

REZILIENȚA ENERGETICĂ ÎN TIMPUL CONFLICTELOR ARMATE: RECONSIDERAREA HIDROGENULUI PENTRU SECURITATEA ENERGETICĂ A UNIUNII EUROPENE

Drd. Marinela-Luminița Emanuela ZLATEA

Departamentul de Economie și Afaceri Internaționale,
Academia de Studii Economice din București

Prof. univ. dr. Alexandra-Lavinia HOROBET

Departamentul de Economie și Afaceri Internaționale,
Academia de Studii Economice din București

Drd. Eugen Constantin ROȘCA

Școala Doctorală, Facultatea de Științe Economice,
Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu
10.55535/GMR.2024.4.23

The Russian-Ukrainian war has raised concerns about the security of energy supply, prompting Europe to make changes in its energy mix. With the launch of REPowerEU, the EU aims to transition as quickly as possible from dependence on Russian fossil fuels to increased energy autonomy and clean energy production. Accelerating renewable hydrogen production by 2030 is part of this plan.

The present study uses clustering algorithms to assess the action capacity of the European Union countries regarding hydrogen perspective, by considering hydrogen production and infrastructure projects. The war has accelerated the transition to clean energy sources and energy independence, which is reflected in the reduction of CO₂ emissions and the increased interest of member state governments and private entities in issuing green bonds. Investments in green hydrogen can boost economic growth and resilience but require the creation of a functioning market and a flexible regulatory framework.

Keywords: energy security; hydrogen; war; renewable energy; European Union;

INTRODUCERE

Războiul ruso-ucrainean, început în februarie 2022, a afectat profund dinamica energiei globale, aducând în prim-plan asigurarea independenței energetice și accelerarea tranziției către sursele de energie regenerabilă. Ca răspuns la dezechilibrul din piața energetică, în mai 2022, Comisia Europeană a lansat *Planul REpowerEU*, inițiativă ce are drept scop eliminarea treptată a importurilor de energie din Rusia și intensificarea semnificativă a energiei verde (Comisia Europeană, 2022-a). Hidrogenul verde reprezintă o componentă importantă a REpowerEU, fiind estimate importuri și producție în total de aproximativ 20 milioane de tone până în 2030 (Comisia Europeană, 2022-b). Planul include, de asemenea, măsuri de sprijinire a dezvoltării infrastructurii și piețelor de hidrogen, pentru ca hidrogenul verde să poată fi produs, transportat și utilizat eficient în diferite sectoare. Astfel, încă de la elaborarea *Strategiei Europene pentru Hidrogen*, în 2020, se întrevădeau oportunități privind rolul acestuia în stocarea energiei regenerabile și în reducerea emisiilor de CO₂ în rândul anumitor sectoare, precum cel siderurgic, chimic și de transporturi (Comisia Europeană, 2020-a). Strategia are drept scop dezvoltarea unei economii europene a hidrogenului, prin crearea de noi oportunități economice și stimularea creșterii competitivității UE, cu focus pe cercetare și inovare, care sunt esențiale pentru atingerea acestor obiective.

Rezultat din procesul de electroliză a apei, hidrogenul verde a căpătat un interes semnificativ în ceea ce privește tranziția către un sistem energetic mai durabil, fiind considerat o soluție potențială de energie curată și datorită faptului că este produs folosind surse de energie regenerabilă, precum energia solară sau eoliană. Tot mai multe țări au început să promită neutralitatea climatică și să caute soluții de reducere a emisiilor de CO₂, astfel că investițiile pentru stimularea producției și utilizarea hidrogenului verde au început să crească substanțial în ultimii ani. Recent, la nivel de UE au fost alocate aproximativ 6,9 miliarde EUR (7,4 miliarde USD) pentru proiectele de producere a hidrogenului verde în cadrul inițiativei Proiecte Importante de Interes Comun European (IPCEI) (Hydrogen Insight, 2024-a). De asemenea, UE a aprobat un ajutor de stat în valoare de 998 de milioane EUR (aproximativ 1,1 miliarde USD) pentru producția de hidrogen din surse regenerabile în Olanda (Hydrogen Insight, 2024-b). Pentru a crea securitate investițională și oportunități de afaceri, atât pentru producția europeană, cât și pentru cea globală de hidrogen

din surse regenerabile, Comisia Europeană a lansat, în 2022, Banca Europeană de Hidrogen (EHB). Prima licitație la nivel european în cadrul EHB a acordat aproape 720 de milioane EUR pentru șapte proiecte de hidrogen regenerabil din Europa și se preconizează că vor produce aproximativ 1,58 milioane de tone de hidrogen regenerabil în următorii zece ani (Comisia Europeană, 2022-c).

Eforturile UE de a-și construi propria fortăreață energetică, menținând în același timp neutralitatea climatică, sunt numeroase, dar ce se întâmplă atunci când apar schimbări de natură geopolitică? Cum a schimbat războiul dintre Rusia și Ucraina dinamica energiei globale și discursul energiei regenerabile? În plus, cum poate UE, dat fiind contextul actual, să alinieze securitatea energetică la obiectivele climatice? Cercetarea noastră își propune să umple acest gol și să analizeze modul în care războiul Rusiei împotriva Ucrainei aduce în prim-plan importanța hidrogenului verde ca alternativă pentru obiectivele UE. Aruncăm o privire asupra pieței europene de hidrogen verde, de la lansarea *Strategiei Europene pentru Hidrogen* și până în prezent. Pe de o parte, luăm în considerare variabile de interes precum consumul și aprovizionarea cu hidrogen, proiectele de infrastructură și producție de hidrogen, pentru a identifica asemănările și deosebirile dintre țările membre ale Uniunii Europene din perspectiva dezvoltării economiei hidrogenului. Acestor variabile li se adaugă și altele, cum ar fi emisiunea de obligațiuni verzi de către corporații și guverne, ponderea energiei regenerabile în consumul final brut de energie și emisiile nete de gaze cu efect de seră, care arată progresul acestor țări în tranziția energetică. Astfel, în prima parte a lucrării, analizăm principalele rezultate obținute în literatura de specialitate privind cercetarea hidrogenului verde, pentru ca, în partea a doua, să descriem metodologia și rezultatele cercetării noastre. În încheiere, evidențiem cele mai importante idei și limitările din cadrul lucrării, la care adăugăm câteva potențiale teme de cercetare viitoare.

LITERATURA DE SPECIALITATE

Cea mai mare provocare în producerea de hidrogen curat o reprezintă sursa de energie utilizată. Cadrul dezirabil, care să îndeplinească atât obiectivele privind neutralitatea climatică, precum și asigurarea securității energetice este ca hidrogenul verde să fie produs folosind exclusiv surse regenerabile. Astfel, întregul proces nu necesită epuizarea resurselor naturale și nu implică emisii de CO₂. Mai mult decât atât, producerea de hidrogen verde poate crea un sistem energetic durabil, valorificând, astfel, sursele de energie regenerabilă și contribuind la reducerea dependenței de combustibilii fosili. Cu toate acestea, costul ridicat al tehnologiilor de energie regenerabilă și nevoia unei dezvoltări semnificative a infrastructurii de stocare și distribuție reprezintă o provocare.

Literatura de specialitate se concentrează asupra acestei problematice. Există numeroase cercetări care au încercat să clasifice hidrogenul în funcție de tipul de tehnologie utilizat în producția sa. Pilavachi et al. (2009) au analizat șapte procese comune de producere a hidrogenului, în funcție de diferite tipuri de cost și de emisiile de CO₂, respectiv: reformarea cu abur a gazului metan (SMR), oxidarea parțială a hidrocarburilor (POX), gazeificarea cărbunelui (CG), gazeificarea biomasei (BG), sistemul fotovoltaic-electroliză (PV-EL), sistemul eolian-electroliză (W-EL) și sistemul hidroenergetic-electroliză (H-EL). Rezultatele obținute de aceștia au demonstrat că, în majoritatea cazurilor, procesele care combină sursele regenerabile de energie cu electroliza au fost considerate a fi mai bune decât procesele convenționale, primul în clasamentul procesului de producție fiind sistemul hidroenergetic-electroliză, la polul opus fiind cel de gazeificare a cărbunelui (Ib., p. 9). În *Strategia UE pentru Hidrogen*, acesta este clasificat în funcție de tehnologia și sursa de energie utilizate în: hidrogenul bazat pe energie electrică, hidrogenul din surse regenerabile, hidrogenul curat, hidrogenul pe bază de combustibili fosili, hidrogenul bazat pe combustibili fosili cu captare de carbon, hidrogenul cu emisii scăzute de CO₂ și combustibilii sintetici hidrogenați. Comunicarea Comisiei consemna, la acel moment, că „nici hidrogenul din surse regenerabile, nici hidrogenul cu emisii scăzute de carbon, în special hidrogenul pe bază de combustibili fosili cu captură de carbon, nu sunt competitive, din punctul de vedere al costurilor, cu hidrogenul pe bază de combustibili fosili”. (Comisia Europeană, 2020-b, p. 5).

Pentru o mai elocventă clasificare a tipului de hidrogen, Agenția Internațională pentru Energii Regenerabile (IRENA) a propus o nomenclatură a codurilor de culoare pentru fiecare tip, în funcție de sursa de energie utilizată: gri (produs din combustibili fosili, mai exact reformarea cu abur a metanului/SMR sau gazeificarea cărbunelui), albastru (hidrogen gri, dar cu tehnologii de captare a carbonului/CCS), turquoise (combină utilizarea gazului natural ca materie primă, fără producerea de CO₂; astfel, prin procesul de piroliză, carbonul din metan devine carbon negru solid) și verde (electroliza apei alimentate de electricitatea provenită din surse de energie regenerabilă) (IRENA, 2020, p. 9).

Au existat, de asemenea, studii de specialitate care au realizat comparații tehnice și economice între tehnologiile de producere a hidrogenului, precum și pentru înțelegerea fezabilității acestora. Astfel, au fost adăugate alte culori, precum: aqua, maro sau negru, alb, galben, roz sau violet și roșu (Ji, Wang, 2021; Ajanovic et al., 2022; Arcos, Santos, 2023; Dash et al., 2023). Ji și Wang (2021) au demonstrat că, pe termen scurt, SMR rămâne tehnologia dominantă datorită maturității sale, iar CG poate fi mai aplicabil în unele regiuni datorită distribuției locale a resurselor.

Însă, pentru a schimba acest statu quo, una dintre variante este de a combina tehnologia de captare a carbonului pentru a controla emisiile de CO₂, ceea ce este mai puțin fezabil, având în vedere rezervele limitate de combustibili fosili.

Cea de-a doua variantă o reprezintă tranziția treptată la producția de hidrogen verde, metodele de electroliză și cele termochimice demonstrând un potențial considerabil de dezvoltare din punct de vedere economic și ecologic (Ji, Wang, p. 18). Arcos și Santos (2023) au arătat că hidrogenul verde rămâne cel mai scump dintre toate celelalte tipuri, urmat de hidrogenul violet sau roz (obținut cu ajutorul energiei nucleare), iar hidrogenul de tipaqua [provenit din extragerea din nisipurile petroliere (bitum natural) și zăcămintele petroliere convenționale]] este cel mai ieftin, însă trebuie subliniat faptul că acest tip de hidrogen se află încă într-un stadiu incipient, nefiind testat în mod adecvat. Fiecare metodă de producere a hidrogenului are diferiți factori, care trebuie să fie subliniați. Compoziția mixului de energie, de exemplu, determină cantitatea de emisii de CO₂ generate. Prin urmare, deși tehnologiile cu emisii semnificative de GES dețin în prezent cele mai înalte niveluri de maturitate și costuri mai mici, este important ca acestea să fie abandonate treptat, iar metodele de producție cu emisii scăzute de carbon trebuie să continue să evolueze și să se îmbunătățească pentru a obține costuri scăzute și fără GES (Arcos, Santos, p. 15).

În contextul războiului împotriva Ucrainei, cercetătorii în domeniul energiei s-au concentrat pe aspecte care țin de: infrastructura de transport, lanțul de aprovizionare și cooperarea cu diferite țări în vederea asigurării unor parteneriate de hidrogen.

Infrastructura de transport este o componentă critică pentru dezvoltarea economiei hidrogenului. Deși ar putea fi privită ca un obiectiv care se întinde pe un orizont de termen lung, în realitate, s-a încercat găsirea unor soluții pe termen scurt. O alternativă intens cercetată de specialiști o reprezintă folosirea infrastructurii actuale de gaz și amestecarea hidrogenului în rețeaua de gaze naturale. Vadaszi et al. (2023) au constatat că hidrogenul poate fi amestecat direct în rețeaua de distribuție, transportat prin sistemul de gaze naturale și stocat în depozitele subterane de gaze, însă trebuie să se țină cont că metoda de implementare este diferită de la țară la țară, în funcție de infrastructura existentă, cadrul legal disponibil și condițiile geologice specifice. Studiul lor propune ca strategie interconectarea sectoarelor de gaz cu cele de electricitate și creșterea producției de biogaz. Astfel, dacă există un surplus în sistemul electric ca urmare a generării intensive de energie regenerabilă, atunci hidrogenul poate fi produs cu excesul de energie și transportat prin infrastructura existentă. Concluziile evidențiază că înlocuirea

gazului natural cu hidrogen 100% rămâne doar la nivel teoretic momentan, fiind necesară o infrastructură și o tehnologie specială (Vadaszi et al., p. 3). Studiul lui bin Jumah (2024) a arătat că este esențial să se îmbunătățească densitatea energetică a hidrogenului pentru a face posibile transportul și stocarea acestuia, însă este nevoie de infrastructură specializată, care necesită costuri suplimentare pentru procese precum comprimarea, lichefierea sau utilizarea purtătorilor chimici (binJumah, p. 18). S-a pus problema inclusiv a producerii hidrogenului în parcurile eco-industriale (EIP), ceea ce ar presupune crearea unui cluster de activități industriale și comerciale cu scopul de a minimiza deșeurile și a optimiza utilizarea resurselor. Parcurile eco-industriale pot oferi infrastructura necesară pentru producerea și distribuția hidrogenului și reduc costurile de producție, transport și distribuție, creând, astfel, economii de scară (Reda et al., 2024, p. 15).

Dar, stocarea hidrogenului nu este determinată numai de instrumentele de depozitare sau infrastructura de transport, ci și de evoluția cererii și a ofertei, precum și de interacțiunea cu alte sectoare. În acest context, Münster et al. (2024) au arătat că scăderea cererii de gaze naturale a dus la creșterea cererii pe termen scurt de hidrogen. Pe termen lung, disponibilitatea hidrogenului verde și albastru crește cererea de importuri de hidrogen, ceea ce poate avea impact asupra infrastructurilor necesare. Conform studiului lor, disponibilitatea limitată sau prețul ridicat al gazelor naturale, însoțite de o cerere de hidrogen ridicată, pot spori producția de hidrogen verde. De asemenea, creșterea prețurilor gazelor naturale afectează costul hidrogenului albastru, în timp ce creșterea prețurilor la electricitate afectează costul hidrogenului verde, existând, astfel, variațiuni de cost ca urmare a prețurilor uniforme ale gazelor naturale față de prețurile de electricitate (Münster et al., p. 22). Erdoğan și Güler (2023) au proiectat lanțul de aprovizionare cu hidrogen pentru vehiculele electrice cu celule de combustibil pe bază de hidrogen (HFCEV) în Turcia, pe o perioadă de 25 de ani (2026-2050). Cererea scăzută și costul de capital ridicat duc la creșterea costului unitar al hidrogenului până în 2031, dar vor atinge valorile cele mai scăzute până în 2050, ca o consecință a maturizării lanțului de aprovizionare. Studiul lor consideră cea mai bună strategie producția mixtă, bazată, pe de o parte, pe SMR (orientat pe costuri) și, pe de altă parte, pe electroliză (orientată pe zero emisii de CO₂) (Erdoğan și Güler, p. 13).

Potențialul hidrogenului verde se bazează și pe așezarea geografică și resurse naturale abundente. În acest sens, în august 2020, Germania și Ucraina au lansat un parteneriat energetic care include dezvoltarea unei economii bazate pe hidrogen. Ucraina dispune de resurse vaste de energie regenerabilă, care pot contribui la producția de hidrogen „verde”, precum și de un sistem de transport al gazelor util pentru distribuția hidrogenului. Pentru aceasta, este nevoie de accelerarea

dezvoltării cadrului de reglementare în Ucraina și armonizarea acestuia cu Germania, luând în considerare normele și obligațiile deja existente ale Ucrainei în domeniu (Hritsyshyna, Hutarevych, 2021, p. 21). Cadrul de reglementare rămâne o provocare și pentru parteneriatul UE-Maroc în ceea ce privește producția de hidrogen, dar aceasta nu constituie o barieră majoră precum pregătirea pieței, lipsa apei și disputele teritoriale din Maroc.

Luăm, așadar, în considerare analiza surselor de energie regenerabile din UE care pot contribui la producția de hidrogen verde, ținând cont de infrastructura potențială de transport, precum și de potențialul cererii și ofertei de hidrogen curat.

METODOLOGIE

Pornind de la rezultatele obținute în literatura de specialitate, ne propunem să analizăm potențialul hidrogenului în UE-27 în ceea ce privește tranziția către energia verde, dat fiind actualul conflict armat din Ucraina. Variabilele incluse sunt descrise în *tabelul 1*.

Tabelul 1: Descrierea variabilelor (concepția autorilor)

Acronim	Variabilă	Perioadă	Unitate de măsură	Sursă
GRB	Emisiunea de obligațiuni verzi de către corporații și guverne	2022	% din total	Eurostat
REN	Ponderele energiei regenerabile în consumul final brut de energie	media 2019-2022	%	Eurostat
GES	Emisiile nete de gaze cu efect de seră	media 2019-2022	tone per capita	Eurostat
H2IP	Proiecte de infrastructură pentru hidrogen	NA	nr. proiecte	European Hydrogen Observatory
H2PP	Proiecte de producție a hidrogenului	NA	nr. proiecte	European Hydrogen Observatory
H2TC	Hidrogen – Consum total	medie 2019-2024	mii tone echivalent petrol	S&P Energy Portal
H2TS	Hidrogen – Aprovizionare totală	medie 2019-2024	mii tone echivalent petrol	S&P Energy Portal

Cercetarea a utilizat metode de grupare (clusterizare) pentru a examina similitudinile și diferențele dintre țările membre ale UE în ceea ce privește dezvoltarea hidrogenului. Au fost utilizate trei metodologii principale de clusterizare: *clusterizarea ierarhică* (cunoscută și sub denumirea de *clusterizare în arbore*), *clusterizarea k-means* și *clusterizarea bidirecțională*. Aceste metodologii au fost selectate pentru capacitatea lor de a discerne modele și de a încadra țările în grupuri în funcție de diverse caracteristici asociate cu dezvoltarea hidrogenului. Nivelul de progres al țărilor în producerea și utilizarea hidrogenului a fost surprins prin 4 variabile:

- (1) Proiecte de infrastructură pentru hidrogen – H2IP;
- (2) Proiecte de producție a hidrogenului (H2PP);
- (3) Hidrogen – Consum total, medie 2019-2024 (mii tone echivalent petrol) – H2TC;
- (4) Hidrogen – Ofertă totală, medie 2019-2024 (mii tone echivalent petrol) – H2TS. Acestor variabile le-au fost adăugate 3 variabile suplimentare, care descriu emisiile nete de gaze cu efect de seră ale țărilor membre ale UE, ca medie pentru perioada 2019-2022 (în tone pe cap de locuitor) – GES, precum și progresul țărilor în tranziția verde: REN – Cota de energie regenerabilă în consumul final brut de energie, medie 2019-2022 (%), și GBR – Emiterea de obligațiuni verzi de către corporații și guverne, 2022 (% din total). Datele au fost colectate pentru toate cele 27 de țări membre ale UE, între 2019 și 2024, în funcție de disponibilitate, din următoarele surse: Eurostat, European Hydrogen Observatory și S&P Energy Portal.

Clusterizarea ierarhică, utilizând metoda de amalgamare Ward și distanțele euclidiene, a generat o dendrogramă care ilustrează vizual legăturile dintre țări (Murtagh, Legendre, 2014). Această metodă a facilitat recunoașterea clusterelor existente fără a le predefini numărul. Tehnica de clusterizare *K-means*, o metodă de partiționare iterativă, a fost ulterior utilizată pentru a forma grupuri distincte de țări care prezintă traiectorii similare în dezvoltarea hidrogenului, fără suprapuneri (Jain, 2010). Numărul de clustere a fost stabilit prin metoda cotului (elbow method) și analiza siluetei, pentru a spori similaritatea intra-cluster și diferențele inter-cluster. O tehnică de clusterizare cunoscută sub numele de *îmbinare bidimensională* (two-way joining) a fost utilizată pentru a grupa simultan țările și variabilele, astfel identificând corelații între subseturi distincte de țări și dimensiuni specifice ale dezvoltării hidrogenului, de asemenea în raport cu progresul țărilor în tranziția energetică (Madeira, Oliveira, 2004). Aplicarea distanțelor euclidiene în toate cele trei metode garantează uniformitatea în evaluarea similarității între date.

Abordarea lui Ward, utilizată în *clusteringul ierarhic*, minimizează varianta în cadrul clusterelor, generând clustere compacte și distinct diferențiate (Murtagh, Legendre, ib.). Integrarea diferitelor metodologii de clusterizare este, în opinia noastră, un cadru cuprinzător pentru a distinge liderii, urmăritorii și perspectivele de parteneriat în sectorul european al hidrogenului.

REZULTATELE CERCETĂRII

Pentru a distribui țările analizate în grupuri cât mai omogene, dar diferențiate de la un cluster la altul, au fost aplicați doi algoritmi de clusterizare: *algoritmul iterativ* (a se vedea figura 1) și *clusterizarea k-means* (a se vedea figura 2). Toate variabilele au fost standardizate pentru a elimina impactul unităților de măsură diferite și au fost introduse în algoritm folosind Tibco Statistica.

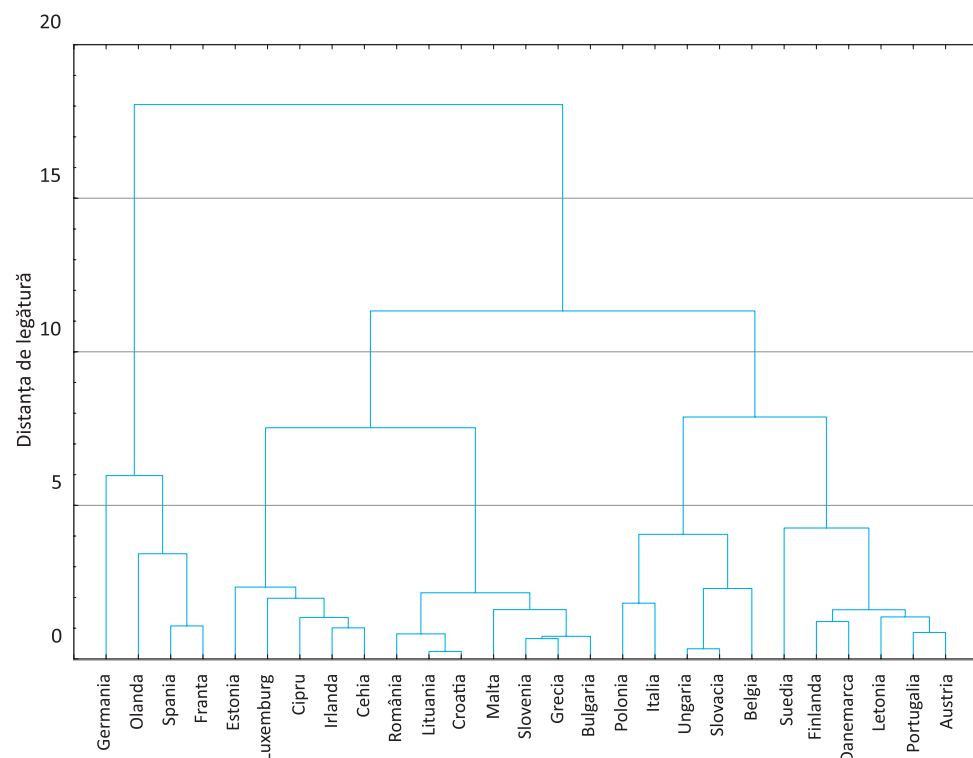


Figura 1: Dendrograma – clusterizarea ierarhică
(calculul autorilor și reprezentarea în Tibco Statistica)

Reziliența energetică în timpul conflictelor armate: reconsiderarea hidrogenului pentru securitatea energetică a Uniunii Europene

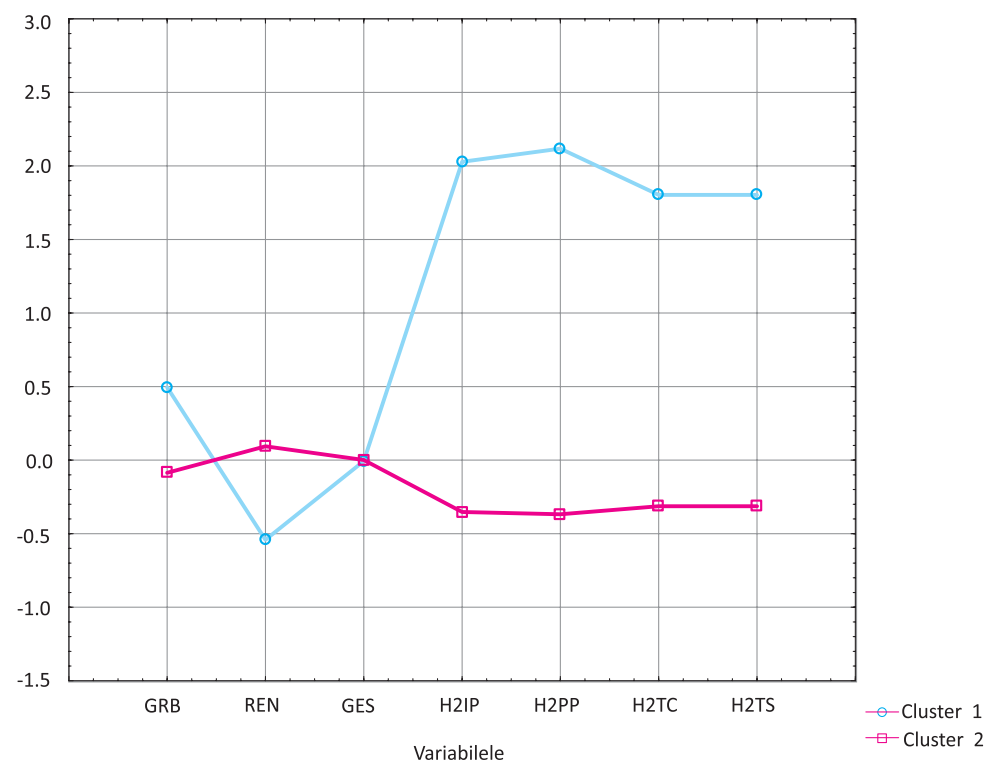


Figura 2: Clusterizarea k-means (lb.)

Figura 1 prezintă rezultatele obținute ca urmare a aplicării *algoritmului iterativ*. Axa orizontală conține numărul de clusteruri identificate și țările care fac parte din aceste clusteruri, iar distanța dintre centrele clusterurilor este prezentată pe axa verticală. Astfel, au fost obținute 2 clusteruri de țări: Germania, Olanda, Spania și Franța (Cluster 1) și restul țărilor din UE-27 (Cluster 2). Clusterul 1 conține țări cu particularități specifice în ceea ce privește energia regenerabilă și, în special, producerea și utilizarea hidrogenului, comparativ cu țările din clusterul 2. Germania, Olanda, Spania și Franța sunt prezente în topul celor mai mari țări atât în ceea ce privește resursele de energie regenerabilă, cât și investițiile semnificative și capacitatea de producție de hidrogen. Împreună cu Polonia, Italia, Marea Britanie și Belgia, acestea reprezintă împreună 74% din capacitatea totală de producție a hidrogenului din Europa (European Hydrogen Observatory, 2023, p. 12). În analiza noastră, Polonia și Italia prezintă caracteristici similare și fac parte din clusterul 2.

Figura 2 arată mediile normalizate pentru cele două clusteruri. Clusterul 1 este superior clusterului 2 la nivelul tuturor variabilelor, mai puțin pentru REN, și egal

în ceea ce privește GES, dar, pentru toate variabilele de hidrogen, clusterul 1 este în mod evident la un nivel mult mai ridicat decât clusterul 2. Este surprinzător rezultatul în ceea ce privește ponderea energiei regenerabile în consumul final brut de energie pentru țările din clusterul 1, însă, atunci când luăm în considerare variabilele de hidrogen, asociem ponderea resurselor de energie regenerabile în producerea de hidrogen. 91% din capacitatea totală de producție a hidrogenului provine din metoda de reformare a gazelor naturale sau gazeificarea cărbunelui. În schimb, metodele curate precum reformarea cu captarea simultană a carbonului și producția prin electroliza apei au un aport minor – mai puțin de 1% din capacitatea totală de producție a hidrogenului (Ib., p. 15). Variabila GES este similară pentru ambele clustere, ceea ce sugerează că țările membre ale UE s-au aliniat cu directivele privind neutralitatea climatică și au făcut progrese semnificative în ceea ce privește reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră. Această variabilă nu este, astfel, semnificativă din perspectiva grupării țărilor membre ale UE în cele două clustere.

Atunci când ne uităm la emisiunea de obligațiuni verzi de către corporații și guverne, observăm că nu există o diferență semnificativă între cele două clustere. În plus, nivelul este ușor apropiat și de variabila GES pentru ambele clustere, ceea ce ar putea însemna că, odată cu obiectivele UE referitoare la neutralitatea climatică, a crescut și interesul guvernelor statelor membre și entităților private pentru emisiunea de obligațiuni verzi. Obligațiunile verzi contribuie la finanțarea activelor necesare pentru tranziția către o economie cu emisii reduse de carbon. Astfel, în 2023 a intrat în vigoare Standardul European pentru Obligațiuni Verzi (EUGBS), cu scopul de a stabili un cadru clar și transparent, precum și de a îmbunătăți impactul obligațiunilor verzi la nivel de UE (Comisia Europeană, 2023).

În ceea ce privește proiectele de producție și infrastructură de hidrogen, rezultatele clusterizării k-means arată că statele din clusterul 1 sunt net superioare statelor din clusterul 2 (figura 2). Aceasta se poate observa prin prisma investițiilor masive pe care acestea le fac în proiectele de hidrogen. După aprobarea Comisiei Europene din februarie 2024, guvernul german a acordat 4,6 miliarde EUR pentru 23 de proiecte de hidrogen verde din cadrul Hy2Infra. Prin acestea, Germania asigură o capacitate de producție de hidrogen de până la 1,4 GW, alimentată de energie regenerabilă, soluții de stocare de până la 370 GWh și 2.000 km de infrastructură pentru hidrogen (Hydrogen Insight, 2024-c). Olanda face, de asemenea, mari progrese în ceea ce privește producția de hidrogen verde. Noul proiect al Groenvermogen NL, *HyPRO*, este cel mai mare proiect de cercetare și dezvoltare în domeniul hidrogenului verde din Olanda de până acum și se concentrează

pe îmbunătățirea tehnologiei de electroliză în vederea reducerii costului și a creșterii producției de hidrogen verde (Hydrogen Central, 2024). Încă din 2020, când a fost publicată *Strategia Națională pentru Hidrogen*, Franța își propunea să devină lider în domeniul hidrogenului verde, având drept obiectiv ambițios crearea unei capacități de electrolizor instalată de 6,5 GW până în 2030, capabilă să producă 680.000 de tone de hidrogen regenerabil în fiecare an (France Hydrogène, 2023). În anul 2022, în cadrul *Proiectului Important de Interes Comun European*, Comisia Europeană a selectat 15 inițiative franceze, printre care: fabrica de electrolizoare din Belfort (cu McPhy), uzina de producție de hidrogen din Dunkirk (cu Air Liquide) și proiectul de cercetare și dezvoltare privind mobilitatea H2 în Flins-sur-Seine (Hyvia – Grupul Renault și Plug Power) (H2 Energy News, 2022). Tot din cadrul Proiectelor de Interes Comun ale Comisiei Europene face parte și compania spaniolă de energie Enagás, care estimează o producție de hidrogen regenerabil de aproximativ 2,5 milioane de tone pe an în 2030. Proiectele de infrastructură spaniole vor fi conectate la viitorul coridor H2Med, prin care Enagás aspiră să transforme Peninsula Iberică în principalul hub de hidrogen al Europei. Acest coridor include, de asemenea, secțiunea dintre Celorico da Beira din Portugalia și Zamora (CelZa) și conexiunea maritimă dintre Barcelona și Marsilia (BarMar). Această conductă va fi esențială pentru ca Spania să își poată exporta surplusurile de energie, contribuind, astfel, la atingerea obiectivului Europei de a produce aproximativ 10 milioane de tone pe an din cele 20 de milioane de tone care se așteaptă să fie consumate până în 2030 (Invest in Spain, 2024).

Variabilele de consum și aprovizionare de hidrogen sunt, de asemenea, la un nivel ridicat pentru clusterul 1 față de clusterul 2. Nivelul de consum al țărilor din clusterul 1 este ridicat, precum și nivelul de producție. Germania (21%), Olanda (12%), și Spania (7%) reprezintă aproape 50% din cererea combinată de hidrogen din Europa (4,12 Mt/an). În contrast, majoritatea țărilor europene prezintă un consum relativ modest de hidrogen – mai puțin de 10% din cererea totală de hidrogen a fiecărei țări (European Hydrogen Observatory, 2023, p. 44). Nivelul similar al celor două variabile indică faptul că, pentru fiecare țară, indiferent de cluster, producția internă curentă acoperă în totalitate cererea/consumul intern.

Metoda algoritmului de clustering k-means indică numărul optim de clustere pe baza testării ANOVA. *Tabelul 2* prezintă distanțele dintre clustere și demonstrează că variabilele care se referă la hidrogen sunt cele care departajează cele două grupuri de țări. Astfel, cu cât distanța este mai mare, cu atât clusterele sunt mai diferite.

Tabelul 2: Testarea ANOVA
(calculul autorilor și reprezentarea în Tibco Statistica)

	Între	df	În interior	df	F	p value
GRB	2.016	1	23.984	25	2.101	0.160
REN	1.056	1	24.944	25	1.059	0.313
GES	0.865	1	25.135	25	0.861	0.362
H2IP	18.768	1	7.232	25	64.872	0.000
H2PP	10.625	1	15.375	25	17.277	0.000
H2TC	17.122	1	8.878	25	48.216	0.000
H2TS	17.122	1	8.878	25	48.216	0.000

Variabila referitoare la proiectele de infrastructură de hidrogen (H2IP) arată o eterogenitate mai mare între clustere comparativ cu variabila proiectelor de producție de hidrogen (H2PP). Putem asocia aceste rezultate cu proiectele de consorțiu și inițiativele care se concentrează pe crearea de coridoare de aprovizionare cu hidrogen, ceea ce mărește importanța lor la nivel de consorțiu și mai puțin pentru fiecare țară la nivel individual. De asemenea, atunci când ne referim la infrastructura de hidrogen, luăm în considerare infrastructura de distribuție și stocare. Germania, de exemplu, dispune deja de o rețea de peste 1.800 de kilometri de conducte de hidrogen convertite și nou construite și lucrează la dezvoltarea unei rețele centrale de hidrogen până în 2028 (The Federal Government, 2024). Astfel, rezultatele coincid cu concluziile studiului Vadaszi et al. (2023), care constatau că hidrogenul poate fi transportat prin sistemul de gaze naturale și stocat în depozitele subterane, însă trebuie să se țină cont că metoda de implementare este, așa cum menționăm, diferită de la țară la țară, în funcție de infrastructura existentă, cadrul legal disponibil și condițiile geologice specifice. La polul opus, în interiorul clusterului, variabila proiectelor de producție are o relevanță mult mai mare, ceea ce poate sugera că numeroase țări au început să fie din ce în ce mai interesate de demararea de proiecte pentru producția hidrogenului verde. Acest lucru este susținut și de rezultatele ANOVA în ceea ce privește GRB, REN și GES la nivel intra-cluster. În plus, unele țări precum Spania beneficiază de condiții climatice propice pentru generarea de energie regenerabilă (solară, eoliană etc.) care să susțină producerea de hidrogen verde.

Figura 3 arată rezultatul clusterizării two-way joining, sub forma unei hărți termice (heat map) a țărilor în funcție de variabilele selectate. Marcajele cu galben, portocaliu și roșu arată o poziționare mai bună a țărilor pe respectivele variabile, cu excepția GES, unde poziționarea mai bună este dată de culorile din spectrul verde.

În ceea ce privește variabila GRB, în 2022 Suedia, Slovacia și Ungaria ocupau topul clasamentului în ceea ce privește piața obligațiunilor verzi, sprijinind proiectele de protecție a mediului. Rezultatele noastre sunt confirmate, de asemenea, de analiza European Environment Agency (2023). Unele țări, precum Suedia, sunt active pe piața obligațiunilor verzi de mai mulți ani. În 2013, orașul Göteborg din Suedia a devenit primul oraș din lume care a emis obligațiuni verzi (500 de milioane SEK). Veniturile obținute din obligațiunile verzi emise sunt folosite pentru a finanța proiecte de schimbare climatică ce promovează tranziția către energia verde (United Nations, 2023).

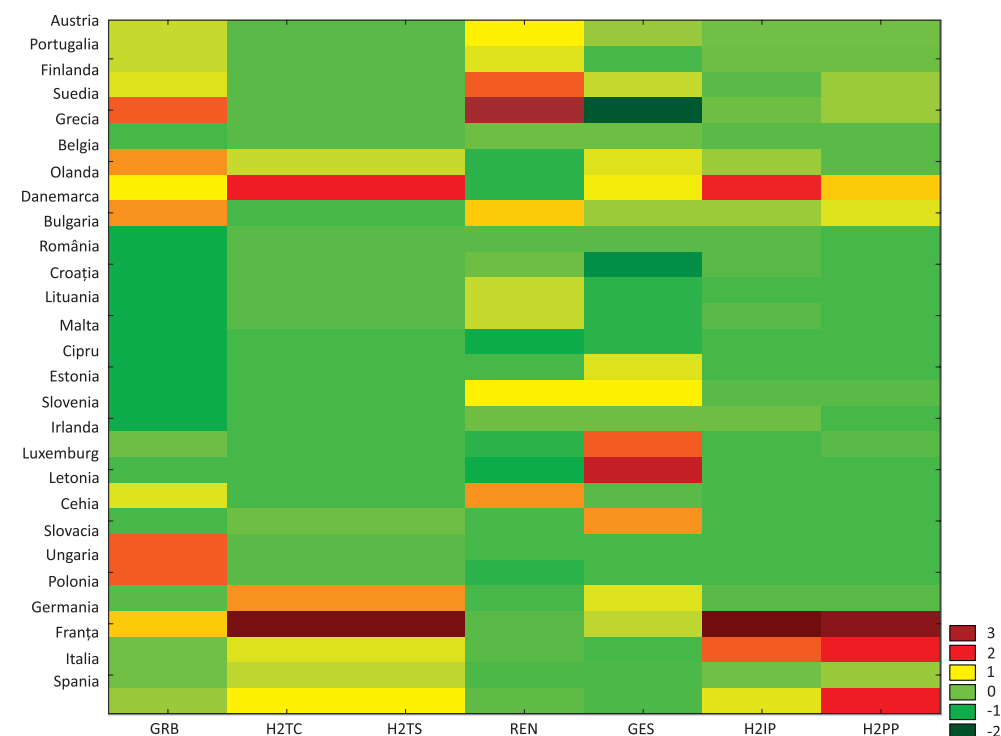


Figura 3: Clusterizarea two-way joining – harta grupării
(calculul autorilor și reprezentarea în Tibco Statistica)

Creșterea interesului privind instrumentele financiare concepute pentru a finanța proiectele de schimbare climatică a fost, de asemenea, amplificată și de războiul din Ucraina. Deși, pe termen scurt, războiul a creat dezechilibre pe piețele financiare, pe termen lung, a accelerat tranziția către surse de energie curată și independența energetică, determinând guvernele și corporațiile să investească mai mult în energia regenerabilă. În ceea ce privește consumul și aprovizionarea

cu hidrogen, Germania, Olanda și Polonia rămân principalii actori de pe piață, rezultate confirmate și de raportul European Hydrogen Observatory (2023). Germania, Franța și Olanda ocupă locurile principale la capitolul proiecte de infrastructură de hidrogen, iar pentru proiectele de producție se remarcă Germania, Franța și Spania.

CONCLUZII

Studiul nostru a aplicat metode de grupare (clusterizare) pentru a examina similitudinile și diferențele dintre țările UE-27 în ceea ce privește dezvoltarea hidrogenului, luând în considerare conflictul armat din Ucraina.

Germania, Olanda, Spania și Franța rămân țările cu cea mai mare dezvoltare atât în ceea ce privește resursele de energie regenerabilă, cât și investițiile semnificative și capacitatea de producție de hidrogen. Atunci când luăm în calcul ponderea resurselor de energie regenerabile și raportăm la producția de hidrogen, observăm că, în aceste țări, reformarea gazelor naturale sau gazeificarea cărbunului rămâne metoda cea mai utilizată față de energia provenită din surse regenerabile. Aceasta se poate datora și distribuției locale a resurselor, întocmai cum au demonstrat și Ji și Wang (2021). De asemenea, este lesne de înțeles că metoda de electroliză este cea mai scumpă dintre toate celelalte metode prin consumul mare de energie regenerabilă utilizată, însă aceasta trebuie să continue să evolueze și să se îmbunătățească pentru a obține costuri scăzute și fără GES (Arcos, Santos, 2023).

În ceea ce privește reducerea emisiilor de dioxid de carbon, rezultatele noastre arată că țările UE-27 s-au aliniat cu obiectivele privind neutralitatea climatică și au făcut progrese semnificative în direcția aceasta, ceea ce se reflectă și în creșterea interesului guvernelor statelor membre și al entităților private pentru emisiunea de obligațiuni verzi.

Proiectele de infrastructură de hidrogen au o contribuție mai mare la nivel de grupuri de țări, ceea ce poate fi asociat cu proiectele de consorțiu și inițiativele care se concentrează pe crearea de coridoare de aprovizionare cu hidrogen, mărin, astfel, importanța lor la nivel de consorțiu și mai puțin pentru fiecare țară la nivel individual. De asemenea, unele țări precum Germania, dispun deja de infrastructură de distribuție și stocare, inclusiv de rețele construite din conducte de gaze convertite. Ceea ce vine în completarea rezultatelor studiului Vadaszi et al. (2023), care demonstrează că hidrogenul poate fi transportat prin sistemul de gaze naturale și stocat în depozitele subterane, însă trebuie să se țină cont că metoda de implementare este diferită de la țară la țară. La polul opus, proiectele de producție de hidrogen prezintă un interes mult mai mare pentru fiecare țară la nivel

individual, ceea ce se reflectă și în reducerea emisiilor de dioxid de carbon, precum și în creșterea interesului guvernelor statelor membre și al entităților private pentru emisiunea de obligațiuni verzi.

Nivelul de interes pentru proiectele care vizează tranziția către energia regenerabilă crește din ce în ce mai mult pentru guvernele statelor membre ale UE, precum și pentru actorii din mediul privat. Deși costisitor, hidrogenul verde rămâne alternativa pentru eliminarea dependenței de combustibilii fosili rusești, dar și pentru asigurarea securității energetice din surse regenerabile, contribuind la obiectivul privind neutralitatea climatică. Investițiile masive și granturile acordate pentru dezvoltarea proiectelor de producție, infrastructură, distribuție și stocare de hidrogen verde demonstrează importanța acestuia pentru a face față provocărilor actuale și viitoare legate de securitatea energetică.

Statele din Europa trebuie să continue dezvoltarea unui sistem energetic mai rezilient și sustenabil, ținând cont de impactul geopolitic al conflictelor regionale asupra securității energetice. Astfel, crearea unui cadru de reglementare clar și stabil contribuie la atragerea de investiții în hidrogenul verde și energia regenerabilă, precum și stimulentele fiscale și oferirea de subvenții care să îmbunătățească eficiența, investițiile în rețele de distribuție și facilități de stocare, precum și reducerea costurile tehnologiilor de hidrogen verde.

Studiul nostru se limitează la lipsa de disponibilitate a datelor, în special pentru hidrogenul verde, dat fiind stadiul embrionar al tehnologiei de producere. Rămân însă numeroase teme de cercetare viitoare. Dincolo de temele referitoare la producția, costul și infrastructura de distribuție și de stocare a hidrogenului, un prim topic de interes ar putea fi extinderea utilizării hidrogenului în tehnologiile militare, dar și ca resursă de energie, dat fiind contextul actual al conflictului din Ucraina. Mai mult decât atât, este necesară și studierea în amănunt a transformării Ucrainei în hub energetic, precum și pentru producerea de hidrogen, ținând cont de resursele regenerabile și infrastructura de care dispune.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE:

1. Ajanovic, A., Sayer, M., Haas, R. (2022). *The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen*. În *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(57), 24136-24154.
2. Arcos, J.M. M., Santos, D.M. (2023). *The hydrogen color spectrum: techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production*. *Gases*, 3(1), pp. 25-46.
3. Bin Jumah, A. (2024). *A comprehensive review of production, applications, and the path to a sustainable energy future with hydrogen*. *RSC advances*, 14(36), 26400-26423.
4. Comisia Europeană (2023). *The European green bond standard – Supporting the transition*, https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/european-green-bond-standard-supporting-transition_en, accesat la 16 septembrie 2024.

5. Comisia Europeană (2020-a). *Key actions of the EU Hydrogen Strategy*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301>, accesat la 5 septembrie 2024.
6. Comisia Europeană (2020-b). *O strategie pentru hidrogen: pentru o Europă neutră climatic*, eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301, accesat la 10 septembrie 2024.
7. Comisia Europeană (2022-a), *REPowerEU Plan*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022SC0230>, accesat la 29 august 2024
8. Comisia Europeană (2022-b), *Hydrogen*, https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en, accesat la 4 septembrie 2024.
9. Comisia Europeană (2022-c). *European Hydrogen Bank*, https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/european-hydrogen-bank_en, accesat la 5 septembrie 2024.
10. Dash, S.K., Chakraborty, S., Elangovan, D. (2023). *A brief review of hydrogen production methods and their challenges*. *Energies*, 16(3), 1141.
11. Erdoğan, A., Güler, M.G. (2023). *Optimization and analysis of a hydrogen supply chain in terms of cost, CO₂ emissions, and risk: the case of Turkey*. În *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(60), 22752-22765.
12. European Environment Agency (2023). *Green bonds*, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/green-bonds-8th-eap?activeAccordion=546a7c35-9188-4d23-94ee-005d97c26f2b>, accesat la 18 septembrie 2024.
13. European Hydrogen Observatory (2023). *The European Hydrogen Landscape*, <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2023-11/Report%2001%20-%20November%202023%20-%20The%20European%20hydrogen%20market%20landscape.pdf>, accesat la 17 septembrie 2024.
14. France Hydrogène (2023). *National Hydrogen Strategy*, https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2023/10/France-Hydrogene_National-Hydrogen-Strategy_EN.pdf, accesat la 19 septembrie 2024.
15. H2 Energy News (2022). *15 French hydrogen projects selected from 100 European projects*, <https://energynews.biz/15-french-hydrogen-projects-selected-from-100-european-projects/#:~:text=And%20among%20more%20than%20100%20projects%20submitted%20to,Flins-sur-Seine%20%28Hyvia%20%E2%80%93%20Renault%20Group%20and%20Plug%20Power%29>, accesat la 19 septembrie 2024.
16. Hritsyshyna, M., Hutarevych, N. (2021). *Legal regulation of hydrogen in Germany and Ukraine as a precondition for energy partnership and energy transition*. *Energies*, 14(24), 8331.
17. Hydrogen Central (2024). *Launch of research project on green hydrogen production technologies the largest of its kind – Netherlands*, <https://hydrogen-central.com/launch-of-research-project-on-green-hydrogen-production-technologies-the-largest-of-its-kind-netherlands/>, accesat la 19 septembrie 2024.
18. HydrogenInsight (2024-a). *Analysis | Which green hydrogen projects received state-aid approval from the EU in the recent €7bn IPCEI round?*, <https://www.hydrogeninsight.com/production/analysis-which-green-hydrogen-projects-received-state-aid-approval-from-the-eu-in-the-recent-7bn-ipcei-round-2-1-1600680>, accesat la 5 septembrie 2024

19. Hydrogen Insight (2024-b). *EU gives green light to €1 bn Dutch green hydrogen subsidy scheme*, <https://www.hydrogeninsight.com/policy/eu-gives-green-light-to-1bn-dutch-green-hydrogen-subsidy-scheme/2-1-1684243>, accesat la 5 septembrie 2024
20. Hydrogen Insight (2024-c). *Germany grants €4.6 bn to 23 green hydrogen projects after EU approval*, <https://www.hydrogeninsight.com/policy/germany-grants-4-6bn-to-23-green-hydrogen-projects-after-eu-approval/2-1-1677658>, accesat la 16 septembrie 2024.
21. International Renewable Energy Agency/IRENA (2020). *Green Hydrogen – A guide to policy making*, <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>, accesat la 10 septembrie 2024.
22. Invest in Spain (2024). *Over 200 companies to promote 650 green hydrogen projects in Spain*, <https://www.investinspain.org/content/icex-invest/en/noticias-main/2024/enagas.html>, accesat la = 20 septembrie 2024.
23. Jain, A.K. (2010). *Data clustering: 50 years beyond K-means*. *Pattern recognition letters*, 31(8), pp. 651-666.
24. Ji, M., Wang, J. (2021). *Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators*. În *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(78), 38612-38635.
25. Madeira, S.C., Oliveira, A.L. (2004). *Biclustering algorithms for biological data analysis: a survey*. *IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics*, 1(1), pp. 24-45.
26. Münster, M., Bramstoft, R., Kountouris, I., Langer, L., Keles, D. & Schlautmann, R., ..., Rasmusson, H. (2024). *Perspectives on green hydrogen in Europe – during an energy crisis and towards future climate neutrality*. *Oxford Open Energy*, 3, oiae001, <https://academic.oup.com/ooenergy/article/doi/10.1093/ooenergy/oiae001/7595745>, accesat la 20 septembrie 2024.
27. Murtagh, F., Legendre, P. (2014). *Ward's hierarchical agglomerative clustering method: which algorithms implement Ward's criterion?* În *Journal of classification*, 31, pp. 274-295.
28. Pilavachi, P.A., Chatzipanagi, A.I., Spyropoulou, A.I. (2009). *Evaluation of hydrogen production methods using the analytic hierarchy process*. În *International Journal of hydrogen energy*, 34(13), 5294-5303.
29. Reda, B., Elzamar, A.A., Al Fazzani, S., Ezzat, S.M. (2024). *Green hydrogen as a source of renewable energy: a step towards sustainability, an overview*. *Environment, Development and Sustainability*, 1-21.
30. The Federal Government (2024). *National Hydrogen Strategy, Energy from climate-friendly gas*, <https://www.bundesregierung.de/breg-en/service/hydrogen-technology-2204238>, accesat la 20 septembrie 2024.
31. United Nations (2023). *Gothenburg Green Bonds/Sweden*, <https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/financing-for-climate-friendly/gothenburg-green-bonds>, accesat la 18 septembrie 2024.
32. Vadaszi, M., Szunyog, I., Szombati-Galyas, A.B. (iunie 2023). *The Role of Hydrogen Connected to the Existing Natural Gas Infrastructure in the Hungarian Energy Transition*. În *2023 – 19th International Conference on the European Energy Market (EEM)* (pp. 1-5). IEEE.