

ES ŠALIŲ GRUPAVIMAS, VERTINANT SU CO₂ EMISIJA SUSIJUSIUS RODIKLIUS

Giedrė Lapinskienė, Inga Pašiušienė, Rita Martišienė

Vilniaus kolegija

Anotacija. Spartus ekonomikos vystymasis daro reikšmingą poveikį aplinkos būklės blogėjimui, o klimato kaita išlieka viena svarbiausių šių procesų problemų. Nepaisant tarptautinių organizacijų, vyriausybių, verslo subjektų ir visuomenės pastangų, šios problemos vis dar nepavyksta suvaldyti. Pagrindinis šio tyrimo tikslas – sugrupuoti Europos Sąjungos (ES) šalis pagal CO₂ (anglies dioksido) emisijas ir kitus susijusius rodiklius, siekiant nustatyti panašias vystymosi tendencijas. Tyrime naudoti 27 ES valstybių narių 2000–2023 m. laikotarpio duomenys. Duomenys gauti iš „Eurostat“ duomenų bazės ir normalizuoti. Tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai: išanalizuoti mokslinę literatūrą CO₂ emisijų tematika; atlikti duomenų grupavimą taikant statistinius metodus; identifikuoti ir apibūdinti gautų grupių ypatybes. Tyrime taikomi metodai: mokslinės literatūros analizė, k-vidurkių (K-means) klasterizavimo metodas ir rezultatų interpretavimas remiantis ekonomine logika. Analizei pasirinkti rodikliai: CO₂ emisijos (tonomis vienam gyventojui), bendrasis vidaus produktas (BVP) vienam gyventojui, atsinaujinančiosios energijos dalis (RENC) ir energijos intensyvumas. Toks rodiklių derinys leidžia sistemiskai įvertinti šalių panašumus ir išskirti klasterius, atspindinčius skirtingus žaliosios transformacijos modelius. Atlikus klasterinę analizę nustatytos trys šalių grupės, pasižyminčios panašiomis vystymosi tendencijomis. Gauti rezultatai iš esmės sutampa su kitų autorių įžvalgomis apie šalių grupavimą pagal ekonominio išsivystymo ir aplinkosauginių rodiklių sąsajas. Vis dėlto tyrimo rezultatus riboja analizuojamo laikotarpio apimtis ir taikomo metodo prielaidos, kadangi k-vidurkių metodas neįvertina visų galimų išorinių veiksnių įtakos. Todėl nuoseklus šalių vystymosi stebėjimas ir tolesni tyrimai yra būtini siekiant išsamiau įvertinti ekonomikos ir energetikos transformacijos procesus.

Reikšminiai žodžiai: anglies dioksidas, bendrasis vidaus produktas, atsinaujinančioji energija, energijos intensyvumas, Europos Sąjunga

Įvadas

Pasaulinis iššūkis kovoti su klimato kaita lėmė, kad perėjimas prie žaliosios ekonomikos tapo neatidėliotinu tarptautiniu prioritetu, kuriame Europos Sąjunga (ES) atlieka itin svarbų vaidmenį. Klimato neutralumas iki 2050 m. reiškia, kad ES šalys privalo pasiekti nulines šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas, daugiausia jas mažindamos energetikos sektoriuje, atsisakydamos itin taršių energijos šaltinių, tokių kaip anglis ir dujos, pereidamos prie atsinaujinančiosios energijos šaltinių, taip pat investuodamos į technologijų plėtrą ir aplinkos apsaugą. Įgyvendindama ambicingas politikos priemones ir tikslus, skirtus emisijoms mažinti bei atsinaujinančiosios energijos daliai didinti, ES yra šios energetikos sektoriaus transformacijos priešakyje (European Commission, 2022). ES vaidina esminį vaidmenį mažinant anglies dioksido emisijas ekonomikoje, reaguodama į skubų poreikį stabdyti klimato kaitą ir išsaugoti gyvybingą planetą ateities kartoms. Šios transformacijos centre yra energetikos sektorius, kuris sudaro apie 75 procentus visų šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijų. Siekiant klimato neutralumo, šis sektorius turi pereiti nuo iškastinio kuro prie atsinaujinančiųjų energijos šaltinių. Šį pertvarkos procesą lemia daugybė tarpusavyje susijusių veiksnių, įskaitant reguliacines ir politikos priemones, technologinius apribojimus bei inovacinius sprendimus, ekonominius suvaržymus, geopolitinius iššūkius ir visuomenės priimtinumo aspektus.

Moksliniai tyrimai, nagrinėjantys CO₂ emisijų ir BVP bei kitų susijusių veiksnių ryšį ES, apima platų spektrą – nuo išsamios politikos sistemų ir tikslų analizės, atsinaujinančiosios energijos ir energijos vartojimo efektyvumo diegimo problemų bei žaliojo finansavimo iki įvairių veiksnių, tokių kaip geopolitiniai klausimai, analizės. Galima išskirti dvi pagrindines tyrimų, analizuojančių veiksnius, darančius įtaką CO₂ emisijoms, kryptis. Pirmoji, paremta Grossman`o ir Krugman`o darbais (nuo jų išleistų publikacijų 1990 m.), nagrinėja aplinkos Kuznets`o kreivės (EKC) hipotezės pagrįstumą (Stern, 2018; Akar ir kt., 2025; Nazir ir kt., 2018; Lapinskienė ir kt., 2014). Antroji kryptis gali būti skirstoma į kelis pogrupius, pavyzdžiui, orientuotus į energijos vartojimą arba nagrinėjančius įvairius kitus veiksnius, tokius kaip iškastinio kuro ir atsinaujinančių išteklių santykis, taip pat globalios prekybos ir kitų veiksnių poveikis (Hasanov ir kt., 2024; Shahnazi, Shabani, 2021; Cao ir kt., 2022; Chen ir kt., 2022). Tokiuose tyrimuose CO₂ arba ŠESD dažniausiai naudojami kaip patikimi priklausomieji kintamieji. Naujausi tyrimai analizuoja anglies dioksido emisijas, BVP ir energetikos sektoriaus transformaciją iš įvairių perspektyvų, taikydami skirtingas regresinės analizės variacijas įvairiems regionams ir laikotarpiams (Hassan ir kt., 2024; Chen ir kt., 2022; Gatto ir kt., 2024; Rao ir kt., 2024; Murshed ir kt., 2022; Balsalobre-Lorente ir kt., 2018; Lapinskienė, 2014).

Ši tyrimų kryptis reikalauja nuolatinio testavimo, siekiant užfiksuoti naujas įžvalgas ir stebėti žaliosios transformacijos eigą įvairiuose regionuose. Labai dažnai šie regresiniai tyrimai užbaigiami šalių klasterizavimu, siekiant padėti stebėti regionų plėtrą. Tęsiant šiuos tyrimus, straipsnio tikslas yra, taikant k-vidurkių (K-means) metodą, suskirstyti ES šalis į homogeniškas grupes pagal CO₂ emisijos ir kitus su ja susijusius socialinius bei ekonominius rodiklius ir įvertinti šių grupių raidos ypatybes. Tikslui pasiekti formuluojami uždaviniai:

1. Atlikti naujausių mokslinių publikacijų analizę, išskiriant dažniausiai naudojamus modelius su CO₂ emisijos rodikliu ir grupavimo ypatumus.
2. Sudaryti analizei tinkamą duomenų rinkinį.
3. Pritaikyti k-vidurkių metodą, siekiant nustatyti optimalų klasterių skaičių (naudojant „alkūnės“ metodą) ir suskirstyti ES šalis į grupes.
4. Statistiškai ir ekonomiškai interpretuoti gautas grupes.

Literatūros apžvalga

Aplinkos rodiklių ir ekonomikos augimo sąsajų analizė turi ilgą tyrimų tradiciją. 1991 m. Grossman`as ir Krueger`is, remdamiesi Kuznets`o hipoteze, pristatė tyrimą apie galimą Šiaurės Amerikos laisvosios prekybos susitarimo poveikį aplinkai. Dar anksčiau Kuznets`as (1955) pirmasis aprašė dviejų rodiklių – bendrojo vidaus produkto (BVP) ir pajamų nelygybės – ryšį, pavaizduodamas jį apverstos U formos kreive. Vėliau ši sąsaja aplinkos ekonomikos literatūroje buvo perinterpretuota ir įgijo aplinkos Kuznets`o kreivės (EKC) pavadinimą.

Per pastaruosius tris dešimtmečius tokio pobūdžio tyrimai itin paplito, o EKC modelis plačiai taikomas analizuojant ekonomikos augimo ir aplinkos būklės sąveiką. Mokslininkai taip pat siekė nustatyti BVP lygį, kuriam esant taršos mastas pradeda mažėti (Beckerman, 1992; Grossman, Krueger, 1991, 1995; Holtz-Eakin, Selden, 1995).

Nepaisant plataus taikymo, EKC koncepcija sulaukė kritikos dėl savo ribotumų, kuriuos išsamiai aptarė Dinda (2004, 2006) bei Brock`as ir Taylor`as (2010). Vis dėlto ši analizės kryptis išlieka aktuali ir iki šiol plačiai taikoma tiriant skirtingus regionus, laikotarpius ar konkrečias ūkio šakas. Pagrindiniai tyrimų klausimai išlieka tie patys: koks yra ryšys tarp BVP ir įvairių aplinkos degradacijos rodiklių bei kokiuose lūžio taškuose aplinkos būklė pradeda gerėti (Saboori, Sulaiman, 2013; Apergis, Payne, 2009; Stern, 2018; Akar ir kt., 2025; Nazir ir kt., 2018).

Pastaraisiais dešimtmečiais dauguma tyrimų, kuriuose priklausomas kintamasis yra CO₂ emisijos, buvo išplėsti, į modelius įtraukiant papildomus nepriklausomus kintamuosius. Papildomų rodiklių įtraukimas sudaro prielaidas išsamiau ir tiksliau įvertinti įvairių veiksnių poveikį analizuojamiems procesams. Dalis tyrimų yra orientuoti į energetikos sektorių, analizuojant skirtingų rodiklių, tokių kaip atsinaujinančiosios energijos išteklių, energijos produktyvumas, energijos pajėgumai ar kiti su šio sektoriaus žaliaja transformacija susiję veiksniai, įtaką (Chen ir kt., 2022; Hassan ir kt., 2024). Taip pat egzistuoja nemažai tyrimų, kuriuose viename modelyje testuojami keli veiksniai, pavyzdžiui, finansų plėtra, tiesioginės užsienio investicijos, gyventojų tankis, industrializacijos lygis ir kt. (Hasanov ir kt., 2024; Cao ir kt., 2022; Shahnazi, Shabani, 2021; Balsalobre-Lorente ir kt., 2018).

Straipsnyje, kuriame analizuojama CO₂ emisijų ir BVP dinamika 11 šalių nuo 1990 m., pabrėžiama, kad ekonomikos augimo atsiejimas nuo CO₂ emisijų yra įmanomas tik sudėtingomis geopolitinėmis sąlygomis. Rezultatai patvirtina aplinkos EKC hipotezę, nes BVP vienam gyventojui augo, o CO₂ emisijos vienam gyventojui mažėjo (Ziemblińska ir kt., 2025). Hassan`as ir kt. (2024) atliko išsamią atsinaujinančiosios energijos pajėgumų ir gamybos analizę 27 Europos Sąjungos šalyse ir Jungtinėje Karalystėje 2001–2021 m. laikotarpiu. Vokietija yra lyderė atsinaujinančiosios energijos gamyboje, daugiausia dėl reikšmingų pasiekimų saulės ir vėjo energetikos technologijų srityje. Prancūzija ir Vokietija taip pat yra lyderės žaliojo vandenilio gamyboje. Hidroenergija išlieka svarbi atsinaujinančiosios energijos gamybos dalis šalyse, turinčiose palankias geografines sąlygas, o saulės ir vėjo energija dominuoja bendrame gamybos kontekste visame regione. Šie autoriai atliko išsamų Europos energetikos peizažo žemėlapi 2024 m. Šalyse, kuriose yra didelis energijos vartojimas, daugiau investuojama į atsinaujinančiosios energijos gamybą. Murshed`as ir kt. (2022) nagrinėjo pagrindinius veiksnius, kurie lemia anglies dioksido produktyvumą septyniose šalyse 2007–2018 m. Tyrėjai sujungė atsinaujinančiosios energijos vartojimą, ekonomikos augimą, urbanizaciją, finansinį įtraukimą ir globalizaciją, siekdami iširti jų poveikį anglies dioksido produktyvumui. Rezultatai rodo, kad atsinaujinančiosios energijos vartojimas teigiamai veikia anglies dioksido produktyvumą. Balsalobre-Lorente ir kt. atliktas tyrimas pateikia įrodymų, kaip ekonomikos augimas, atsinaujinančiosios energijos vartojimas ir gamtinių išteklių gausa veikia CO₂ emisijas penkiose ES šalyse (Prancūzija, Vokietija, Italija, Ispanija ir Jungtinė Karalystė) 1985–2016 m. laikotarpiu. Tyrimo rezultatai patvirtina, kad atsinaujinančiosios energijos

vartojimas turi reikšmingą neigiamą poveikį CO₂ emisijoms. Tyrimo rezultatai rodo, kad padidėjusi ekonominė veikla didina energijos vartojimą ir emisijas, ypač tada, kai atsinaujinančioji energija nėra pakankamai plėtojama (Balsalobre-Lorente ir kt., 2018). Maria'os Basilio tyrime (2025) 27 ES šalys (2015–2022 m. laikotarpio duomenys) suskirstytos į grupes pagal energijos vartojimo efektyvumą ir atsinaujinančių šaltinių plėtra. Tyrimo rezultatai rodo, kad pagal pastovios masto gražos modelį efektyviausiai energiją naudoja mažosios ES narės, tokios kaip Liuksemburgas, Malta ir Airija, o kintamos masto gražos kontekste išsiskiria sparčią pažangą darančios Rytų Europos šalys, pavyzdžiui, Bulgarija ir Rumunija. Autoriai nustatė, kad esminę įtaką energijos vartojimo efektyvumui daro energijos kainos, investicijos į mokslinius tyrimus bei patentų skaičius, o atsinaujinančių išteklių integraciją labiausiai skatina valstybės išlaidos aplinkosaugai ir aukštas gyventojų išsilavinimo lygis. Lyulyov`as ir Pimonenko (2025) suskirstė šalis į tris klasterius pagal kultūrinius bruožus ir „žaliojo“ produktyvumo rodiklius. Į pirmą priskyrė Austriją, Italiją, Daniją, Liuksemburgą, Suomiją, Malta, Vokietiją ir Ispaniją. Joms būdingas aukštesnis aplinkosauginis produktyvumas, mažesnis kultūrinis kintamumas, institucinis stabilumas ir technologijomis grindžiama ekologinė pažanga. Antrą klasterį sudaro Belgija, Nyderlandai, Čekija, Portugalija, Prancūzija, Slovėnija, Airija ir Švedija. Šios šalys pasižymi didesniu efektyvumo konvergavimu, stipriais technologiniais rezultatais ir orientacija į efektyvumo didinimą bei žaliąsias politikos priemones. Trečias klasteris apima Bulgariją, Vengriją, Rumuniją, Kroatiją, Latviją, Slovakiją, Estiją, Lietuvą, Graikiją, Lenkiją ir Ukrainą. Šioms šalims būdingas žemesnis produktyvumas, didesnis rodiklių nepastovumas ir „pasivijimo“ tipo augimas, tačiau jos turi potencialo sparčiau konverguoti prie ES standartų.

Apibendrinant galima teigti, kad analizuoti tyrimai ir jų gausa pabrėžia CO₂ emisijos ir susijusių rodiklių analizės reikšmingumą, ypač ES regione siekiant pasiekti nulinės emisijos tikslą. Tęsiant šiuos tyrimus pasirinkta ES šalis sugrupuoti pagal CO₂ emisiją ir pasirinktus rodiklius.

Tyrimo metodika

Šiam empiriniam tyrimui duomenys buvo surinkti iš „Eurostat“ duomenų bazės, siekiant sugrupuoti šalis pagal pasirinktus rodiklius: CO₂ emisijas, atsinaujinančiosios energijos plėtrą, energijos intensyvumą ir ekonomikos augimą (Eurostat, 2024).

Analizei pasirinktas k-vidurkių klasterizavimo metodas. Klasterizavimas – tai duomenų grupavimo metodas, kai grupės nėra iš anksto apibrėžtos. K-vidurkių metodo tikslas – suskirstyti duomenis į K grupes (klasterius) taip, kad tos pačios grupės elementai būtų kuo panašesni tarpusavyje, o skirtingų grupių – kuo labiau skirtingi. Šis metodas yra vienas plačiausiai taikomų duomenų grupavimo algoritmų. Tyrimui atlikti naudota statistinė programa „Gretl“.

Analizei buvo pasirinkti šie pagrindiniai rodikliai:

- CO₂ (anglies dioksido) emisijos, išreikštos tonomis vienam gyventojui.
- BVP (bendrasis vidaus produktas) vienam gyventojui – šalies ekonominio našumo rodiklis, atspindintis visų per tam tikrus metus šalies teritorijoje pagamintų prekių ir paslaugų bendrą piniginę vertę, padalintą iš tos šalies gyventojų skaičiaus. Šis rodiklis pasirinktas kaip ekonomikos augimo rodiklis.
- Atsinaujinančiosios energijos dalis bendrajame galutiniame energijos suvartojime pagal sektorius (*RENC*). Šis rodiklis, parodo suvartojamos atsinaujinančiosios energijos dalį bendrajame galutiniame energijos suvartojime pagal Atsinaujinančiosios energijos direktyvą. Jis išreiškiamas procentais. Atsinaujinančioji energija – tai energijos suvartojimas iš atsinaujinančiųjų šaltinių, įskaitant hidroenergią, geoterminę, vėjo bei saulės energijas, biomasę ir atliekas; rodiklis matuojamas tonomis naftos ekvivalento vienam gyventojui.
- Energijos intensyvumas (*INTENSITY*) – rodiklis, kuris parodo, kiek pirminės energijos šaliai reikia vienam ekonominės produkcijos vienetui pagaminti. Jis yra lygus bendrojo vidaus energijos suvartojimo ir BVP santykiui ir yra matuojamas kilogramais naftos ekvivalento 1 000 eurų (kgoe/€ 000).

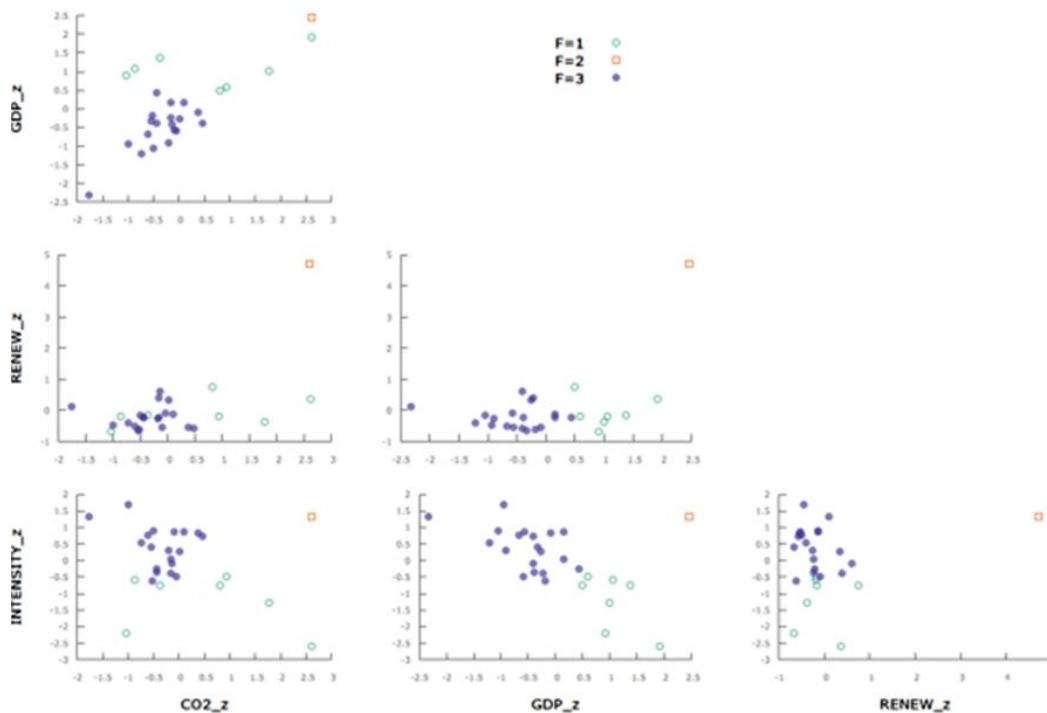
Pirminiai duomenys papildomai buvo perskaičiuoti kaip metiniai duomenų procentiniai pokyčiai. Duomenys buvo standartizuoti taikant z reikšmių (*z-score*) metodą, todėl skirtingus rodiklius galima buvo palyginti tarpusavyje.

Tyrimo analizuoti šių Europos Sąjungos valstybių duomenys: Malta, Airija, Lietuva, Nyderlandai, Graikija, Kipras, Danija, Austrija, Belgija, Lenkija, Prancūzija, Latvija, Liuksemburgas, Ispanija, Vokietija, Švedija, Italija, Slovakija, Čekija, Vengrija, Portugalija, Kroatija, Slovėnija, Bulgarija, Suomija, Estija ir Rumunija.

Tyrimo rezultatų analizė

Pateiktuose sklaidos grafikuose vaizduojami k-vidurkių (*K-means*) grupavimo rezultatai, kuriuose Europos Sąjungos šalys sugrupuotos pagal standartizuotus CO₂ emisijų, BVP, atsinaujinančiosios energijos ir energijos intensyvumo rodiklius. Taškų spalvos žymi skirtingus klasterius, o grafikai leidžia vizualiai įvertinti nagrinėjamų rodiklių tarpusavio ryšius bei šalių pasiskirstymą tarp klasterių (1 pav.).

Vizualizacija sudaryta iš porinių sklaidos diagramų, atskleidžiančių ryšius tarp rodiklių ir šalių grupavimo struktūrą. Kiekvienas grafiko taškas atitinka vieną ES valstybę narę.



1 pav. Nagrinėjamų rodiklių tarpusavio ryšiai

Analizė rodo, kad šalys pasiskirsto į tris grupes, kurios skiriasi ekonominio išsivystymo lygiu, emisijų intensyvumu ir atsinaujinančiosios energijos naudojimu.

Techniniai modelio duomenys pateikti žemiau (žr. 2 pav.).

```
*****
*** K-means unsupervised learning clustering ***

Parameters
No. of clusters: 3
Distance type: 'euclidean'
Algorithm: 'full'
Initializer: 'random'
Max. iterations: 300
No. of random draws: 10
Tolerance: 0.000100

Estimation results:
Total sum of squares: 1.080000e+002
Total within-cluster sum of squares: 3.944049e+001
Weighted total within-cluster sum of squares: 1.398863e+001
Between cluster sum of squares: 6.855951e+001
(Between / Total): 63.481 pct.
*****
          CO2_z      GDP_z      RENEW_z  INTENSITY_z
Centroid=1  0.55138    1.0513   -0.070839   -1.2358
Centroid=2  2.6025     2.4585    4.7262     1.3366
Centroid=3 -0.34011    -0.51672  -0.22265    0.38494
```

2 pav. Techniniai modelio duomenys

Rodiklis „Tarpklasterinės ir bendrosios kvadratų sumų santykis”, paaiškinantis duomenų sklaidos dalį, siekia 63,481 pct. Tai rodo, kad suskirstymas į klasterius paaiškina apie 63,5 proc. duomenų sklaidos. Mokslinėje literatūroje ši 50–60 proc. riba laikoma empirine taisykle, leidžiančia vertinti modelio kokybę kaip pakankamą (Everitt ir kt., 2011).

Remiantis grafine analize galima matyti tris pagrindines šalių grupes: pirmasis klasteris (F=1) pažymėtas žalsvais taškais, antrasis klasteris (F=2) – oranžiniais kvadratais, trečiasis klasteris (F=3) – violetiniais taškais.

Pirmam klasteriui priskiriamos Bulgarija, Estija, Airija, Lietuva, Liuksemburgas, Lenkija ir Rumunija. Šios šalys pasižymi santykinai didesniu BVP augimu ir mažėjančiu energijos intensyvumu. Kadangi analizėje buvo naudojami pokyčiai (trendai), o ne statinės reikšmės, modelis suformavo pažangaus augimo šalių grupę. Pavyzdžiui, tokios valstybės kaip Bulgarija, Rumunija ir Lietuva pradėjo nuo santykinai žemo ekonominio išsivystymo lygio, todėl jų augimo tempai yra didesni nei didžiųjų ES šalių. Bulgarija pasižymi vienu sparčiausių CO₂ intensyvumo mažėjimo tempų ir teigiamais BVP pokyčiais. Energijos intensyvumo mažėjimas šiose šalyse yra ypač ryškus. Pavyzdžiui, Bulgarijoje, kuri anksčiau pasižymėjo vienu aukščiausių energijos neefektyvumo lygių, net ir nedideli modernizacijos procesai (tokie kaip pastatų renovacija, ES fondų investicijos į pramonę) sukuria milžinišką teigiamą pokytį standartizuotuose rodikliuose. Visos šio klasterio šalys nagrinėjamu laikotarpiu demonstravo didesnę nei vidutinę energijos vartojimo efektyvumo didėjimą ir taršos mažėjimą ekonomikos augimo kontekste.

Antram klasteriui priskiriama išskirtinė valstybė – Malta, kuri turi labai aukštas kai kurių rodiklių reikšmes, ypač BVP ir atsinaujinančiosios energijos augimo srityse. Nors Malta sparčiai didina atsinaujinančiosios energijos (AEI) dalį (nuo maždaug 4 proc. iki beveik 17 proc. per dešimtmetį), jos bendras AEI lygis išlieka vienas žemiausių ES (šalia Liuksemburgo ir Belgijos). Šis netolygumas ypač išryškėja vertinant procentinius pokyčius, kurie yra gerokai didesni nei daugelyje kontinentinės Europos valstybių. Maltos BVP augimo tempas yra vienas didžiausių ES (2025 m. prognozė apie 4,0 proc.), kai tuo tarpu tokios šalys kaip Vokietija, Suomija ar Prancūzija, esančios trečiame klasteryje, demonstruoja labai lėtą augimą (apie 0,2–1,5 proc.). Taikant Z reikšmių (*z-score*) standartizaciją, šie skirtumai paverčiami milžinišku atstumu duomenų erdvėje.

Trečiam klasteriui priskiriama didžioji dalis ES valstybių: Belgija, Čekija, Danija, Vokietija, Graikija, Ispanija, Prancūzija, Kroatija, Italija, Kipras, Latvija, Vengrija, Nyderlandai, Austrija, Portugalija, Slovėnija, Slovakija, Suomija ir Švedija. Šioms šalims būdingos vidutinės arba santykinai mažesnės BVP pokyčio reikšmės bei vidutinis CO₂ emisijų lygis. Šis klasteris gali būti apibūdinamas kaip „ES branduolys“ arba šalių su stabilizuota ekonomika grupė. Joms būdingas lėtas, tačiau stabilus BVP pokytis, ypač lyginant su sparčiai augančiomis ekonomikomis (pvz., pirmo klasterio šalimis ar Malta). Taip pat šioms valstybėms būdingas nuoseklus dekarbonizacijos procesas: turėdamos ilgą laiką susiformavusias energetikos sistemas, jos palaipsniui pereina prie tvaresnių („žaliųjų“) sprendimų, tačiau šis procesas nėra toks spartus ir drastiškas kaip besivejančiose Rytų Europos šalyse.

Toks šalių grupavimas iš esmės atitinka ekonominę logiką: pirmame klasteryje dominuoja mažesnės arba sparčiau besivystančios ekonomikos valstybės, trečiame klasteryje – labiau išsivysčiusios ir struktūriškai panašios ekonomikos šalys, o Malta išsiskiria specifine ekonomikos ir energetikos struktūra, todėl sudaro atskirą klasterį.

Apibendrinant galima teigti, kad šis grupavimas atskleidžia realią ES dviejų (ar net trijų) greičių energetinę ir ekonominę transformaciją. Kadangi analizei buvo naudojami pokyčių (dinamikos) duomenys, pritaikyti klasterizavimo rezultatai leidžia identifikuoti ne tik esamą padėtį, bet ir tai, kurios šalys sparčiausiai progresuoja efektyvumo ir tvarumo srityse.

Remiantis šia analize, galima suformuluoti diferencijuotas politikos rekomendacijas atskiroms ES šalių grupėms. Aukštos CO₂ emisijos ir aukšto ekonominio išsivystymo šalims tikslinga orientuotis į technologines inovacijas, didinti investicijas į atsinaujinančiąją energetiką, energijos efektyvumą bei anglies dioksido surinkimo sprendimus. Vidutinės emisijos šalių grupei svarbu spartinti energetikos transformaciją, mažinant priklausomybę nuo iškastinio kuro ir skatinant struktūrinius ekonomikos pokyčius. Tuo tarpu žemesnės emisijos šalims rekomenduojama išlaikyti esamą trajektoriją, stiprinant prevencines priemones ir užtikrinant tvarų ekonomikos augimą. Remiantis gautais klasterinės analizės rezultatais, galima numatyti, kad, nesant papildomų politikos intervencijų, aukštos CO₂ emisijos šalių grupė išliks didžiausiu emisijų šaltiniu, o emisijų mažėjimo tempai tarp klasterių išliks netolygūs. Tuo tarpu šalys, kurios jau pasižymi žemesniu emisijų lygiu ir didesne atsinaujinančiosios energijos dalimi, tikėtina, išlaikys stabilesnę ir tvaresnę raidos trajektoriją. Tai rodo, kad konvergencija tarp ES šalių emisijų srityje gali vykti lėčiau nei numatyta strateginiuose tiksluose. Tyrimo rezultatai leidžia įvertinti, kiek skirtingų klasterių šalys yra pasirengusios siekti šių ES žaliojo kurso ir „Fit 55“ paketo, kuriuose numatomas reikšmingas šiltnamio efektą sukeliančių dujų mažinimas iki 2030 m. Gauti klasteriai rodo, kad ES šalys juda šių tikslų link nevienodu tempu: dalis šalių jau artėja prie strateginiuose dokumentuose numatytų tikslų, tuo tarpu kitos susiduria su didesniais struktūriniais iššūkiais. Tai leidžia teigti, kad vienodas politikos priemonių taikymas gali būti nepakankamas, o strateginių tikslų įgyvendinimas turėtų būti diferencijuojamas pagal šalių grupių ypatybes.

Vieningos politikos priemonės visoms ES šalims nėra pakankamai efektyvios, todėl klimato kaitos mažinimo strategijos turėtų būti diferencijuojamos pagal šalių ekonominę išsivystymą, energetinę struktūrą ir emisijų lygį. Tokiu būdu būtų galima pasiekti efektyvesnių ir tvaresnių rezultatų visos Europos Sąjungos mastu.

Išvados

Atlikta K-vidurkių (*K-means*) klasterizacija, naudojant standartizuotus rodiklių pokyčius (*z-score*), leido išskirti tris logiškai pagrįstas grupes, atspindinčias skirtingus Europos Sąjungos šalių ekonominės ir energetinės transformacijos tempus. Nustatyta, kad šalių pažanga mažinant CO₂ emisijas yra nevienoda, todėl vienodų politikos priemonių taikymas visoms valstybėms nėra pakankamai efektyvus.

1-as klasteris: „Sparčiosios transformacijos ir konvergencijos grupė“ (Bulgarija, Estija, Airija, Lietuva, Liuksemburgas, Lenkija ir Rumunija). Šis klasteris apima šalis, kurios nagrinėjamu laikotarpiu demonstravo didžiausią santykinę progresą. Nors kai kurių valstybių absoliutūs rodikliai išlieka žemesni, jų augimo tempai ir struktūriniai pokyčiai yra reikšmingi. Tai sutampa su Kasperowicz ir kt. (2020) įžvalgomis apie naujųjų ES narių „pavijimo“ (*catch-up*) efektą. Airija ir Liuksemburgas į šį klasterį patenka dėl ekstremalaus BVP augimo, kuris, kartu su mažėjančiu emisijų lygiu, sukuria ryškų ekonomikos atskyrimo nuo taršos (*decoupling*) efektą, identišką Baltijos šalių ar Lenkijos dinamikai. Šis klasteris siejamas su „Žaliosios konvergencijos“ teorija (Bilan ir kt., 2019), teigiančia, kad mažiau energetiškai efektyvios šalys modernizuojamos sparčiau nei brandžios ekonomikos.

2-as klasteris: „Unikalios trajektorijos išskirtis“ (Malta). Šiam klasteriui priklausanti Malta išsiskiria kaip unikalus atvejis. K-vidurkių algoritmas ją identifiko kaip anomaliją, kas yra pagrįsta jos specifine ekonomine ir energetine struktūra. Kaip maža salos valstybė, orientuota ne į pramonę, o į paslaugų sektorių, Malta pasižymi kitokia energetikos sistema nei kitos ES šalys (Vella, Martinez, 2021). Šis rezultatas rodo, kad ES energetikos politika nesuvienija valstybių, pasižyminčių izoliuotomis rinkomis, raidos su kitų šalių transformacijos modeliais.

3-as klasteris: „Stabilios transformacijos branduolys“ (Vokietija, Prancūzija, Skandinavija, Italija ir kt.). Šis klasteris apima didžiausias ir ekonomiškai brandžias ES valstybes, kurių vystymasis išsiskiria stabilium, ne ypač greitu tempu, taigi jų metiniai pokyčiai *z-score* skalėje dažniausiai yra artimi nuliui arba vidurkiui. Ši grupė atitinka pakopinį vystymosi modelio tipą, pagal kurį tvirtose ekonomikose sisteminiai pokyčiai vyksta lėčiau dėl jų masto ir jau pasiektos technologinės pažangos lygio (Marra, Colantonio, 2021).

Šis grupavimo tyrimas atskleidžia nevienodus šalių vystymosi pokyčių tempus ir patvirtina daugiapakopės ekonomikos ir energetikos plėtrą.

Tyrimo rezultatus būtina vertinti atsižvelgiant į tam tikrus apribojimus. Pirma, analizė priklauso nuo pasirinktų rodiklių rinkinio ir duomenų laikotarpio, todėl kitų kintamųjų įtraukimas ar kitoks laikotarpio pasirinkimas galėtų lemti skirtingą šalių grupavimą. Antra, k-vidurkių metodas reikalauja iš anksto nustatyti klasterių skaičių, todėl galutiniai rezultatai iš dalies priklauso nuo pasirinkto skaičiaus. Trečia, metodas yra jautrus duomenų masteliui ir išskirtims, todėl duomenų normalizavimas įtaka gali paveikti grupavimo rezultatus. Galiausiai, tyrime nagrinėjami agreguoti nacionalinio lygmens duomenys, kurie neatskleidžia vidinių šalių skirtumų.

Tolesni tyrimai galėtų būti orientuoti į išsamesnių rodiklių įtraukimą, ilgesnio laikotarpio analizę bei kitų klasterizavimo metodų taikymą, siekiant patikrinti rezultatų stabilumą. Taip pat tikslinga plėtoti šio modelio taikymą praktikoje, vertinant ES šalių pažangą įgyvendinant klimato politikos tikslus.

Literatūra

1. Akar, G., Kaplan, E. A., Güler, İ., & Şahin, S. (2025). Has the Environmental Kuznets Curve hypothesis become stronger? A comparative analysis for OECD countries and selected late-industrialising Asian economies. *Journal of Environmental Management*, 394, 127575. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127575>
2. Apergis, N., & Payne, J.E. (2009). CO₂ emissions, energy use, and output in central America. *Energy Policy*, 37(8), 3282–3286. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.048>
3. Balsalobre-Lorente, D., Shahbaz, M., Roubaud, D., & Farhani, S. (2018). How do economic growth, renewable electricity, and natural resources contribute to CO₂ emissions? *Energy Policy*, 113, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.050>
4. Basilio, M. (2025). Renewable energy and energy efficiency: An exploratory study in EU countries, *Sustainable Futures*, 9, 100514. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100514>
5. Beckerman, W. (1992). Economic growth and the environment: whose growth? Whose environment? *World Development*, 20(4), 481–496. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(92\)90038-W](https://doi.org/10.1016/0305-750X(92)90038-W)
6. Bilan, Y., Streimikiene, D., Vasylieva, T., Lyulyov, O., Pimonenko, T., & Pavlyk, A. (2019). Linking between renewable energy, CO₂ emissions, and economic growth: Challenges for candidates and potential candidates for the EU membership. *Sustainability*, 11(6), 1528. <https://doi.org/10.3390/su11061528>
7. Brock, W.A., & Taylor, M.S. (2010). The green Solow model. *Journal of Economic Growth*, 15(2), 127–153. <https://doi.org/10.1007/s10887-010-9051-0>

8. Cao, H., Khan, M.K., Rehman, A., Dagar, V., Oryani, B., & Tanveer, A. (2022). Impact of globalisation, institutional quality, economic growth, electricity and renewable energy consumption on Carbon Dioxide emissions in OECD countries. *Environ Sci Pollut Res*, 29, 24191–24202. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17076-3>
9. Chen, C., Pinar, M., & Stengos, T. (2022). Renewable energy and CO2 emissions: New evidence with the panel threshold model. *Renewable Energy*, 194, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.095>
10. Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological Economics*, 49, 431–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
11. Dinda, S. (2006). Reassessing the environmental Kuznets curve for CO2 emissions: A robustness exercise. *Ecological Economics*, 57(1), 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.031>
12. European Commission. (2022). Renewable energy targets. https://Energy.Ec.Europa.Eu/Topics/Renewable-Energy/Renewable-Energy-Directive-Targets-and-Rules/Renewable-Energy-Targets_en
13. Eurostat. (2024). Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
14. Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster analysis* (5th ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470977811>
15. Gatto, A., Mattera, R. & Panarello, D. (2024). For whom the bell tolls: A spatial analysis of the renewable energy transition determinants in Europe in light of the Russia-Ukraine war. *Journal of Environmental Management*, 352, 119833. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119833>
16. Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental impact of a North American free trade agreement*. Working Paper 3194. National Bureau of Economic Research. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w3914/w3914.pdf
17. Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 110, 353–377. <http://dx.doi.org/10.2307/2118443>
18. Hasanov, F. J., Mukhtarov, S., Suleymanov, E., & Shannak, S. (2024). The role of renewable energy and total factor productivity in reducing carbon emissions: A case of top-ranked nations in the renewable energy country attractiveness index. *Journal of Environmental Management*, 361, 121220. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121220>
19. Hassan, Q., Nassar, A. K., Al-Jiboory, A. K., Viktor, P., Telba, A. A., Awwad, E. M., Amjad, A., Fakhrudeen, H. F., Algburi, S., Mashkooor, S. C., Jaszczur, M., Sameen, A. Z., & Barakat, M. (2024). Mapping Europe renewable energy landscape: Insights into solar, wind, hydro, and green hydrogen production. *Technology in Society*, 77, 102535. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102535>
20. Holtz-Eakin, D., & Selden, T. M. (1995). Stoking the fires? CO2 emissions and economic growth. *Journal of public economics*, 57, 85–101. [https://doi.org/10.1016/0047-2727\(94\)01449-X](https://doi.org/10.1016/0047-2727(94)01449-X)
21. Kasperowicz, R., Bilan, Y., & Štreimikienė, D. (2020). The renewable energy and economic growth nexus in European countries. *Sustainable Development*, 28, 1086–1093. <https://doi.org/10.1002/sd.2060>
22. Lapinskienė, G., Tvaronavičienė, M., & Vaitkus, P. (2014). Greenhouse gases emissions and economic growth: Evidence substantiating the presence of environmental Kuznets curve in the EU. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 65–78. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.881434>
23. Lyulyov, O., & Pimonenko, T. (2025). Mapping Cultural Influence on Green Economic Development. *Economics and Culture*, 22(1), 81–96. <https://doi.org/10.2478/jec-2025-0007>
24. Marra, A., & Colantonio, E. (2021). The path to renewable energy consumption in the European Union through drivers and barriers: A panel vector autoregressive approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 76, 100958. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100958>
25. Murshed, M., Apergis, N., Alam, M. S., Khan, U., & Mahmud, S. (2022). The impacts of renewable energy, financial inclusivity, globalization, economic growth, and urbanization on carbon productivity: Evidence from net moderation and mediation effects of energy efficiency gains. *Renewable Energy*, 196, 824–838. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.012>
26. Nazir, M. I., Nazir, M. R., Hashmi, S. H., & Ali, Z. (2018). Environmental Kuznets curve hypothesis for Pakistan: empirical evidence form ARDL bound testing and causality approach. *Int. J. Green Energy*, 15(2), 1–11. <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1529590>
27. Rao, A., Kumar, S., & Karim, S. (2024). Accelerating renewables: Unveiling the role of green energy markets. *Applied Energy*, 366, 123286. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123286>
28. Saboori, B., & Sulaiman, J. (2013). CO growth in the association of Southeast Asian Nations (ASEAN) countries: a cointegration approach. *Energy*, 55, 813–822. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.038>
29. Shahnazi, R., & Shabani, Z. D. (2021). The effects of renewable energy, spatial spillover of CO2 emissions, and economic freedom on CO2 emissions in the EU. *Renewable Energy*, 169, 293–307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.016>
30. Stern, D. I. (2018). Environmental Kuznets Curve. *Encyclopedia of Energy*, 2, 517–525. <http://stermdavid.com/Publications/EKC.pdf>
31. United Nations. (2015). Paris Agreement - Paris Agreement text English. https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
32. Vella, R. C., Martínez, R, F. J., Yousif, C., & Camilleri, L. (2021). Thermal comfort in places of worship within a Mediterranean climate. *Sustainability*, 13(13), 7233. <https://doi.org/10.3390/su13137233>
33. Ziemblińska, K., Urbaniak, M., Huang, J., Olejnik, J., & Kundzewicz, Z. W. (2025). Decoupling of economic growth and CO2 emissions in 11 European Union Member States in Central and Eastern Europe. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 82, 104482. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104482>

A CLASSIFICATION OF EUROPEAN UNION MEMBER STATES BASED ON CO₂ EMISSION-RELATED INDICATORS

Summary

Rapid economic development is significantly contributing to environmental deterioration, and climate change remains one of the most critical issues in these processes. Despite the efforts of international organizations, governments, businesses, and ordinary citizens, these problems remain unchecked. The main objective of this study is to group European Union (EU) countries by CO₂ (carbon dioxide) emissions and related indicators to identify similar development trends. The study uses a dataset from the 27 European Union member states covering the period from 2000 to 2023. The data was obtained from the Eurostat database and normalized. To achieve the objective, the following tasks were defined: review scientific articles on CO₂ emissions; group the data using statistical software; and describe the characteristics of the groups. The study employs scientific analysis, the k-means method, and economic logic. Selected indicators: CO₂ emissions, expressed in tons per capita; GDP (gross domestic product) per capita; RENC (renewable energy); INTENSITY (energy intensity). This combination of indicators enables systematic grouping and identification of country clusters that demonstrate different models of green transition, based on emission reductions and changes in the energy sector. Following statistical clustering, three groups with similar development trends were identified. These results align with other authors' views on development groups formed based on the relationship between economic development and green indicators. The analysis covered a specific period; therefore, the ceteris paribus assumption may not be fully satisfied, as K-means clustering does not account for the potential impact of other factors not included in the model on the results. Continuous monitoring of countries' development is essential to better reveal the pace of ongoing economic and energy restructuring.

Keywords: carbon dioxide, gross domestic product (GDP), renewable energy, energy intensity, European Union

Informacija apie autores

Dr. Giedrė Lapinskienė. Vilniaus kolegijos Ekonomikos fakulteto mokslų projektų vadovė ir Vilnius Tech Verslo vadybos fakulteto docentė. Mokslinių tyrimų kryptys: darnus ekonominis vystymasis, žalieji finansai. El. pašto adresas: g.lapinskiene@ekf.viko.lt
ORCID: 0000-0003-0179-794X

Inga Pašiušienė. Vilniaus kolegijos Ekonomikos fakulteto lektorė. Mokslinių tyrimų kryptis – taikomoji matematika. El. pašto adresas: i.pasiusiene@ekf.viko.lt
ORCID: 0009-0007-9796-5077

Rita Martišienė. Vilniaus kolegijos Ekonomikos fakulteto lektorė. Mokslinių tyrimų kryptis – taikomoji matematika. El. pašto adresas: r.martisiene@ekf.viko.lt
ORCID: 0009-0003-2767-0629