substantiated vision for the development of a hydrogen refueling station network in Ukraine and may serve as a methodological foundation for strategic, investment, and spatial planning of hydrogen mobility.*

Keywords: *education, specialists, hydrogen mobility, hydrogen refueling station network, scenario analysis, GIS-based modeling, infrastructure planning, renewable energy sources, hydrogen electrolysis, investment attractiveness, territorial communities.*

List of Abbreviations and Symbols

EU – European Union

RES – Renewable Energy Sources

H₂ – Hydrogen

H₂ refueling station (HRS) – hydrogen refuelling station

GIS – Geographic Information System

FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle

MCA – Multi-Criteria Analysis

MCDA – Multi-Criteria Decision Analysis

LCA – Life Cycle Assessment

HM – Hydrogen Mobility

Filling station (FS) – conventional fuel filling station

RES-based electrolysis – hydrogen production via electrolysis using renewable energy sources

EU4Energy – European Union regional initiative aimed at supporting energy sector reforms in Eastern Partnership countries

S_i – integrated suitability index for locating an H₂ refuelling station

P_i – indicator of effective availability of renewable energy sources for electrolysis

T_i – transport intensity and accessibility indicator

I_i – infrastructure readiness indicator

R_i – integrated risk indicator

Introduction. In the context of global climate challenges and the urgent need to reduce greenhouse gas emissions, the development of hydrogen energy is gaining increasing relevance. The European Union, the United States, Japan, and

other leading economies are actively implementing strategies aimed at transitioning toward a low-carbon energy system, in which hydrogen — particularly green hydrogen produced via water electrolysis using renewable energy sources

— plays a pivotal role. The transport sector, as one of the major contributors to CO₂ emissions, is considered a promising area for hydrogen deployment, which necessitates the development of appropriate infrastructure, including refueling stations for fuel cell electric vehicles.

For Ukraine, which possesses significant potential for the development of renewable energy sources (RES) — including wind, solar, and bioenergy — hydrogen is regarded not only as a decarbonization tool but also as a strategic direction for integration into the European energy space. According to the *Hydrogen Roadmap Draft Report for Ukraine* [1], national objectives envisage the gradual establishment of hydrogen transport infrastructure, including refueling stations. However, the absence of a coordinated spatial planning framework for such infrastructure, along with the underestimation of investment and social risks, constrains its development.

Considering international experience, where comprehensive models for hydrogen infrastructure planning have already been implemented, there is a clear need to adapt similar approaches to Ukrainian conditions. Such adaptation must account for technical, economic, social, and spatial factors influencing the feasibility of siting and the deployment schedule of hydrogen refueling stations. The development of a scenario-based model for the expansion of this infrastructure would help identify promising opportunities for investors and establish an analytical foundation for strategic decision-making at the national level.

Problem Statement. Despite the existence of strategic documents declaring support for the development of hydrogen energy in Ukraine, the issue of establishing refueling infrastructure for fuel cell transport remains unresolved both in technical and spatial dimensions. In global practice, hydrogen infrastructure planning relies on demand-driven mathematical models [3], scenario-based modeling, and geospatial analysis [3], [4]. For Ukraine, it is essential to adapt these approaches while taking into account its renewable energy potential, transport infrastructure, and socio-economic specificities.

The aim of this study is to substantiate development scenarios for a network of H₂ refueling stations for road transport in Ukraine based on a systems analysis framework, considering the potential for green hydrogen production, transport accessibility, regional demand, infrastructure preconditions, and existing risks. Particular attention is paid to a mathematical approach for assessing the feasibility of station siting, with the possibility of further visualization of results within a GIS-based model.

The objectives of the study include:

- summarizing international experience in spatial planning of hydrogen infrastructure;
- identifying key factors influencing the feasibility of constructing H₂ refueling stations in Ukraine;
- developing a multi-factor model for assessing regional suitability for infrastructure deployment;

- designing three development scenarios for the refueling network (minimal, moderate, and intensive);
- establishing a methodological foundation for creating an interactive map of investment attractiveness for relevant projects.

The proposed approach integrates analytical depth with applied tools and may be useful not only for researchers but also for practitioners, including investors, urban planners, and representatives of public authorities.

Literature Review

In contemporary scientific literature, the development of hydrogen infrastructure is considered a key component of transforming the transport sector toward a low-carbon future. In particular, the authors of [5] conducted a comprehensive review of H₂ refuelling stations, emphasizing the critical interdependence between the growth of the fuel cell vehicle fleet and the expansion of refueling infrastructure. Study [6] analyzes the U.S. experience, focusing on the efficient spatial deployment of hydrogen refueling stations (HRS) with consideration of logistics and traffic density. Research [7], in the context of Germany, highlights the necessity of coordinating the development of refueling networks with the capabilities of the power system.

Similar issues are addressed in Ukrainian scientific publications. In particular, study [8] characterizes the main challenges and directions of hydrogen mobility development in Ukraine, with an emphasis on cross-sectoral infrastructure integration. Special attention should be paid to research published in the journal *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, particularly paper [9], which analyzes the development prospects of hydrogen energy based on renewable energy sources under conditions of post-war recovery. In the same journal, the author examines the stages of forming a national hydrogen strategy, emphasizing the need to combine technological innovation with state policy in the development of H₂ infrastructure [10].

Among applied studies, publication [11] deserves attention, as it is devoted to the implementation of an autonomous solar-hydrogen refueling station for electric vehicles, illustrating the potential of integrating decentralized hydrogen production with autonomous refueling systems [12]. The review is complemented by European models, such as research on the spatial planning of HRS for bus transport, taking into account access to renewable energy sources [12].

At the same time, a significant contribution to the study of the investment dimension of green hydrogen has been made in works [13, 14], which provide detailed methodological approaches to assessing the investment attractiveness of hydrogen projects in Ukraine from the perspective of spatial planning, risk analysis, and scenario modeling. These publications serve as the methodological foundation for the development of the GIS-based map and the H₂ refueling station deployment scenarios proposed in this study.

Thus, both international and domestic research confirm the scientific and practical relevance of the topic. They

establish the foundation for forming an integrated strategy for the development of H₂ refueling infrastructure in Ukraine, taking into account energy, logistical, infrastructural, and social factors.

Main Body of the Study

Given the stated objective - substantiating possible scenarios for the development of an H₂ refueling station network in Ukraine - it is essential to refer to successful international experience in spatial planning of hydrogen infrastructure. As an example of an effective integrated approach, the model implemented in the state of California (USA), which is one of the leaders in hydrogen mobility development, is considered. In this region, a state-supported program operates to establish a refueling station network designed to meet the needs of several hundred thousand hydrogen-powered vehicles by the end of the current decade.

A distinctive feature of the Californian approach is the use of a set of complementary analytical tools. The STIEVE model (Station Siting and Investment Evaluation) enables the identification of optimal locations for H₂ refueling stations based on projected demand, traffic density, population distribution, and transport accessibility. Complementing this, the SERA model (Scenario Evaluation and Regional Analysis) performs scenario-based assessments for different regions, taking into account hydrogen production costs and supply logistics. In addition, the GOOD model (Grid Optimized Output Distribution) incorporates parameters of the energy infrastructure, particularly the potential use of renewable energy sources to power electrolyzers. An important role in the technical validation and standardization of station performance is played by the HySTEP tool (Hydrogen Station Equipment Performance), which evaluates the operational quality of H₂ station equipment, and the HySCapE model (Hydrogen Station Capacity Evaluation), which assesses the daily dispensing capacity of a station. These tools are applied in California to ensure standardized technical validation and comparability of design solutions [15].

The outcome is an integrated strategic planning system that combines technical, spatial, and economic factors. The proposed models provide a transparent logic for infrastructure development, closely aligned with actual investment plans, including those financed through the California Energy Commission. Such experience is of particular interest to Ukraine, where similar tools are not yet widely implemented but could be adapted with due consideration of national characteristics of the energy system, transport structure, and spatial development patterns.

Taking global approaches to hydrogen infrastructure into account allows for a better understanding of the potential for H₂ refueling station development in Ukraine. However, the implementation of such projects requires an in-depth analysis of domestic preconditions, ranging from energy capabilities to regulatory frameworks and economic feasibility.

From the perspective of energy potential, Ukraine possesses significant prerequisites for large-scale green hydrogen production via electrolysis based on renewable energy sources. The southern and south-eastern regions (Odesa, Mykolaiv,

and Kherson regions) are particularly promising, as large-scale wind and solar power projects have already been developed or initiated there. According to the national Hydrogen Strategy, adopted on the basis of the 2021 analytical report, Ukraine has the potential to produce more than 1 million tons of hydrogen annually by 2030, enabling both export and domestic consumption in transport and industry.

From a technological standpoint, Ukraine has qualified scientific expertise as well as experience in developing demonstration electrolyzer installations and H₂ refueling modules. These competencies could be rapidly scaled up under conditions of sufficient investment support.

Economic and investment factors also demonstrate positive dynamics. Publications [13, 14] confirm the availability of methodological approaches for spatial assessment of the investment attractiveness of hydrogen projects using GIS technologies, enabling the identification of optimal locations for H₂ refueling stations. In particular, such locations include regions with high traffic intensity, intersections of major logistics routes, and proximity to existing or prospective renewable energy sources.

The institutional and regulatory environment in Ukraine is currently undergoing active formation. The National Decarbonization Strategy, the Ukraine Recovery Plan, and the “green” initiatives of the Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development lay the groundwork for stimulating investment in hydrogen infrastructure. Technical standards for H₂ refueling stations are presently being developed in alignment with European norms. This creates opportunities for harmonization with the European market and for attracting international partners, for example, within the framework of Hydrogen Corridor projects or the EU4Energy initiative.

From a social perspective, the growing interest of local communities in the development of energy clusters and eco-transport systems creates favorable conditions for locally driven decisions regarding the deployment of hydrogen infrastructure.

Thus, Ukraine possesses a set of positive preconditions for the development of an H₂ refueling station network. Their effective realization requires the integration of spatial planning, scientific innovation, regulatory support, and public-private partnerships, which form the basis for the subsequent scenario analysis.

Given the identified preconditions, planning the development of an H₂ refueling station network in Ukraine necessitates the application of a scenario-based approach capable of addressing uncertainty in economic, technological, and geopolitical contexts. Such an approach is widely used in international practice (notably in California, Germany, and Japan) to model future infrastructure configurations in accordance with variable input parameters - from the cost of electrolysis to the growth rate of the fuel cell vehicle fleet.

Based on the analysis of the literature, this study proposes three baseline scenarios for the deployment of H₂ refueling infrastructure in Ukraine up to 2035 (Fig. 1).

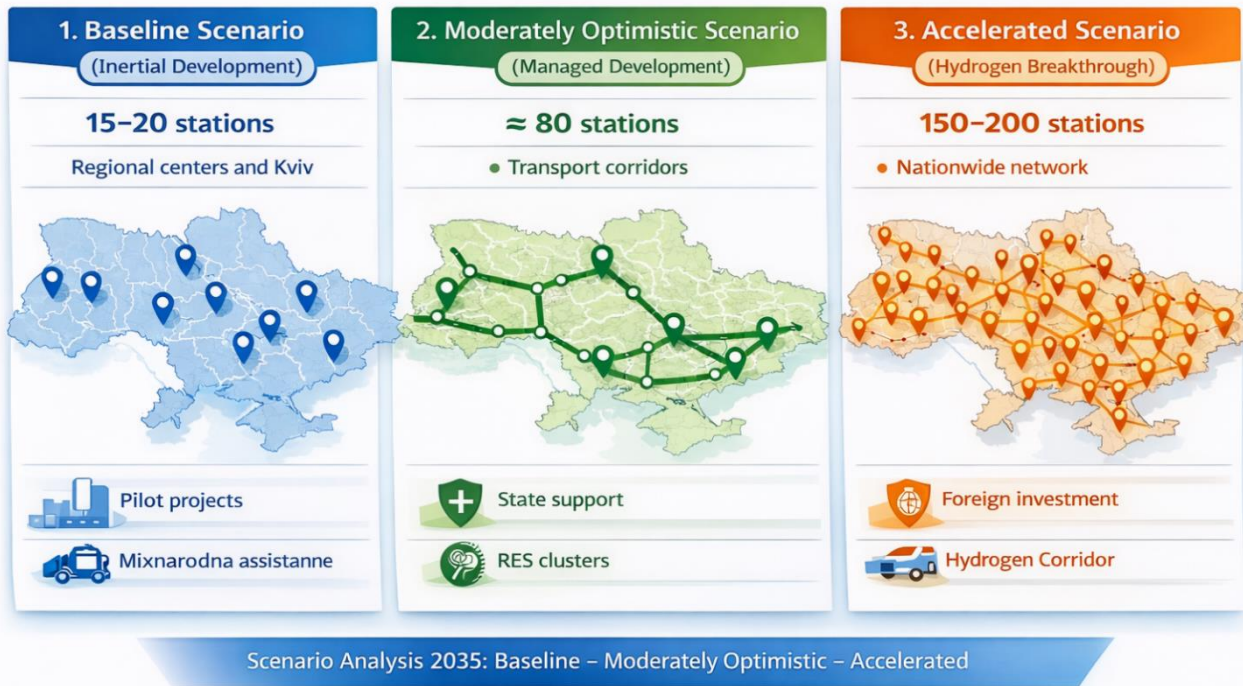
SCENARIOS FOR THE DEPLOYMENT OF H₂ REFUELING NETWORK IN UKRAINE UNTI 2035

Fig. 1. Three basic scenarios for the deployment of H₂ refueling infrastructure in Ukraine by 2035

1. Baseline Scenario (Inertial Development)

This scenario assumes the gradual formation of hydrogen infrastructure without substantial governmental incentives or large-scale private investments. Refueling stations are established primarily within pilot projects or through international technical assistance programs (for example, as part of post-war critical infrastructure recovery initiatives). The expected scale is up to 15–20 H₂ refueling stations, mainly concentrated in regional centers and in the Kyiv metropolitan area.

2. Moderately Optimistic Scenario (Managed Development)

This scenario presupposes an active role of the state in shaping the regulatory environment, implementing public-private partnership mechanisms, and stimulating domestic demand (for instance, through incentives for municipal transport or logistics companies). It also envisages integration with local renewable energy sources and the development of regional hydrogen clusters. By 2035, the deployment of up to 80 H₂ refueling stations is considered feasible, covering major transport corridors (Kyiv–Lviv, Kyiv–Odesa, Kyiv–Kharkiv, Kharkiv–Dnipro).

3. Accelerated Scenario (Hydrogen Breakthrough)

This scenario is based on the active involvement of foreign investors, rapid adaptation of European standards, and participation in cross-border initiatives (such as the Central European Hydrogen Corridor, CEHC). It also accounts for the potential expansion of hydrogen-powered transport

(passenger cars, heavy-duty vehicles, and buses) driven by decarbonization commitments. By 2035, the deployment of approximately 150–200 refueling stations is envisaged, ensuring relatively uniform territorial coverage across Ukraine and integration into logistics and export chains.

The proposed deployment scenarios for the H₂ refueling station network require quantitative substantiation and spatial interpretation, which justifies the application of geographic information systems (GIS) in combination with a multi-factor evaluation model. Such an approach enables the transition from descriptive scenarios to a formalized decision-support tool for investment and management purposes.

Within this study, each potential location for an H₂ refueling station is treated as a spatial object characterized by a set of quantitative attributes reflecting the energy, transport, socio-economic, and risk-related features of the territory. The integrated feasibility indicator for station deployment at location i can be expressed as a weighted sum:

$$S_i = \sum_{k=1}^n w_k \cdot X_{ik} - \sum_{j=1}^m r_j \cdot R_{ij},$$

S_i – integrated investment attractiveness index of an H₂ refueling station at location i ;

X_{ik} – normalized positive factors (RES potential, transport accessibility, expected demand, proximity to infrastructure);

R_i – normalized risk factors (regulatory, security-related, social, logistical);

ω_k, r_j – weight coefficients that vary depending on the selected development scenario.

In a GIS environment, each factor is represented as a thematic layer, including:

- a green hydrogen production potential layer (based on renewable energy availability and grid access);
- a transport intensity layer (highways, logistics corridors, transport hubs);
- a demand layer (urbanization level, vehicle fleet size, industrial zones);
- an infrastructure readiness layer (existing fuel stations, industrial areas, substations);
- a risk layer (security constraints, social factors, regulatory uncertainties).

For each scenario (baseline, moderately optimistic, and accelerated), a distinct set of weighting coefficients is defined. In the baseline scenario, priority is given to risk minimization and the availability of existing infrastructure, whereas in the accelerated scenario greater importance is assigned to transport demand and renewable energy potential, even under elevated risk levels. This differentiation

results in varying spatial configurations of “priority zones” for investment.

The outcome of the GIS-based modeling is a series of scenario development maps displaying clusters with high suitability for H₂ refueling station deployment. Such maps can serve not only as illustrative material within a scientific publication but also as a practical tool for developing roadmaps for hydrogen infrastructure expansion at both national and regional levels.

The proposed approach enables a transition from a qualitative description of hydrogen mobility development scenarios to a quantitative assessment and spatial specification of decisions. By varying the set of factors and their weighting coefficients within the formula of the integrated index S_i , a direct linkage is established between strategic market development scenarios for hydrogen transport and specific spatial decisions regarding the placement of H₂ refueling stations. This makes it possible to adapt the model to different levels of risk, demand growth rates, and infrastructure availability, which is particularly important under conditions of high uncertainty.

To illustrate the differences between scenarios, Table 1 presents an example of key factors and their weighting coefficients used in calculating the integrated suitability index for H₂ refueling station deployment.

Table 1. Example of factors and weighting coefficients for different scenarios for the development of the H₂ filling station network

Group of Factors	Indicator	Baseline Scenario	Moderately Optimistic Scenario	Accelerated Scenario
Energy-related factors	RES potential (electrolysis capacity)	0.15	0.20	0.25
Transport-related factors	Traffic intensity and proximity to major highways	0.15	0.20	0.25
Market factors	Expected demand for H ₂ -powered transport	0.10	0.20	0.25
Infrastructure-related factors	Availability of existing fuel stations, industrial zones, and substation	0.25	0.15	0.10
Socio-institutional factors	Community support and regulatory readiness	0.20	0.15	0.10
Risk factors	Security, logistical, and financial risks*	- 0.15	- 0.10	- 0.05

* Risk factors are incorporated into the formula with a negative sign, thereby decreasing the value of the integrated suitability index S_i .

As shown in Table 1, the baseline scenario prioritizes risk minimization and the utilization of existing infrastructure, which corresponds to the logic of pilot implementation of H₂ refueling stations under conditions of limited demand. In the moderately optimistic scenario, the weights of the factors become more balanced, and the role of transport accessibility and market demand increases, reflecting the stage of managed network development. The accelerated scenario is characterized by the dominance of demand-related factors and renewable energy potential, while the influence of risks is significantly reduced, consistent with

large-scale investment logic and Ukraine’s integration into international hydrogen corridors.

Thus, varying the weighting coefficients within the GIS-based model enables the formation of different spatial configurations of the H₂ refueling station network while maintaining a unified methodological framework. This makes the proposed approach a universal tool for analyzing investment attractiveness, supporting strategic planning, and preparing roadmaps for hydrogen mobility development in Ukraine.

To further detail the proposed approach, the methodology was tested at the level of the city of Kyiv, which is considered a key node in the potential development of hydrogen mobility in Ukraine. Kyiv is characterized by high transport intensity, a significant concentration of consumers, developed engineering infrastructure, and strong logistical connections at both national and international levels, making it a priority area for investment in H₂ refueling infrastructure.

Within the study, five conditional candidate zones for H₂ refueling station placement were identified, representing different types of urban space: transport hubs, industrial areas, peripheral districts, and logistics concentration zones. Each of these zones was assessed using the developed multi-factor model.

Initial locations selected for evaluation (Kyiv):

- Ring Road (western section)
- Left-bank industrial and logistics hub (Darnytskyi district)
- Southern entrance to the city (Stolychne Highway area)
- Northern logistics hub (Obolon – Vyshhorod direction)
- Sviatoshyn industrial zone

The assessment was carried out under the moderately optimistic scenario using the integrated index formula:

$$S_i = 0,20P_i + 0,20T_i + 0,20D_i + 0,15I_i - 0,10R_i$$

Table 2. Results of the assessment of potential H₂ filling station locations in Kyiv

Location	RES Potential (P)	Traffic (T)	Demand (D)	Infrastructure (I)	Risk (R)	Integrated Index (S _i)
Ring Road (Western Section)	0.65	0.95	0.85	0.80	0.30	0.47
Stolychne Highway (Southern Entrance)	0.70	0.90	0.80	0.75	0.35	0.44
Darnytskyi Industrial Hub	0.60	0.85	0.75	0.70	0.40	0.40
Obolon Direction (Northern Logistics Corridor)	0.655	0.80	0.70	0.65	0.35	0.38
Sviatoshyn Industrial Zone	0.50	0.70	0.65	0.75	0.30	0.36

The obtained results indicate that the highest investment attractiveness is associated with locations situated along outer transport ring roads and major city entry corridors. The western section of the Ring Road demonstrates the maximum value of the integrated index (S_i=0.47), which can be explained by the combination of very high traffic intensity, access to engineering infrastructure, and the capacity to serve both urban and transit transport flows.

The southern entrance to Kyiv (Stolychne Highway) ranks second in priority and may be considered an optimal location for the first phase of investment. Industrial and logistics zones on the left bank of the city should be included in subsequent stages of network deployment, with a focus on freight and municipal transport applications.

Thus, the proposed methodology enables the transition from general hydrogen mobility development scenarios to specific investment decisions at the city level, ensuring a transparent and quantitatively substantiated logic for selecting locations for H₂ refueling stations.

Within the GIS environment, the results may be presented as a heat map or ranking layer, where zones with S_i>0.45 are classified as priority investment areas, zones within the range of 0.40–0.45 as medium-priority areas, and lower values as reserve territories for subsequent phases of network expansion.

For different scenarios (baseline, moderately optimistic, and accelerated), only the weighting coefficients of the

factors are modified in the GIS model, while the spatial layers remain unchanged. This enables comparative analysis of scenarios through the overlay of thematic maps and allows the identification of territories that remain consistently attractive for investment, as well as zones sensitive to changes in market or regulatory conditions.

Accordingly, the use of GIS provides a practical linkage between strategic hydrogen mobility development scenarios and specific spatial decisions, transforming the results of scientific analysis into a format suitable for investment planning and the development of hydrogen infrastructure roadmaps.

Taking into account the conducted scenario-based and GIS analysis, the development of H₂ refueling infrastructure should be considered not as the placement of isolated stations, but as the formation of an integrated network capable of ensuring continuity of hydrogen transport routes and enabling the scaling of the hydrogen mobility market.

The proposed approach envisages a hierarchical structure of the H₂ refueling station network comprising three functional levels. The core of the network consists of hub refueling stations located in major urban agglomerations and logistics centers (Kyiv and large regional capitals), which ensure baseline demand and form the initial market. The second level includes corridor-based stations positioned along main transport highways and international routes, providing network connectivity and enabling interregional

transport. The third level is formed by local or specialized stations oriented toward municipal, industrial, or commercial transport applications.

Within the baseline scenario, network development is limited to forming the core with the minimum required number of hub stations. The moderately optimistic scenario envisages the expansion of the core through corridor elements, thereby ensuring initial network connectivity at the national level. The accelerated scenario focuses on the full-scale establishment of a multi-level network with high territorial coverage and integration into European hydrogen transport corridors.

Thus, the GIS model and the multi-factor evaluation framework are applied not only for selecting individual

locations but also as a tool for planning the overall network configuration, determining deployment stages, and setting investment priorities. This makes it possible to move from isolated investment decisions to a strategic vision of hydrogen refueling infrastructure development in Ukraine.

Based on the scenario analysis and GIS modeling, the development of the hydrogen refueling station network should be considered as a hierarchical spatial-functional system formed in stages and ensuring the scalability of the hydrogen mobility market. Within this framework, the H₂ refueling network is structurally divided into three interrelated levels: core, corridors, and periphery (Fig. 2).

Schematic Representation of the Hierarchical Structure of the Hydrogen Refueling Network (Core–Corridors–Periphery)

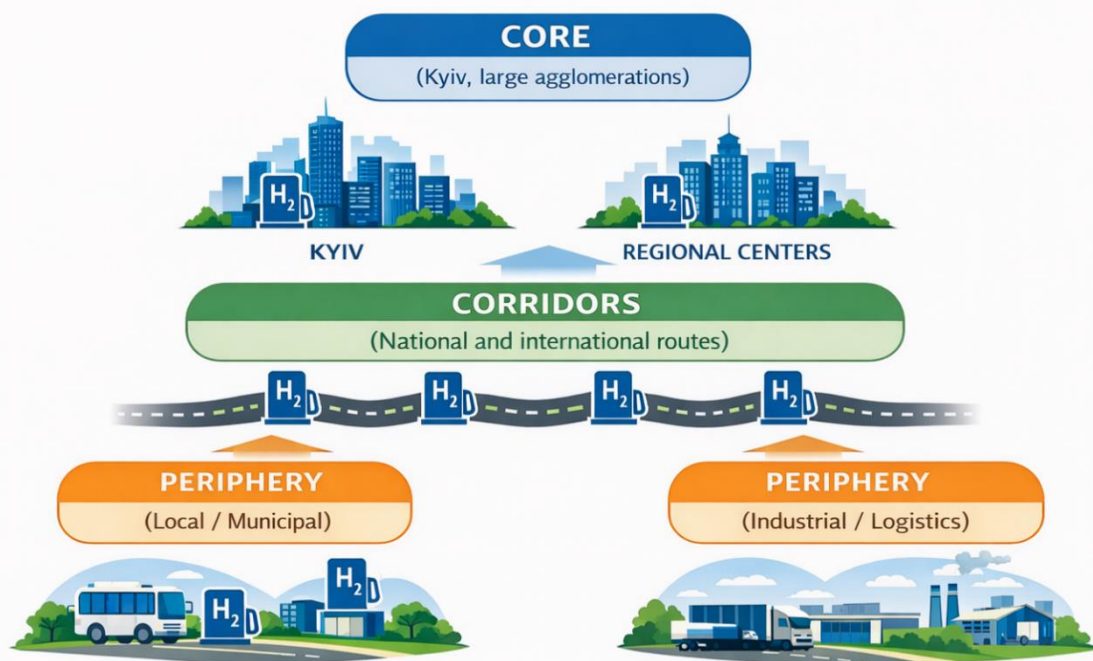


Fig. 2. Schematic representation of the hierarchical structure of H₂ gas stations

The core of the network is formed in large urban agglomerations and logistics hubs characterized by the highest concentration of transport demand, advanced engineering infrastructure, and institutional readiness. These hub refueling stations act as “anchors” of the network, ensuring baseline demand and creating the initial conditions for the commercial deployment of hydrogen-powered transport. In the Ukrainian context, the network core includes Kyiv and other major regional centers, where the integration of urban, municipal, and freight hydrogen transport is feasible.

The corridor level of the network encompasses refueling stations located along major national and international transport highways. Their primary function is to ensure spatial connectivity and enable interregional and transit transportation. Corridor stations connect the network cores, forming continuous hydrogen routes and playing a critical

role in the development of heavy-duty and intercity fuel cell transport.

The peripheral level consists of local or specialized H₂ refueling stations oriented toward specific demand segments, such as municipal transport, industrial clusters, ports, logistics hubs, or regions with emerging but not yet fully developed markets. Peripheral elements serve as an adaptive layer of the network, allowing gradual expansion of coverage without excessive initial investment.

This three-tier approach ensures flexible planning of the H₂ refueling network, where the GIS model is used to identify specific locations at each level, while scenario analysis determines the pace and sequence of deployment. In the baseline scenario, the network core is primarily established; in the moderately optimistic scenario, corridor

connectivity is added; and in the accelerated scenario, full-scale deployment of all three levels is envisaged.

Further detailing of the proposed approach is achieved by adapting the hierarchical H₂ refueling network scheme to

specific development scenarios. Figure 3 presents three alternative network configurations corresponding to the baseline, moderately optimistic, and accelerated scenarios, reflecting different levels of spatial coverage and functional maturity of the hydrogen infrastructure (Fig. 3).

Hierarchy of the Hydrogen Refueling Network Development Across Scenarios

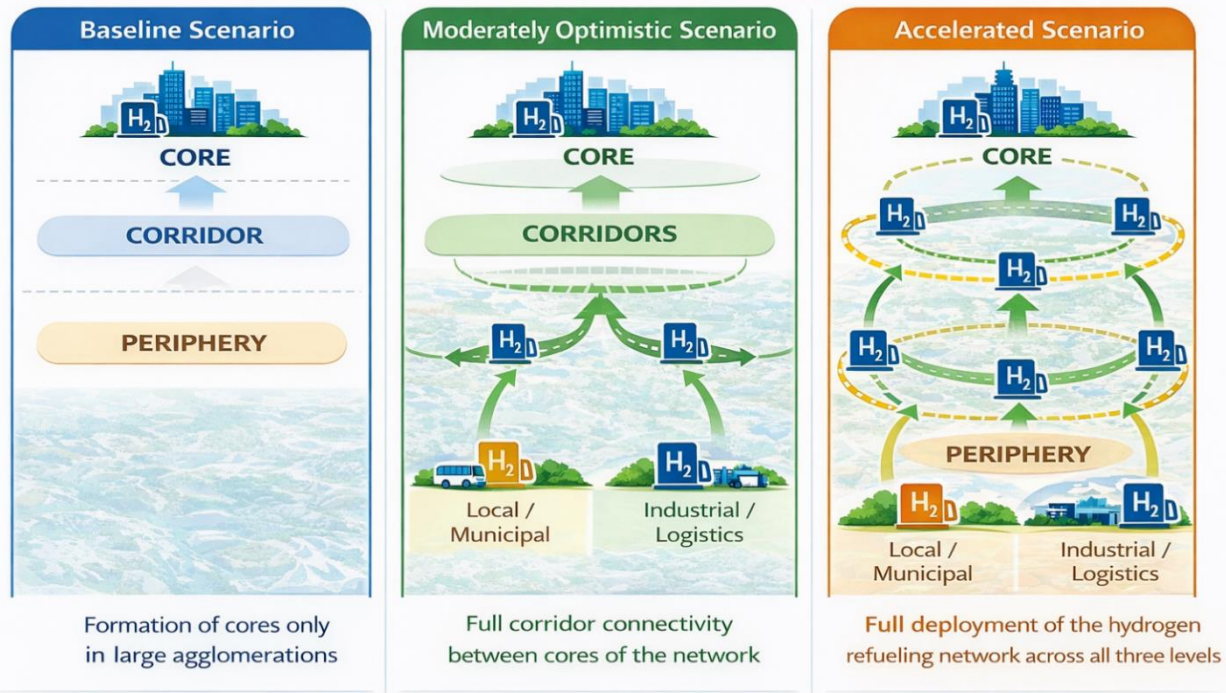


Fig. 3. Hierarchy of development of the H₂ gas station network according to different scenarios

In the baseline scenario, the network is formed primarily around hub elements — the core — located in the largest urban agglomerations and logistics centers. Such a configuration is oriented toward launching pilot projects, generating initial demand, and minimizing investment and regulatory risks. At this stage, spatial connectivity between individual network elements remains limited, while corridor and peripheral stations have a fragmented character.

The moderately optimistic scenario envisages a transition from point-based development to the formation of a connected network through the deployment of corridor elements along major transport routes. In this case, network cores are interconnected by hydrogen corridors, enabling intercity and interregional transportation and creating the preconditions for scaling the hydrogen transport market. Peripheral elements at this stage play a supportive role and are concentrated in areas with stable or forecasted demand.

In the accelerated scenario, a fully developed multi-level network is established, in which the core, corridors, and periphery function as an integrated system. Such a configuration ensures a high level of spatial coverage, route redundancy, and adaptability of the network to growing hydrogen transport demand. Peripheral refueling stations in this case become an important element of network

expansion, oriented toward specialized segments — municipal, industrial, or logistics transport.

Thus, the presented series of schemes clearly demonstrates the evolution of the H₂ refueling network from an initial nodal structure to an integrated spatial-functional system. This underscores that scenario analysis combined with GIS modeling makes it possible not only to justify the placement of individual refueling stations, but also to formulate a comprehensive vision for hydrogen infrastructure development, taking into account phased implementation, investment capacity, and strategic decarbonization objectives.

The formation of the H₂ refueling station network under different hydrogen mobility development scenarios is proposed to be based on a combination of scenario-based demand forecasting, multi-factor spatial assessment, and elements of an optimal infrastructure location problem. Potential H₂ refueling station locations are evaluated using the integrated suitability indicator.

$$S_{i,s} = \sum_k w_{k,s} X_{i,k} - \sum_j r_{j,s} R_{i,j},$$

where $X_{i,k}$ represent normalized positive factors (transport accessibility, effective availability of renewable energy sources for electrolysis, infrastructure readiness), $R_{i,j}$

denote risk factors, and the weighting coefficients $W_{k,s}$, $r_{j,s}$ depend on the selected development scenario. Network formation is carried out by selecting a set of locations $Y_{i,t} \in \{0,1\}$ that maximizes coverage of the projected demand and ensures corridor connectivity between hub elements of the network under budgetary, infrastructural, and spatial constraints.

Within the GIS environment, this is implemented as a combination of a demand coverage problem and a corridor planning task, resulting in a scenario-dependent network configuration of the “core – corridors – periphery” type, suitable for further visualization and application in investment and spatial planning of hydrogen infrastructure development in Ukraine.

The Ukrainian specificity of H₂ refueling network development is incorporated into the model through a system of risk coefficients reflecting infrastructural, regulatory, and security constraints, as well as the uneven development of energy and transport hubs. This enables the adaptation of scenario planning and GIS modeling to the ongoing transformation of Ukraine’s energy sector.

The proposed study aims to bridge the gap between general hydrogen energy development strategies and the practical tasks of spatial planning for hydrogen mobility infrastructure. Unlike most existing studies, where hydrogen refuelling stations are considered as isolated infrastructure objects, this article emphasizes the formation of an H₂ refueling network as an integrated spatial-functional system that develops in stages and depends on demand scenarios, investment capacity, and risk factors.

The scientific novelty of the study lies in combining scenario analysis of hydrogen mobility development with a GIS-oriented multi-factor model for refueling network planning adapted to Ukrainian conditions. A formalized mechanism is proposed for translating strategic scenarios into specific spatial decisions, simultaneously accounting for demand forecasts, transport connectivity, energy constraints, infrastructure readiness, and regional risk specifics. A distinctive feature of the approach is the application of a hierarchical “core–corridors–periphery” network structure as a fundamental planning principle, ensuring scalability and adaptability of the network over time.

Based on the conducted research, the following generalized conclusions can be formulated:

Conclusions

The proposed scenario- and GIS-oriented approach provides a scientifically grounded framework for the formation of an H₂ refueling station network in Ukraine and may serve as a methodological basis for strategic and investment planning of hydrogen mobility development.

1. It has been demonstrated that planning hydrogen refueling infrastructure at the level of an integrated network is methodologically more justified than point-based placement of isolated facilities, as it ensures

spatial connectivity, phased deployment, and infrastructure scalability.

2. The feasibility of applying a hierarchical “core–corridors–periphery” network structure as a fundamental principle of scenario-based planning for H₂ refueling station development in Ukraine has been substantiated.
3. A scenario-oriented mathematical model for planning the H₂ refueling station network has been developed and formalized. The model integrates demand forecasting, multi-factor suitability assessment, and spatial constraints related to coverage and transport connectivity, with the possibility of implementation within a GIS environment.
4. It has been shown that modification of model parameters and weighting coefficients enables the formation of different network configurations for baseline, moderately optimistic, and accelerated scenarios without altering the overall methodological framework.
5. Practical spatial solutions have been obtained using the case study of Kyiv and the Kyiv region, demonstrating the feasibility of transitioning from scenario-based vision to concrete recommendations regarding the placement of H₂ refueling network elements.
6. It has been proven that accounting for Ukrainian-specific risks — including infrastructural heterogeneity, power system constraints, logistical limitations, and regulatory factors — is a necessary condition for developing realistic scenarios of hydrogen refueling infrastructure expansion.

Future research perspectives include refinement of model parameters based on empirical GIS data, integration of economic indicators related to hydrogen production and logistics costs, and extension of the proposed approach to the interregional and cross-border levels in the context of European hydrogen corridors.

Figures 1–3 were developed by the authors using AI-assisted graphical tools based on the methodological and analytical framework proposed in this study.

REFERENCES

1. United Nations Economic Commission for Europe. Hydrogen Roadmap Draft Report for Ukraine. Draft report. Geneva: UNECE, 2021. Available online: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/Hydrogen%20Roadmap%20Draft%20Report_UKR%20March%202021.pdf
2. California Air Resources Board; California Energy Commission. Joint Agency Staff Report on Assembly Bill 126: 2024 Annual Assessment of the Hydrogen

-
- Refueling Network in California. Sacramento, CA: CARB & CEC, 2025. Available online: <https://ww2.arb.ca.gov/>
3. Sujan, V., Fan, J., Jatana, G., Sun, R. Nationally Scalable Hydrogen Fueling Infrastructure Deployment: A Megaregion Analysis and Optimization Approach. arXiv preprint, 2024. Available online: <https://arxiv.org/abs/2410.06033>
 4. Han, G., Pan, H., Liu, Y., Li, Q., Wang, P. A methodology for integrating hydrogen refuelling stations in multi-microgrids and coordination of distribution systems and transmission system operators. *Energy*, 2025, Vol. 322, Article 135634. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135634>
 5. Apostolou, D., Xydis, G. A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure: Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol. 113, Article 109292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109292>
 6. Kurtz, J. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and lessons learned. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. Available online: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1506613>
 7. Kluschke, P., Neumann, F. Interaction of a hydrogen refuelling station network for heavy-duty vehicles and the power system in Germany for 2050. arXiv preprint, 2019. Available online: <https://arxiv.org/abs/1908.10119>
 8. Myskiv, H., Ivanytskyi, R. Main trends in the development of hydrogen technologies in transport. *Economy and Society*, 2023, No. 55. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-2>
 9. Riepin, O. Aspects of the development of hydrogen energy in Ukraine by using energy from renewable sources. *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, 2023. Available online: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/417>
 10. Kudria, S. Stages of green hydrogen energy development in Ukraine. *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, 2022. Available online: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/325>
 11. Budko, I. Features of the implementation of a solar-hydrogen autonomous gas station for electric vehicles. *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, 2024, No. 2. Available online: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/467>
 12. Filina-Dawidowicz, L., Milek, D., Baziuk, D. The concept of an infrastructure location to supply buses with hydrogen: A case study of the West Pomeranian Voivodeship in Poland. *Energies*, 2025, Vol. 18, Article 3026. <https://doi.org/10.3390/en18123026>
 13. Kudria, S., Zurian, O., Zurian, O. Principles of forming an investment attractiveness layer in a GIS map of green hydrogen energy projects. *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, 2025, No. 3(82), pp. 145–154. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).145-154](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).145-154)
 14. Mkhitarian, N., Kudria, S., Zurian, O. Concept of creating an interactive map of investment attractiveness of green hydrogen in Ukraine. *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, 2025, No. 2(81), pp. 151–161. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).151-161](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).151-161)
 15. Governor's Office of Business and Economic Development (GO-Biz). Hydrogen Station Permitting Guidebook. Sacramento, CA, 2020. Available online: https://business.ca.gov/wp-content/uploads/2019/12/GO-Biz_Hydrogen-Station-Permitting-Guidebook_Sept-2020.pdf
-