EKONOMICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
PHF
PODNIKOVOHOSPODÁRSKA FAKULTA V KOŠICIACH

2. ročník VEDECKEJ KONFERENCIE
„AGENDA 2030 a ciele udržateľného rozvoja“

AGENDA 2030

MODELOVANIE VZŤAHU UDRŽATEĽNOSTI V KRAJINÁCH V4
MODELING THE SUSTAINABILITY RELATIONSHIP IN THE V4 COUNTRIES

Lenka KUHNOVÁ – Marián BRONTVAJ

Úvod

Udržateľný rozvoj je v európskom priestore formovaný súbehom environmentálnych záväzkov, sociálnych priorít a tlakov na konkurencieschopnosť ekonomiky. V poslednom desaťročí sa posun od deklarovaným rámcov k merateľným cieľom prehĺbil najmä v oblasti klímy a energetiky: legislatívny balík „Fit for 55“ má smerovať k zníženiu čistých emisií skleníkových plynov minimálne o 55 % do roku 2030. V roku 2025 zároveň pokračuje diskusia o prísnejších cieľoch po roku 2030 vrátane návrhov na výrazné sprísnenie redukcie emisií do roku 2040, čo zvýrazňuje potrebu analyticky podložených rozhodnutí aj v stredoeurópskom regióne.

Krajiny V4 tvoria z hľadiska hospodárskej štruktúry a energetických trajektórií relatívne homogénnu skupinu, avšak s odlišnosťami v zdrojovej základni, priemyselnom profile a rýchlosti dekarbonizácie. Tieto rozdiely sa premietajú do schopnosti napĺňať ciele Agendy 2030, najmä v oblastiach energetickej efektívnosti, znižovania emisií, kvality pracovného trhu a rozvoja sektorov environmentálnej ekonomiky. Preto je relevantné nehodnotiť indikátory izolovane, ale analyzovať ich ako vzájomne previazaný systém.

Cieľom príspevku je kvantifikovať a porovnať význam týchto väzieb pomocou modelov strojového učenia a určiť, ktoré ukazovatele udržateľnosti sú v rámci V4 najlepšie „vysvetliteľné“ ostatnými premennými. Takáto perspektíva je prakticky významná: vysoko predikovateľné indikátory často fungujú ako „uzlové“ veličiny systému, ktoré odrážajú kumulatívne účinky viacerých politík a štrukturálnych charakteristík.

Zelená transformácia a trh práce v environmentálnej ekonomike

Zelená transformácia predstavuje štrukturálnu zmenu ekonomiky smerom k nízkouhlíkovým technológiám, efektívnejšiemu využívaniu zdrojov a obmedzeniu environmentálnych externalít, pričom jej pracovno-trhové dôsledky sa neprejavujú iba tvorbou nových pracovných miest, ale aj zánikom pozícií v uhlíkovo intenzívnych odvetviach a preskupovaním kvalifikačných požiadaviek. V teoretickej rovine sa preto trh práce v procese zelenej transformácie analyzuje cez tri prepojené mechanizmy: substitúciu pracovných miest v zasiahnutých sektoroch, vznik nových činností v zelených hodnotových reťazcoch a zmenu obsahu práce v existujúcich profesiách. Medzinárodná organizácia práce chápe „green jobs“ ako dôstojné pracovné miesta, ktoré prispievajú k zachovaniu alebo obnove životného prostredia, pričom môžu vzniknúť v tradičných odvetviach (napr. stavebníctvo, priemysel) aj v nových segmentoch (napr. obnoviteľná energia, energetická efektívnosť) (International Labour Organization, 2025) Táto definícia je dôležitá, lebo zdôrazňuje, že zelené pracovné miesta nemožno zúžiť iba na úzky technologický sektor, ale ide o širšiu transformáciu výrobných procesov, služieb a pracovných štandardov.

Empirické uchopenie environmentálnej ekonomiky v EÚ umožňuje rámec environmentálneho sektora tovarov a služieb (EGSS), ktorý štatisticky zachytáva produkciu, pridanú hodnotu aj zamestnanosť viazanú na ochranu životného prostredia a manažment prírodných zdrojov (EK, 2025). EGSS tak poskytuje merateľný most medzi environmentálnymi cieľmi a pracovno-trhovými výsledkami, pretože umožňuje sledovať, či sa zelená transformácia premieta do rastu pracovných príležitostí a v akých segmentoch. Podľa Európskej environmentálnej agentúry zamestnával EGSS do roku 2022 približne 6,67 milióna osôb v prepočte na plné úväzky, čo predstavovalo asi 3,1 % celkovej zamestnanosti EÚ, pričom významnú časť rastu tvorili pracovné miesta súvisiace s riadením energetických zdrojov, ako je výroba obnoviteľnej energie a výroba technológií pre OZE (Európska environmentálna agentúra, 2025). Podporuje to interpretáciu, že energetická transformácia je kľúčovým „nosičom“ zelenej zamestnanosti, keďže generuje dopyt po nových kapacitách v investíciách, výstavbe, výrobe zariadení aj prevádzke.

Zelená transformácia však prináša aj nerovnomerné dopady medzi regiónmi a skupinami pracovníkov, čo



vytvára potrebu konceptu spravodlivej transformácie. Európska komisia v tejto súvislosti rámcuje „Just Transition Mechanism“ ako nástroj na podporu najviac zasiahnutých regiónov a pracovníkov, aby sa prechod ku klimaticky neutrálnej ekonomike uskutočnil férovo a bez prehĺbenia sociálnych nerovností (EK, 2024). Pre krajiny V4 má táto agenda osobitnú relevanciu vzhľadom na priemyselný profil a historickú závislosť niektorých regiónov od uhlíkovo intenzívnej výroby, kde môže byť náklad prispôsobenia vyšší a zároveň koncentrovanejší. Z pohľadu ekonomickej teórie trhu práce sa kľúčovou otázkou stáva prenos pracovníkov medzi sektormi, pri ktorom rozhoduje rýchlosť tvorby nových pracovných miest, priestorová mobilita, dostupnosť rekvalifikácie a schopnosť firiem absorbovať nové „zelené“ kompetencie. OECD v aktuálnych analýzach zdôrazňuje, že úspešná zelená transformácia si vyžaduje prepojenie klimatických cieľov s politikami zamestnanosti a rozvoja zručností, vrátane mechanizmov, ktoré umožňujú firmám aj pracovníkom anticipovať budúce potreby a prispôsobiť sa im (OECD, 2025). Teoreticky to znamená, že zelená ekonomika nie je automatickým zdrojom „čistého“ rastu zamestnanosti, ale skôr procesom reštrukturalizácie, v ktorom výsledok závisí od kvality inštitúcií, dizajnu politík a implementačnej kapacity na úrovni štátu aj regiónov.

V kontexte environmentálnej ekonomiky preto ukazovatele typu zamestnanosti v EGSS nie sú len opisným štatistickým údajom, ale slúžia ako indikátor transformačnej schopnosti hospodárstva premieňať environmentálne ciele na reálne ekonomické aktivity. Súčasne platí, že dynamika zelenej zamestnanosti býva citlivá na investičné cykly, verejné stimuly a technologické inovácie, čo vysvetľuje, prečo v empirických modeloch často vykazuje vyššiu heterogenitu a nelineárny charakter v porovnaní s energetickými a emisnými indikátormi. Z teoretického hľadiska je preto vhodné vnímať zelenú transformáciu a trh práce ako ko-evolučný systém: klimatická politika mení štruktúru dopytu po práci, trh práce spätne podmieňuje tempo transformácie cez dostupnosť kvalifikácií a regióny s vyššou adaptačnou kapacitou dokážu rýchlejšie internalizovať nové príležitosti.

Metodika

Metodika výskumu bola navrhnutá tak, aby umožnila kvantifikovať vzťahy medzi indikátormi udržateľnosti v krajinách V4 prostredníctvom prediktívneho modelovania a zároveň identifikovať premenné, ktoré sú v rámci systému udržateľnosti najtesnejšie previazané s inými ukazovateľmi. V prvom kroku bol zostavený spoločný dátový súbor pre Slovensko, Česko, Poľsko a Maďarsko, ktorý obsahoval vybrané environmentálne, energetické a sociálno-ekonomické indikátory v jednotnej časovej štruktúre, aby bolo možné porovnávať krajiny na rovnakej báze a eliminovať skreslenie spôsobené rozdielnymi rozsahmi pozorovaní. Následne sa pre každý sledovaný ukazovateľ vytvorila modelová úloha, v ktorej daný indikátor vystupoval ako cieľová premenná a ostatné indikátory tvorili súbor vysvetľujúcich premenných, čím sa operacionalizoval koncept „predikovateľnosti“ ako miery, do akej je možné hodnoty konkrétnej premennej rekonštruovať z informácie obsiahnutej v ostatných ukazovateľoch.

Na riešenie týchto úloh bolo aplikované porovnanie viacerých algoritmov strojového učenia reprezentujúcich odlišné triedy modelov, konkrétne lineárnu regresiu a jej regularizované varianty (Ridge, Lasso) a nelineárne prístupy (Random Forest, Gradient Boosting), aby bolo možné zachytiť lineárne štrukturálne väzby medzi makroindikátormi, ako aj nelinearity a interakcie typické pre energeticko-emisné mechanizmy a štrukturálne zmeny trhu práce.

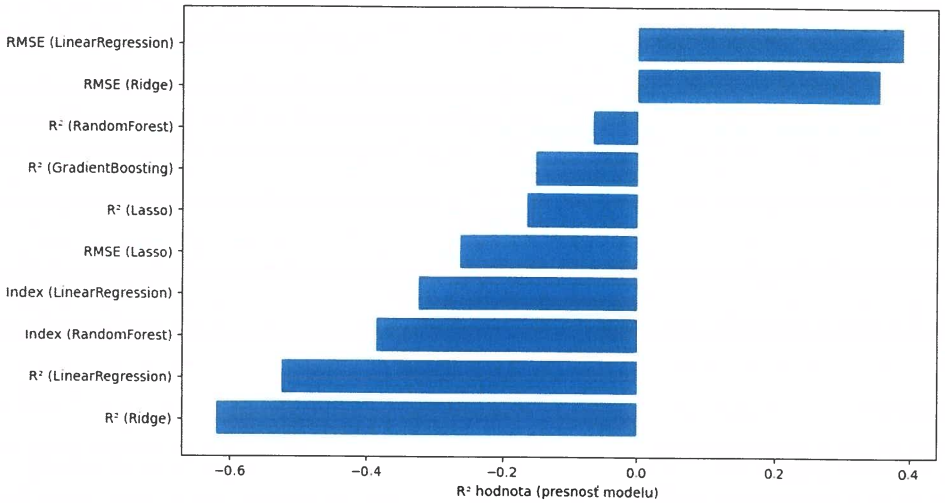
Po vyhodnotení modelov sa metodika sústredila na interpretáciu najlepšie predikovateľných ukazovateľov, ktoré boli zoradené podľa priemernej výkonnosti a zhrnuté do Tab. č. 1. V nadväznosti na identifikáciu emisií ako jedného z najlepšie predikovateľných ukazovateľov bola realizovaná predikčná časť zameraná na projekciu vývoja „domestic net greenhouse gas emissions“ v horizonte rokov 2022 až 2030. V rámci tohto kroku boli využité pozorované hodnoty za roky 2020-2024 ako základ pre modelové učenie a od roku 2025 boli generované predikované trajektórie pre jednotlivé krajiny V4, pričom výstupy boli doplnené o 95 % interval spoľahlivosti, aby sa kvantifikovala neistota rastúca s dĺžkou predikčného horizontu.

Výsledky

Vyhodnotenie výkonnosti algoritmov poskytuje prvú odpoveď na otázku, aký typ väzieb medzi indikátormi v prostredí V4 prevláda. Ak dosahujú najlepšie výsledky boosting metódy, ide spravidla o signál, že systém udržateľnosti vykazuje nelinearity a interakcie (napr. energetická spotreba vplýva na emisie odlišne podľa



zdrojového mixu a priemyselnej štruktúry). Ak sa medzi top riešeniami objavujú regularizované regresie, naznačuje to prítomnosť silnej spoločnej informácie medzi premennými, no zároveň aj multikolinearitu typickú pre makroindikátory.



Obr. č. 1 Top 10 modelov podľa presnosti
Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Eurostat (2025a,b,c,d)

Na základe Obr. č. 1 je možné zdôrazniť, že medzi najpresnejšími prístupmi dominujú metódy vhodné na prácu s komplexnými dátami (najmä boostingové a regularizované postupy), čo podporuje interpretáciu udržateľnosti ako viacrozmerného systému s previazanými (a často nelineárnymi) mechanizmami. Z aplikačného hľadiska to znamená, že pri tvorbe politík nestačí sledovať izolované ukazovatele: zásahy do energetiky (efektívnosť, mix zdrojov) sa premietajú do emisných trajektórií a následne môžu vplývať na investície a štruktúru zamestnanosti.

Po identifikácii najvýkonnejších modelov nasleduje analýza ukazovateľov, ktoré dosahujú najvyššie R^2, teda sú najlepšie „vysvetliteľné“ ostatnými premennými.

Tab. č. 1 TOP 10 ukazovateľov podľa priemernej výkonnosti

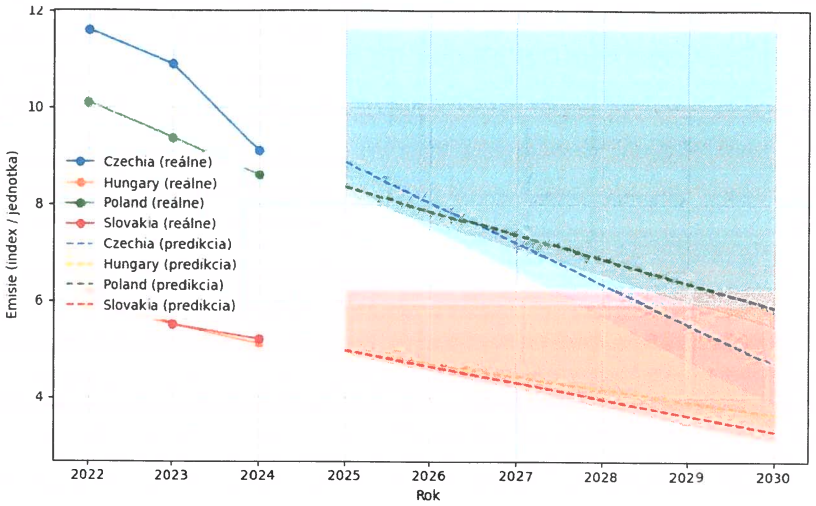
	Ukazovateľ	Najlepší model	Najlepšie R^2
1	Primary energy consumption	Gradient Boosting	0.948
2	Domestic net greenhouse gas emissions	Ridge	0.977
3	Gender employment gap	Linear Regression	0.924
4	Employment in the environmental goods and services sector	Random Forest	0.920

Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Eurostat (2025a,b,c,d)

Tab. č. 1 sumarizuje ukazovatele, ktoré sa v rámci porovnávania modelov ukázali ako najlepšie vysvetliteľné ostatnými premennými, pričom zároveň naznačuje, aký typ vzťahov v dátach prevažuje. Pri spotrebe primárnej energie dosiahol najvyššiu výkonnosť Gradient Boosting (R^2 = 0,948), čo poukazuje na to, že energetická náročnosť ekonomiky V4 vzniká ako výsledok viacerých súbežných faktorov s nelineárnymi interakciami. Ešte vyššiu hodnotu R^2 vykázali čisté domáce emisie skleníkových plynov pri Ridge regresii (R^2 = 0,977), čím sa potvrdzuje, že emisná bilancia je veľmi silne systémovo previazaná s ostatnými indikátormi a zároveň ju možno s vysokou presnosťou opísať stabilným regularizovaným lineárnym jadrom. Rodový rozdiel v zamestnanosti bol najlepšie zachytený lineárnou regresiou (R^2 = 0,924), čo signalizuje relatívne priamu a štrukturálne zakotvenú väzbu na širšie socioekonomické charakteristiky, zatiaľ čo zamestnanosť v sektore environmentálnych tovarov a služieb dosiahla najlepší výsledok pri Random Forest (R^2 = 0,920) a bola zaradená do strednej predikovateľnosti, čo je konzistentné s heterogénnym a politicky podmieneným charakterom rozvoja „zelenej“ ekonomiky v

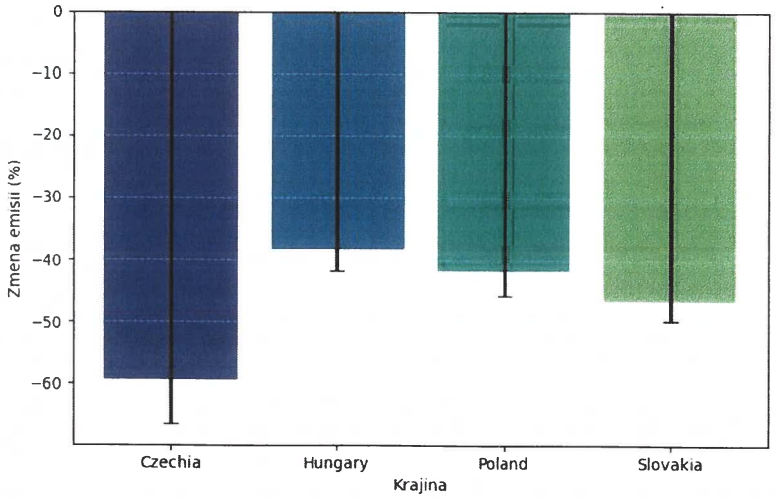


jednotlivých krajinách.



Obr. č. 2 Predikcia Domestic net greenhouse gas emissions (2022-2030)
Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Eurostat (2025a)

Obr. č. 2 znázorňuje vývoj a predikciu ukazovateľa Domestic net greenhouse gas emissions v období 2022 až 2030 so zohľadnením 95 % intervalu spoľahlivosti, pričom v rokoch 2022-2024 sú zobrazené reálne hodnoty a od roku 2025 predikované trajektórie. Z obrázka vyplýva, že všetky krajiny V4 smerujú v projekcii k poklesu čistých emisií do roku 2030, avšak s odlišnou východiskovou úrovňou a dynamikou. Česko a Maďarsko vstupujú do predikčného obdobia s vyššími hodnotami, ktoré následne klesajú, zatiaľ čo Poľsko a Slovensko sa pohybujú na nižšej úrovni už v pozorovanom období a predikcie naznačujú pokračovanie redukcie smerom k hodnotám približne okolo 3-4 do roku 2030. Súčasne je zrejmé, že intervaly spoľahlivosti sa s rastúcim horizontom rozširujú, čo je typické pre viacročné predikcie a zároveň to interpretuje neistotu spojenú s budúcim nastavením politiky, investičnými cyklami a tempom dekarbonizácie v jednotlivých ekonomikách.



Obr. č. 3 Predikcia ukazovateľa Domestic net greenhouse gas emissions (2022-2030)
Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Eurostat (2025a)

Obr. č. 3 nadväzuje na predikčný výstup a umožňuje detailnejšie porovnanie krajín a neistoty projekcií v horizonte do



roku 2030, pričom posilňuje hlavný interpretačný záver, že celkový trend je v rámci V4 konzistentne klesajúci, ale rozsah možných budúcich hodnôt sa medzi krajinami líši. V analytickom význame to podporuje tvrdenie, že emisie fungujú ako agregovaný výsledok energetických a hospodárskych zmien, avšak ich budúci vývoj je citlivý na implementačnú kapacitu, rýchlosť technologickej modernizácie a štruktúru energetického mixu, čo sa v predikciách premieta do rozdielnej šírky intervalov spoľahlivosti a odlišných sklonov trajektórií.

Záver

Záverom možno konštatovať, že aplikácia modelov strojového učenia umožnila uchopiť udržateľnosť v krajinách V4 ako vzájomne previazaný systém, v ktorom sa environmentálne, energetické a sociálne dimenzie nevyvíjajú oddelene, ale vytvárajú spoločnú štruktúru s merateľnými väzbami. Výsledky ukázali, že najvyššiu „systémovú čitateľnosť“ vykazujú čisté domáce emisie skleníkových plynov a spotreba primárnej energie, čím sa potvrdzuje, že energeticko-emisná os zostáva v regióne rozhodujúcim jadrom udržateľnostného profilu a zároveň najcitlivejším priestorom pre dosahovanie cieľov do roku 2030. Vysoká predikovateľnosť rodových rozdielov v zamestnanosti zároveň zdôrazňuje, že sociálna inklúzia je štrukturálne previazaná s ekonomickými charakteristikami krajín a nemožno ju odsúvať na okraj klimatickej politiky, pretože jej vývoj ovplyvňuje adaptačnú kapacitu trhu práce počas transformácie. V prípade zamestnanosti v sektore environmentálnych tovarov a služieb sa potvrdila vyššia heterogenita, čo naznačuje, že zelená ekonomika v V4 nie je len automatickým dôsledkom makrotrendov, ale do veľkej miery výsledkom kvality implementácie politík, investičných stimulov a regionálnych podmienok. Predikcie emisií do roku 2030 naznačujú spoločný smer poklesu vo všetkých štátoch V4, avšak zároveň poukazujú na rastúcu neistotu s dĺžkou horizontu, čo je dôležité pre interpretáciu plánov a záväzkov v prostredí meniacej sa regulácie a technologického vývoja. Z metodologického hľadiska tento fakt podporuje potrebu pracovať nielen s bodovými odhadmi, ale aj s intervalmi spoľahlivosti a pravidelne aktualizovať modely o nové pozorovania, aby sa minimalizovalo riziko nesprávnych záverov pri strategickom riadení. V nadväznosti na úvodné východiská o sprísňovaní cieľov po roku 2030 je kľúčové, že samotné znižovanie emisií nebude v praxi postačovať, ak nebude sprevádzané zvýšením energetickej efektívnosti a rozvojom zručností, ktoré umožnia presun pracovnej sily do rastúcich segmentov environmentálnej ekonomiky. Práve tu sa otvára nový súvisiaci rozmer, ktorý dopĺňa prezentované zistenia: okrem monitorovania indikátorov je potrebné hodnotiť aj „pripravenosť na transformáciu“, teda dostupnosť kvalifikácií, rekvalifikačných kapacít a regionálnu absorpčnú schopnosť investícií, pretože tieto faktory určujú, či sa zelená transformácia prejaví ako rast produktivity a zamestnanosti alebo ako zdroj sociálneho napätia. Z pohľadu tvorby politík výsledky naznačujú, že najvyšší prínos prinesú integrované opatrenia cieliace súčasne na energetickú náročnosť, emisnú intenzitu a sociálnu inklúziu, keďže práve tieto premenné vytvárajú v systéme udržateľnosti V4 najtesnejšie prepojenia. Pre ďalší výskum je vhodné rozšíriť modelovanie o scenárové prístupy, ktoré budú explicitne pracovať s alternatívnymi trajektóriami energetického mixu, cien energií, investícií a regulácie, aby sa predikcie neviazali iba na extrapoláciu minulosti, ale zachytili aj možné štrukturálne zlomy. Rovnako prínosné bude doplnenie dynamických modelov o priestorový rozmer na úrovni regiónov, keďže dopady spravodlivej transformácie sa neprejavujú rovnomerne a práve regionálne rozdiely môžu rozhodovať o úspešnosti napĺňania cieľov Agendy 2030 v podmienkach strednej Európy. V konečnom dôsledku príspevok potvrdzuje, že dátovo orientované prístupy môžu posilniť kvalitu rozhodovania tým, že identifikujú kľúčové uzly systému udržateľnosti a umožnia adresnejšie zamerať verejné intervencie tam, kde je ich multiplikačný efekt najvyšší.

Prípadná príslušnosť k projektu

Tento príspevok je súčasťou projektu VEGA č. 1/0733/25 „ESG reporting a skúmanie vplyvu dosahovania ESG kritérií na finančnú výkonnosť podnikov v podmienkach SR“ a projektu VEGA č. 1/0713/24 „Digitálna ekonomika ako kľúčová výzva pre transformáciu podnikov na Slovensku“.

Použitá literatúra



1. EK. (2024). *Employment in the environmental goods and services sector in Europe.* Brussels: European Commission. [online]. [11.12.2025]. Dostupné na internete:<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/employment-in-the-environmental-goods?utm>.
2. EK. (2025). *Environmental goods and services sector.* Brussels: European Commission. [online]. [09.12.2025]. Dostupné na internete:<https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/env_egs_esms.htm?utm>.
3. EURÓPSKA ENVIRONMENTÁLNA AGENTÚRA. (2025). *Employment in the environmental goods.* [online]. [10.12.2025]. Dostupné na internete:<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/employment-in-the-environmental-goods?utm>.
4. EUROSTAT. (2025a). *Domestic net greenhouse gas emissions.* [online]. [11.12.2025]. Dostupné na internete:<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_13_10/default/table?lang=en>.
5. EUROSTAT. (2025b). *Employment in the environmental goods and services sector.* [online]. [11.12.2025]. Dostupné na internete:<https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/env_egs_esms.htm?utm>.
6. EUROSTAT. (2025c). *Gender employment gap, by type of employment.* [online]. [11.12.2025]. Dostupné na internete:< https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_05_30/default/table?lang=en>.
7. EUROSTAT. (2025d). *Primary energy consumption.* [online]. [11.12.2025]. Dostupné na internete:< https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_07_10/default/table?lang=en>.
8. INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. (2025). *Sustainable economies and societies.* [online]. [03.12.2025]. Dostupné na internete:<https://www.ilo.org/topics-and-sectors/just-transition-towards-environmentally-sustainable-economies-and-societies/what-green-job?utm>.
9. OECD. (2025). *Employment and Skills Policies for the Green Transition.* [online]. [03.12.2025]. Dostupné na internete:<https://www.oecd.org/en/publications/employment-and-skills-policies-for-the-green-transition_f0c558fa-en.html?utm>.

Abstrakt

Príspevok sa zameriava na dátovo orientované modelovanie prepojení medzi indikátormi udržateľnosti v krajinách Vyšehradskej skupiny (V4) v kontexte implementácie Agendy 2030 a klimaticko-energetických politík Európskej únie. Východiskom je predpoklad, že environmentálne a sociálno-ekonomické dimenzie udržateľnosti v krajinách s príbuznou historickou trajektóriou (Slovensko, Česko, Poľsko, Maďarsko) vykazujú merateľné väzby, ktoré možno zachytiť prostredníctvom metód strojového učenia. Cieľom je identifikovať ukazovatele s najvyššou „predikovateľnosťou“, t. j. také premenné, ktorých hodnoty sú najlepšie vysvetliteľné informáciou obsiahnutou v ostatných dostupných indikátoroch. Na tento účel boli porovnané viaceré algoritmy a ich výkonnosť bola hodnotená koeficientom determinácie R^2. Zistenia naznačujú, že energetická náročnosť a emisie skleníkových plynov predstavujú v rámci V4 ukazovatele s mimoriadne silnou väzbou na zvyšok systému udržateľnosti, pričom významná je aj sociálna dimenzia reprezentovaná v zamestnanosti. Výsledky podporujú argument, že presnejšie riadenie transformácie vyžaduje integrované analytické rámce spájajúce energetiku, emisie, trh práce a rozvoj „zelenej“ ekonomiky.

Kľúčové slová

udržateľnosť, krajiny V4, Agenda 2030, strojové učenie, predikcia, energetická náročnosť, emisie

Adresy autorov

doc. Ing. Lenka Kuhnová, PhD., MBA
Ekonomická univerzita v Bratislave
Podnikovohospodárska fakulta so sídlom v Košiciach
Katedra ekonómie a manažmentu
Tajovského 13, 041 30 Košice
e-mail: lenka.kuhnova@euba.sk

Ing. Marián Brontvaj



Ekonomická univerzita v Bratislave
Podnikovohospodárska fakulta so sídlom v Košiciach
Katedra kvantitatívnych metód
Tajovského 13, 041 30 Košice
e-mail: marian.brontvaj@euba.sk

