

Fosszilis energia és gazdasági növekedés a szénelapú gazdaságokban: empirikus modellezés és fenntarthatósági kihívások

KÁLMÁN BOTOND GÉZA

a Neumann János Egyetem Gazdaságtudományi Karának adjunktusa, a Széchenyi István Egyetem megbízott kutatója, a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Egyetem megbízott kutatója, a Budapesti Metropolitan Egyetem Gazdasági és Pénzügyi Intézet Üzleti, Kommunikációs és Turisztikai Karának óraadója, kalman.botond.geza@nje.hu

MÓDOSNÉ SZALAI SZILVIA VALÉRIA

adjunktus, Széchenyi István Egyetem, Kautz Gyula Gazdaságtudományi Kar, modosne.szalai.szilvia.valeria@sze.hu

SÁRKÖZY HELGA

PhD-jelölt, Neumann János Egyetem Gazdaságtudományi Kar, cf141h@hallgato.nje.hu

A tanulmány a fosszilis energiafogyasztás és a gazdasági növekedés közötti kapcsolatot vizsgálja a szénelapú gazdaságokban, különös tekintettel az energaintenzitásra és az energiahatékonyság szerepére. Célunk, hogy modellalapú elemzéssel számszerűsítsük a fosszilis energiafogyasztás gazdasági növekedésre gyakorolt hatását, és azonosítsuk az energaintenzív gazdaságok fejlődési és fenntarthatósági kihívásait. A kutatásban Random Forest-modellt alkalmazunk a fosszilis energiafogyasztás és a GDP-növekedés közötti kapcsolat elemzésére. Az adatok a Világbank World Development Indicators adatbázisából származnak, 2013–2023 közötti időszakra vonatkozóan, különböző országok gazdasági szerkezetének figyelembevételével. Az energaintenzitás erős pozitív korrelációt mutatott a GDP növekedésével Kínában, Oroszországban és Mongóliában, míg fejlettebb gazdaságokban, például Kanadában és az Egyesült Államokban, gyengébb pozitív vagy negatív kapcsolat figyelhető meg. A fosszilis energaintenzív gazdaságok rövid távon előnyöket élveznek, de hosszú távon a fenntarthatóság érdekében diverzifikáció szükséges. A gazdaság diverzifikációja és az energiahatékonysághoz kapcsolódó tényezők kiemelt szerepet játszanak a fenntartható fejlődés statisztikai előrejelzésében. Az eredmények segíthetik a szakpolitikai döntéshozókat az energiaátmenet tervezésében, különösen tekintettel a fosszilis energiafüggőség csökkentésére és a megújuló energiaforrások integrációjára a gazdasági és környezeti stabilitással összhangban.

Kulcsszavak: fosszilis energia, gazdasági növekedés, energaintenzitás, energiahatékonyság, fenntarthatóság

JEL kódok: O13, Q43, Q56, C53, O44

1. Bevezetés

A fosszilis energiahordozók, mint a kőolaj, a földgáz és a szén, hosszú ideje kulcsszerepet játszanak a modern gazdaságok fejlődésében. Az ipari forradalom óta ezek az energiahordozók biztosítják az ipar, a közlekedés és a háztartások energiaellátásának túlnyomó részét, ezáltal meghatározva a gazdasági növekedés ütemét és szerkezetét. Bár az utóbbi évtizedekben a megújuló energiaforrások egyre nagyobb figyelmet kapnak, a fosszilis energia továbbra is domináns szerepet tölt be a legtöbb szénalapú gazdaság energiafelhasználásában. Ezen országokban a gazdasági tevékenységek nagymértékben függenek a fosszilis energiahordozók rendelkezésre állásától és költséghatékonyságától, ami szorosan összekapcsolja az energiafogyasztást a gazdasági növekedés dinamikájával.

A fosszilis energiafogyasztás gazdasági hatásainak vizsgálata különösen időszerű és jelentős az éghajlatváltozással és a fenntarthatósági kérdésekkel kapcsolatos globális kihívások miatt. Az energaintenzív szénalapú gazdaságok jövőbeli fejlődése nagymértékben attól függ, hogy miként képesek egyensúlyt teremteni az energiafelhasználás és a gazdasági növekedés fenntartása között, miközben figyelembe veszik a környezeti terhelés csökkentésének szükségességét. Ezért a fosszilis energiafogyasztás és a gazdasági növekedés kapcsolatának alapos vizsgálata nemcsak elméleti, hanem gyakorlati szempontból is alapvető fontosságú.

A tanulmány célja, hogy modellalapú megközelítéssel elemezze a fosszilis energiahordozók fogyasztásának és a gazdasági növekedésnek az összefüggéseit szénalapú gazdaságok esetében. A következő kutatási kérdésre keressük a választ: hogyan befolyásolja a fosszilis energiafelhasználás a GDP növekedését a szénalapú gazdaságokban, és milyen szerepet játszik ebben az energaintenzitás és az energiahatékonyság? Ezt egy kiterjesztett Solow-modell segítségével elemeztük globálisan, majd egy Random Forest-modell alkalmazásával hasonlítottuk össze a különböző típusú gazdaságokat. Az elemzéshez a Világbank World Development Indicators adatbázisának átfogó adatkészlete szolgál alapul, amely megbízható és széleskörű információkat nyújt az érintett gazdaságok gazdasági és energiafogyasztási mutatóiról.

E tanulmány remélhetőleg hozzájárul a fosszilis energiafogyasztás és a gazdasági növekedés közötti kapcsolat jobb megértéséhez, és egyben megvilágítja azokat a tényezőket, amelyekkel statisztikai kapcsolatban állhat a szénalapú gazdaságok energiaátmenetének sikere.

2. Szakirodalmi áttekintés

A fosszilis energiahordozók kulcsszerepet játszanak a gazdasági fejlődésben, mivel az ipari termelés, a közlekedéssel összefüggő és a háztartási energiafelhasználás

nagy mértékben támaszkodik rájuk. Az energiafogyasztás és a gazdasági növekedés közötti kapcsolatot számos elméleti és empirikus vizsgálat tárgyalta. Stern (2004) kiemeli, hogy az energia az egyik legfontosabb termelési tényező, amely közvetlenül befolyásolja a gazdasági teljesítményt. Az energiafogyasztás növekedése általában pozitívan hat a GDP növekedésére, mivel ez az ipari termelés és a szolgáltatások bővülését segíti elő.

Ugyanakkor a kapcsolatra vonatkozó kutatások eltérő eredményeket mutatnak, különösen regionális és gazdasági fejlettségi szintek szerint. Egyes tanulmányok, például Omri (2013), rámutattak, hogy a Közel-Kelet és Észak-Afrika (MENA) országainak energiaiintenzív gazdasági modelljei különösen erős összefüggést mutatnak a fosszilis energiafogyasztás és a gazdasági növekedés között. Más kutatások azonban arra figyelmeztetnek, hogy a gazdasági fejlődés nem minden esetben függ szorosan az energiafelhasználástól, különösen a magasabb fejlettségi szinteken, ahol az energiahatékonyság és a technológiai innováció csökkenti a fosszilis energiahordozók relatív szerepét (Apergis & Payne, 2009).

2.1. Energiaintenzitás és gazdasági szerkezet

Az energiaiintenzitás az energiafelhasználás és a gazdasági teljesítmény arányát jelzi, amely jelentős eltéréseket mutat az országok gazdasági szerkezetétől függően. Sadorsky (2010) megállapította, hogy a gazdaságok iparosodási szakaszai általában magas energiaiintenzitással járnak, mivel az ipari szektor dominanciája nagyobb energiafogyasztást eredményez. Ezzel szemben a szolgáltatásalapú gazdaságok energiafelhasználása alacsonyabb, mivel a szolgáltatási ágazatok jellemzően kevésbé energiaigényesek.

A gazdasági szerkezet változásai, például a mezőgazdasági és ipari ágazatok visszaszorulása a szolgáltatások javára, szintén befolyásolják az energiafelhasználás mintázatait. Stern (2004) elemzése szerint a gazdasági diverzifikáció és az energiahatékonysági technológiák bevezetése jelentősen csökkentheti az energiaiintenzitást, miközben támogatja a fenntartható gazdasági növekedést.

A fosszilis energiafogyasztás ökológiai és gazdasági fenntarthatóságra gyakorolt hatásai egyre nagyobb aggodalmat keltenek a klímaváltozás és a természeti erőforrások kimerülése kapcsán. Az éghajlatváltozás egyik legfőbb okai a fosszilis tüzelőanyagok elégetése során kibocsátott üvegházhatású gázok. Az IPCC (2021) jelentése szerint a globális szén-dioxid-kibocsátásnak több mint 75%-a fosszilis energiahordozók elégetéséből származik, amely hozzájárul az extrém időjárási események és a tengerszint-emelkedés fokozódásához.

A fenntarthatósági célok elérése érdekében elengedhetetlen a fosszilis energiafelhasználás csökkentése és a megújuló energiaforrásokra való átállás. Az IEA (2020) szerint a kormányzati politikák, például a szén-dioxid-árzás és a megújuló

energiaforrásokat ösztönző támogatások kulcsfontosságúak lehetnek az energiaátmenet felgyorsításában. Mindazonáltal a fejlődő országok, amelyek gazdasági növekedésüket olcsó energiaforrásokra alapozzák, különösen nehéz helyzetben vannak, mivel az átmenet gazdasági és társadalmi költségei számukra jelentősebbek.

A gazdasági növekedésméletek egyik klasszikus formája a Solow–Swan-modell (Solow, 1956; Swan, 1956), ami exogén tényezőként kezeli a technológiai fejlődést. A neoklasszikus keretbe illeszkedve magyarázza a kibocsátást a tőke, a munkaerő és a technológia kombinációjával, miközben a termelési függvény legtöbbször Cobb–Douglas-formában jelenik meg. Az modell legnagyobb erőssége, hogy bemutatja a tőkefelhalmozás, a népességnövekedés és a technológiai haladás szerepét a hosszú távú egyensúlyi növekedésben (Solow, 1956). Ugyanakkor az egyik fő kritika a modellel szemben az, hogy nem képes belső magyarázatot adni a technológiai haladásra, hanem kívülről, „fekete dobozként” kezeli azt (Romer, 1986). A Solow-modell gyakorlati jelentőségét erősítette, hogy Mankiw, Romer és Weil (1992) empirikusan is tesztelte, és kiegészítette a humántőke-tényezővel. Ezt nevezzük kiterjesztett Solow-modellnek. Ebben a kiterjesztett formában a humántőke önállóan jelenik meg a termelési függvényben, így alkalmasabbá válik a különböző országok közötti növekedési eltérések magyarázatára (Mankiw et al., 1992).

Az endogén növekedési elméletek az 1980-as évek közepén jelentek meg, amikor például Romer (1986) és Lucas (1988) kifejtette és bemutatta, hogy a technológiai haladás nem külső adottság, hanem a gazdaság belső folyamataiból ered. Romer (1986) modelljében a technológiai tudás felhalmozásával és a kutatás-fejlesztési tevékenységgel endogén módon magyarázta a hosszú távú növekedést. A modell hangsúlyozza a pozitív externáliákat és a neoklasszikus feltételezésekkel szemben növekvő hozadékokat alkalmaz. Lucas (1988) szintén a humántőke felhalmozását helyezte az endogén növekedés középpontjába, az oktatás és a képzettség termelékenységére és a hosszú távú növekedésre kifejtett hatásaira fókuszálva. Az endogén növekedési modellek (Romer, 1990; Aghion & Howitt, 1992) különösen fontos szerepet tulajdonítanak az innovációnak, a tudás terjedésének és a vállalati kutatás-fejlesztésnek. Ezek a modellek jól magyarázzák, hogy miért képesek egyes gazdaságok tartósan magas növekedési ütemet fenntartani a csökkenő hozadékok korlátjának elérése nélkül (Grossman & Helpman, 1991).

Empirikusan az endogén növekedési modellek alkalmazása sok esetben kiegészíti a Solow-keretet. Például Barro és Sala-i-Martin (1995) átfogóan mutatják be, hogyan vizsgálható a konvergencia és a humántőke szerepe a gyakorlatban. A különféle panel-ökonometria megközelítések lehetővé teszik a növekedési tényezők, mint a tőkeakkumuláció, a munkaerő, a humántőke és a technológiai haladás együttes elemzését (Islam, 1995). Az elmúlt években a kutatók egyre gyakrabban vizsgálják a fenntarthatósági és környezeti tényezőket is, például az

energiahatékonyság vagy az energia-mix szerepét az endogén növekedés összefüggésrendszerében (Sadorsky, 2012; Apergis & Payne, 2010).

Az endogén növekedési modellek központi eleme a technológiai fejlődés és az energiafelhasználás kapcsolata. Romer (1990) és Lucas (1988) elméletei szerint a technológiai innováció és az energiafelhasználás együttesen növeli a termelékenységet, amely a gazdasági növekedés motorjaként működik. Az energiaforrások elérhetősége tehát közvetlenül befolyásolja a gazdasági növekedés ütemét. Egy másik fontos tényező az energiahatékonyság növekedése, amely lehetővé teszi, hogy a gazdaságok kevesebb energiát használjanak ugyanazon termelési szint eléréséhez. Azonban a Jevons-paradoxon szerint az energiahatékonysági fejlesztések nem mindig vezetnek az energiafogyasztás csökkenéséhez, mivel az energiahatékony technológiák használata növelheti az energia iránti keresletet (Alcott, 2005).

A környezeti Kuznets-görbe (EKC) hipotézise szerint a gazdasági fejlődés korai szakaszában a környezeti terhelés nő, majd egy bizonyos fejlettségi szint elérése után csökkenni kezd, mivel a fejlett országok fenntarthatóbb technológiákra váltanak. Grossman és Krueger (1995) szerint az EKC érvényessége elsősorban a fejlett országokra vonatkozik, ahol a környezetvédelmi szabályozások és a technológiai innovációk lehetővé teszik a környezeti hatások mérséklését.

A fosszilis energiafogyasztás szempontjából az EKC azt sugallja, hogy a gazdaságok, miután elérnek egy bizonyos szintű fejlettséget, képesek lehetnek csökkenteni fosszilis energiafelhasználásukat a megújuló energiaforrásokra való áttérés révén (Shafik, 1994). Ez azonban nem minden országban valósítható meg, különösen a fejlődő gazdaságokban, amelyek továbbra is energaintenzív iparágakra támaszkodnak.

Friss empirikus eredmények alapján Perera (2024) Granger-kauszalitási vizsgálatai egyértelmű statisztikai kapcsolatokra utalnak a nem-megújuló energiafogyasztás és a gazdasági növekedés között. Emellett Zhang (2024b) kutatása feltárja, hogy a fosszilis energiafogyasztás komoly kihívást jelent a zöld gazdasági átmenetben, ugyanakkor a körkörös gazdaság innovációi képesek enyhíteni ezt a terhelést.

A szénalapú gazdaságok, amelyek jelentős mértékben függenek a fosszilis energiahordozóktól, különleges kihívásokkal néznek szembe. Hamilton (2009) szerint ezek a gazdaságok fokozottan ki vannak téve az energiaárak ingadozásának, ami destabilizálhatja a gazdasági növekedést. Emellett a fosszilis energiaforrások kimerülése hosszú távú fenntarthatósági problémákat vet fel. Tehát az energiához történő hozzáférés is kulcsfontosságú (Zhang, 2024a)

Az energiaátmenet megkönnyítése érdekében az ilyen gazdaságoknak diverszifikálniuk kell energiaforrásaikat, és befektetniük a megújuló technológiákba. A fosszilis energiafüggőség csökkentése nemcsak gazdasági, hanem geopolitikai előnyökkel is járhat, mivel csökkenti az energiaimporttól való függőséget és növeli az energiafüggetlenséget.

3. Módszertan

A fosszilis energiafogyasztás és a gazdasági növekedés kapcsolatának vizsgálatára statisztikai és gazdasági modelleket alkalmaztunk, melyek alapján két modellt készítettünk. Az energiafelhasználás és az energiamix hatását a GDP alakulására több tényező figyelembevételével, ökonometriai modellben vizsgáltuk. Az eredmények alapján pedig egy RandomForest-modell segítségével részletesebb, országszintű elemzés keretében vizsgáltuk meg a fosszilis energiahordozók szerepét a gazdasági növekedésben. Külön vizsgáltuk a hatást a karbonintenzív, az energiaexportőr, a megújuló források felé forduló és a szolgáltatásalapú gazdaságokban.

Az elemzés ökonometriai alapja a kiterjesztett Solow-modell (Mankiw, Romer és Weil, 1992). A jelen tanulmányban használt modell bevonja az elemzésbe a humán tőkét (HDI), az energiaiintenzitást és az energiafelhasználást (E-mix) is. Szerepel benne továbbá kontrollváltozóként az infláció (CPI). A klasszikus inputok közül a Total labor force a munkaerő, a Gross Fixed Capital (GFCF, ami GDP% és current US\$ egységben is szerepel, mert modelltől függően így lesz használható) a tőke. Ezen kívül kiegészítő változóként szerepeltettük az országok aktív korú (15-64 éves) népességszámát, amelyet a szükséges arányosításokhoz használtunk. Az adatbázis 91 ország adatait tartalmazza a 2013–2023 közötti időszakban.

A vizsgálatban szereplő 91 ország különféle gazdasági típusokat képvisel. Az energiaiintenzív és fosszilis alapú gazdaságok (pl.: Kína, Oroszország, Irán) jelentős mértékben támaszkodnak az energiaiintenzív iparágakra (bányászat, nehézipar vagy fosszilis energiahordozók feldolgozása). A fejlett, szolgáltatásalapú és energiahatékony országokban (pl.: Németország, Japán, Svédország) a GDP nagy részét a szolgáltatások adják, magas az energiahatékonyosság és a technológiai fejlettség. Élen járnak az energiahatékonyági és fenntarthatósági törekvések megvalósításában, technológiai előnyük pedig csökkenti energiaiintenzitásukat. A feltörekvő, vegyes szerkezetű gazdaságokban (pl.: Brazília, Törökország, Fülöp-szigetek) az ipar és a szolgáltatások szerepe egyaránt jelentős, de ezek az országok még nem érik el a fejlett országok hatékonysági szintjét. Ezek az országok vegyes gazdasági struktúrával rendelkeznek, és az energiafelhasználásuk mintázata regionális és gazdasági szinten is változó. A mintában helyet kaptak még az energiaexportőr országok (pl.: Szaúd-Arábia, Algéria), melyek gazdaságában kiemelt jelentőségű a direkt export. Vizsgálunk továbbá kisméretű, magas fejlettségű, alacsony energiagigényű országokat (pl.: Hongkong, Luxemburg) is. Ezek a gazdaságok kis területi és gazdasági méretükből adódóan nem tartoznak a fenti nagy blokkok egyikébe sem. Jellemzően a pénzügyi szektorra vagy a turizmusra épülő gazdaságok, alacsony energiaiintenzitással. Ez a heterogenitás lehetővé teszi a gazdasági szerkezetek és energiafelhasználási mintázatok összehasonlítását.

A modellt az (1) egyenlet írja le.

$$\begin{aligned} \ln(Y_{it}) = & \alpha + \beta_1 \ln(K_{it}) + \beta_2 \ln(L_{it}) + \beta_3 \ln(H_{it}) \\ & + \beta_4 \ln(E_{it}) + \theta_1 (\ln(E_{it}) \times \text{Coal_share}_{it}) \\ & + \theta_2 (\ln(E_{it}) \times \text{Renewables_share}_{it}) + \theta_3 (\ln(E_{it}) \times \text{Energy_intensity}_{it}) \\ & + \mu_i + \lambda_t + u_{it} \end{aligned} \quad (1)$$

ahol:

Y_{it} a gazdaság kibocsátása ország (i) és év (t) szerint (GDP/capita),

K_{it} a fizikai tőke input (gépek, épületek, infrastruktúra – GFCF),

L_{it} a munkaerő input (Total Labor Force),

H_{it} a humántőke input (HDI),

E_{it} az energiainput (fosszilis energiafelhasználás, energaintenzitás, E-mix),

μ_i az ország fix hatás (rejtett, időben állandó országjellemzők, pl.: földrajz, intézményi minőség, kultúra),

λ_t az év fix hatás (pl.: globális sokkok, világpiaci trendek, pénzügyi válságok, COVID-19),

u_{it} a hibatag (mindaz, amit nem magyaráz meg a modell),

α a tengelymetszet, ami ökonómiai értelemben a technológiai szintet (TFP) és minden más kimaradt, átlagos hatást foglal magában, mivel az átlagos alap kimeneti szintet ragadja meg az országspecifikus (μ_i) és időspecifikus (λ_t) fix hatások figyelembevétel után,

β_n az ún. elaszticitási együtthatók (megmutatják, 1%-os inputnövekedés hány %-kal növeli Y-t, azaz a GDP-t),

θ_n az interakciós változók együtthatója,

az i index országokat jelöl,

a t index időszakot (év),

$$\text{Coal_share}_{it} = \frac{\text{Coal}_{it}}{\text{Total_energy}_{it}},$$

$$\text{Renewables_share}_{it} = \frac{\text{Renewables}_{it}}{\text{Total_energy}_{it}},$$

$$\text{Energy_intensity} = \frac{\text{Energy_use}}{\text{GDP}}$$

A modell építésekor a logaritmusformát választottuk, mert itt az együtthatók közvetlenül rugalmasságot (elasticity) mutatnak (pl., ha $\alpha = 0.3$, akkor +1% tőke +0.3% outputnövekedéssel jár). A Cobb–Douglas-formára logaritmizált kiterjesztett Solow-modell keretében a GDP-t az inputok rugalmasságain keresztül becsültük. A modell, amely tulajdonképpen egy rögzített hatású panel OLS-modell,

lehetőséget ad a fizikai tőke, a munkaerő, a humántőke és az energiahatékonyság együttes hatásának számszerűsítésére.

A részletesebb, országos szintű elemzés középpontjában a Random Forest-modell állt. A Random Forest-modell egy összetett, ensemble-alapú gépi tanulási algoritmus, amely több döntési fát hoz létre a minták véletlenszerű részhalmazainak felhasználásával. Célja, hogy többváltozós adatbázis esetében pontos predikciókat készítsen, és feltárja a prediktorváltozók közötti nemlineáris összefüggéseket. A modell a fák predikcióit aggregálva hozza létre a végső becslést, amely növeli a pontosságot és csökkenti az overfitting kockázatát. Alkalmazása lehetővé teszi a fosszilis energiafogyasztás és a gazdasági növekedés közötti kapcsolat komplex és nemlineáris összefüggéseinek feltárását és a változók fontosságának megállapítását. E tulajdonságai miatt esett választásunk erre a modellre. A modell kimenetei nemcsak predikciós célokat szolgálnak, hanem a változók gazdasági jelentőségének jobb megértéséhez is hozzájárulnak. Ebben az elemzésben a modellnek kettős célja van:

1. Előre jelezni a gazdasági növekedést (GDP_growth) a fosszilis energiafogyasztás (Energy_use) alapján.
2. Meghatározni az egyes független változók fontosságát az előrejelzésekben.

A modell nullhipotézise szerint a fosszilis energiafogyasztás és a gazdasági növekedés között nincs jelentős kapcsolat, és a változók nem tartalmaznak hasznos információt a predikciókhoz. A modellnek háromféle kimenete van: a modell által becsült GDP_growth értékek minden megfigyeléshez (predikció), az egyes független változók relatív jelentősége az előrejelzések pontosságában, valamint a predikciók teljesítménye, amelyet R^2 , RMSE vagy MSE érték mér.

Az elemzéshez a World Bank World Development Indicators (WDI) adatait használtuk:

- GDP növekedés (%);
- fosszilis energiafelhasználás (kg olajegyenérték/fő);
- energiaszükséglet (GDP egységre jutó energiafelhasználás, PPP \$/kg olajegyenérték).

Az elemzés alapját a WDI-ből származó, 2013 és 2023 közötti adatok képezték. A kezdőidőpontot úgy választottuk ki, hogy a 2008-as válság utóhatásai már ne érződjenek jelentős mértékben. Kizártuk az elemzésből azokat az országokat, amelyeknél az adatok több mint 70%-a hiányzott. A fennmaradó hiányzó értékeket az országon belüli rendelkezésre álló adatok átlagával vagy ennek hiányában az oszlop mediánjával pótoltuk. A szélsőséges értékeket boxplot és Z-score alapján azonosítottuk, és helyettesítettük az IQR alsó vagy felső határértékével.

A függő változó az egy főre jutó GDP növekedése (éves %), független változója a fosszilis energiafelhasználás (kg olajegyenérték/fő), a GDP egységre jutó energiafelhasználás (PPP \$/kg olajegyenérték) és az energiahatékonyság. A modell célja, hogy számszerűsítse az energiafogyasztás gazdasági növekedésre gyakorolt hatását.

Fontos megjegyezni, hogy a vizsgálatban alkalmazott panel regressziós és Random Forest-modell nem alkalmas oksági kapcsolatok igazolására, inkább a változók közötti statisztikai összefüggések feltárását szolgálja. A kapott eredmények a kapcsolat irányát és erősségét mutatják meg, de nem bizonyítják, hogy az egyik változó közvetlenül okozza a másik változását. A következtetések értelmezése ezért elsősorban deskriptív és prediktív jellegű, a gazdaságpolitikai alkalmazás során ezeket a korlátokat figyelembe kell venni.

4. Eredmények

Az 1. táblázat összehasonlítja a rögzített és véletlen hatású panelregressziós modellek illeszkedési jellemzőit. A Hausman-teszt szignifikáns eredménye ($p = 0.004$) a rögzített hatású modell alkalmazását indokolja. Az F-teszt megerősíti, hogy az egyedi hatások szignifikánsan befolyásolják az eredményváltozót, míg az AIC és BIC értékek is a rögzített hatású modell felé billentik a mérleg nyelvét. Ez alapján a további interpretációkban a rögzített hatású modell eredményeire építünk.

1. táblázat. Panel regressziós modellszelekció és illeszkedés

Modell	R^2 (Within)	R^2 (Between)	R^2 (Overall)	F-teszt	Hausman-teszt (p)	AIC	BIC
Rögzített	0.65	0.48	0.59	12.31 ($p < 0.001$)	0.004	1412	1456
Véletlen	0.58	0.52	0.55	–	–	1441	1479

Forrás: saját szerkesztés az eredmények alapján

Rögzített hatású panel OLS-modellünk eredményeit mutatja be az 2. táblázat.

2. táblázat. Model outputs

Változó	Elaszticitás	p-érték
$\ln(K)$ – Tőke rugalmasság	0.362	0.0000
$\ln(L)$ – Munkaerő rugalmasság	-0.364	0.1564
$\ln(H)$ – Humán tőke rugalmasság	-0.141	0.6048
$\ln(E)$ – Energiafelhasználás	0.738	0.0000
$\ln(E) \times \text{Fossil_share}$	-0.075	0.3829
$\ln(E) \times \text{Renewables_share}$	-0.148	0.0750
$\ln(E) \times \ln(EI)$ (hatékonyság)	-0.041	0.0000

Forrás: saját szerkesztés az eredmények alapján

A Durbin-Watson statisztika értéke 1.28, ami reziduális pozitív autokorreláció jelenlétét jelzi. Ezt a modellt további bővítésével egy következő kutatási fázisban tervezzük csökkenteni.

Az eredmények alátámasztják a tőke szerepének fontosságát a Solow-modellben. A tőke elaszticitása szignifikáns, a beruházások 1%-os növelésével 0.362% GDP-növekedés produkálható a többi tényező változatlansága mellett. A munkaerő és a humán tőke rugalmassága nem bizonyult szignifikáns tényezőnek. Ez arra utal, hogy – a modellezésükre használt proxyk (Total Labor Force és HDI) alapján – nincs robusztus hatásuk a GDP-re az ország- és évspecifikus fix hatások kontrollálása mellett. Ezt az eredményt részben a fix hatások jellege, részben mérési korlátok is okozhatják. Kifejezetten szignifikáns az energiafelhasználás, amelynek 1%-os növelése 0.74%-os GDP-növekedéssel jár együtt. Ez az eredmény azt jelzi, hogy a gazdasági növekedés tartósan energiafüggő. A fenntarthatósági átmenet haladása ellenére a fosszilis energia továbbra is kulcsszerepet játszik a vizsgált országok GDP-jének alakulásában.

Az interakciós változók közül a fosszilis energiahordozók részaránya negatív hatású (-0.075) de nem szignifikáns. A fosszilis részarány a teljes energiafelhasználáson belül tehát önmagában nem befolyásolja érdemben az energia és a GDP közötti kapcsolatot. A megújuló energia részarány hatása szintén negatív (-0.148) és 10%-os szint mellett még szignifikáns is ($p = 0.075$).

A megújuló energiaforrások nagyobb részaránya az energiamixben tehát némileg csökkenti az energiafelhasználás GDP-re gyakorolt hatását. Ennek hátterében feltehetően a nagyobb hatékonyság vagy alacsonyabb karbonintenzitás állhat. Az energiaintenzitás interakciója negatív és szignifikáns ($-0,041$, $p < 0,01$), azaz a jobb energiahatékonyság mérsékli az energiainput GDP-növelő szerepét.

Az eredmények alapján a fizikai tőke és a fosszilis energia használata továbbra is alapvető tényező az egy főre jutó GDP alakulásában a vizsgált országokban.

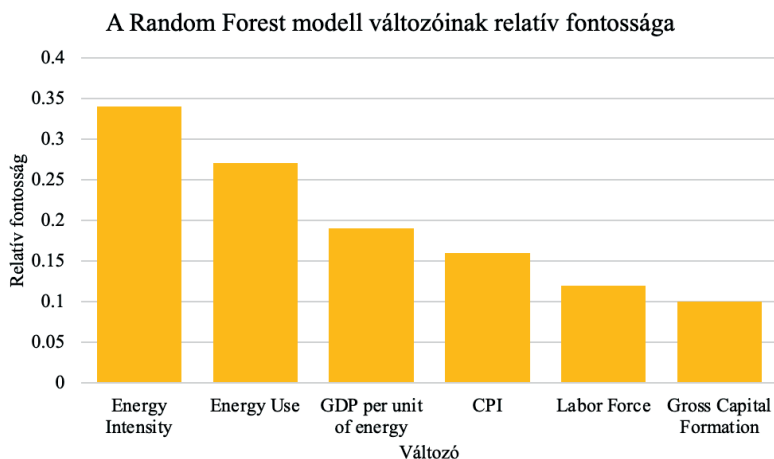
A hatékonyabb energiafelhasználás és a megújuló energiaforrások részarányának növelése azonban segíthet csökkenteni a gazdasági növekedés magas fosszilizáció-függőségét. A modell bemutatja a főbb növekedési tényezőket, de a munkaerő és a humántőke hatásainak nem szignifikáns eredményei alapján a további kutatásban érdemes más, pontosabb proxykat keresni, illetve a dinamikus specifikációkat használni az autokorreláció jobb kezelése érdekében.

A Random Forest-modell főbb eredményei az alábbiak:

A modell három fő outputját értékeltük: (1) a predikciók pontossága (R^2 értékek országonként), (2) a változók predikciós fontosságának százalékos megoszlása, valamint (3) az egyes országok gazdasági struktúrájából adódó különbségek. A magas R^2 értékek (pl. Kína: 0.98; Mongólia: 0.99) alátámasztják a modell predikciós képességét, de nem értelmezhetők oksági bizonyítékként. Fontos hangsúlyozni, hogy a Random Forest-modell nem alkalmas kauzális viszonyok bizonyítására. A modell célja a predikciós teljesítmény maximalizálása és a változók közötti nemlineáris összefüggések feltérképezése. Az eredmények tehát statisztikai kapcsolatokra vonatkoznak, nem pedig ok-okozati összefüggésekre. A modell outputjai prediktív keretben segíthetik az ország-specifikus energiahatékonysági politikák kialakítását, de nem vonható le belőlük egyértelmű következtetés az energiafogyasztás hatásáról a gazdasági növekedésre.

A független változók 66.3%-ban magyarázzák a GDP alakulását ($R^2=0.663$). A független változók elemzése alapján megállapítható, hogy az „Energy intensity level of primary energy” és a „GDP per unit of energy use” egyaránt kulcsfontosságú tényezők a gazdasági növekedés előrejelzésében (1. ábra).

1. ábra. A változók relatív fontossága (Random Forest-modell)



Forrás: saját szerkesztés

Az eredmények szerint mindkét változó szignifikáns szerepet játszik a GDP növekedésében, ami arra utal, hogy az energiafelhasználás hatékonysága és intenzitása közvetlen kapcsolatban állhat a gazdaság fejlődésével. Az ilyen összefüggések feltárása segíthet a politikai döntéshozóknak abban, hogy az energiahatékonyságot elősegítő intézkedéseket vezessenek be, miközben támogatják a fenntartható gazdasági növekedést.

Az ország-specifikus Random Forest-modellek eredményei azt mutatják, hogy Kína, India és Mongólia esetében az energiafelhasználás jelentős prediktora a GDP-növekedésnek. Az energiafelhasználás prediktív fontossága Kínában 65%, Mongóliában 60%, Indiában pedig 64% körül alakult, ami azt jelzi, hogy ezekben az országokban a fosszilis energiafelhasználás szorosan összefügg a gazdasági növekedéssel. Az energaintenzitás szerepe kisebb, de még így is jelentős mértékben hozzájárult a predikciókhoz (pl.: Mongóliában 40%). Ennek háttérében az áll, hogy ezeknek az országoknak a gazdasági szerkezete továbbra is energaintenzív ágazatokra épül, ahol az energiafelhasználás szintje erőteljesen befolyásolja a növekedési dinamikát. A Random Forest-modellek predikciós pontossága is kiemelkedő volt: az R^2 értéke Kína esetében 0.98, Mongóliánál 0.99, Indiánál 0.93 volt, ami azt mutatja, hogy az energiafelhasználáson alapuló modell jól képes becsülni a GDP-növekedést ezekben az országokban. Ezeket az eredmények megerősítik más korábbi kutatások eredményei. Kína, India és Mongólia gazdasági növekedése szoros kapcsolatban áll energiafelhasználásuk intenzitásával, különösen az energiaigényes iparágak dominanciájával. Kína esetében az energaintenzív iparágak, mint például az acél- és cementgyártás, kiemelkedő szerepet játszanak a gazdasági fejlődésben. Sadorsky (2010) kutatása alapján Kína gazdasági növekedése jelentős mértékben függ az energiafogyasztás növekedésétől, amit az energiaigényes iparágak dominanciája támogat. Zhou (2022) szintén hangsúlyozza, hogy az energiafelhasználás jelentős részét ezek az iparágak adják és ezek GDP-hez való hozzájárulása meghatározó. India esetében az energaintenzív iparágak, mint az építőipar és a nehézipar, hasonló hatást gyakorolnak a gazdasági növekedésre. Shahbaz, Khan és Tahir (2013) kutatásukban kimutatták, hogy az energiafogyasztás és a gazdasági fejlődés között szoros kapcsolat áll fenn. Az Energy Information Administration (EIA, 2021) jelentése szerint India növekvő energiafogyasztása az iparosodás és a városiasodás következménye, amely nagymértékben hozzájárul a GDP növekedéséhez.

Mongólia esetében a bányászat az egyik legenergiaintenzívebb szektor, amely kiemelt szerepet játszik a gazdaságban. Zhang és Shi (2019) kutatása rámutatott, hogy az ország gazdasági növekedése nagymértékben támaszkodik a bányászati szektor energiafogyasztására, amely a GDP jelentős hányadát adja. A Világbank (2018a) jelentése szintén megerősíti, hogy az energaintenzív iparágak dominálnak Mongóliában, és a fenntartható növekedés érdekében fontos lenne az energiahatékonyság javítása és a megújuló energiaforrásokra való áttérés.

A három ország példája jól mutatja, hogy az energiafogyasztás intenzitása rövid távon elősegíti a gazdasági növekedést, azonban hosszú távon fenntarthatósági kérdéseket vet fel. Az energiahatékony technológiák és a megújuló energiaforrások alkalmazása elengedhetetlen lenne a környezeti és gazdasági stabilitás megőrzése érdekében. Az ENSZ Fejlesztési Programjának jelentése (UNDP, 2015) kiemeli, hogy az energiaintenzív gazdaságok – mint Kína, India és Mongólia – különösen érzékenyek az energiaárak ingadozásaira és a fosszilis tüzelőanyagok elérhetőségére. Kína, India és Mongólia energiafogyasztása tehát szorosan összefügg a gazdasági növekedéssel, azonban a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőségük hosszú távon jelentős kihívásokat okozhat, mind környezeti, mind gazdasági szempontból.

Irán, Oroszország és Szaúd-Arábia esetében szintén erős pozitív hatás figyelhető meg, amely az energiaexport és a fosszilis tüzelőanyagokra épülő gazdasági modelljük eredménye. Ezek a gazdaságok jelentős mértékben támaszkodnak az energiaexportból származó bevételekre, amelyek közvetlenül hozzájárulnak a GDP növekedéséhez. A fosszilis tüzelőanyagokra épülő gazdasági modellek rövid távon jelentős gazdasági előnyöket biztosítanak, de ezeket az országokat különösen érzékennyé teszik az energiaárak ingadozásaira. A Világbank (2018b) jelentése rámutat arra, hogy az olajbevételek Irán GDP-jének jelentős részét adják, azonban a gazdasági diverzifikáció hiánya hosszú távon fenntarthatatlan. Oroszország energiaintenzív gazdaságáról szóló elemzések, például Bouoiyour és Selmi (2018) tanulmánya szerint, az orosz GDP jelentős részét a földgáz- és olajexport biztosítja, miközben az energiaárak globális változása közvetlenül befolyásolja a gazdasági stabilitást.

Az International Energy Agency (IEA, 2022) jelentése szerint Szaúd-Arábia gazdasága szinte teljes egészében az olaj- és gázexportból származó bevételekre épül, amelyek GDP-növekedést eredményeznek. Ugyanakkor a „Vision 2030” elnevezésű program célja, hogy csökkentse az energiaexport függőségét a gazdaság diverzifikációja révén. Ezeknek az országoknak közös jellemzője, hogy a fosszilis tüzelőanyagokra épülő gazdasági modell rövid távon növekedési előnyöket biztosít, azonban hosszú távon fenntarthatósági és gazdasági kockázatokat hordoz magában. Az energiahatékonyság javítása és a gazdasági szerkezet diverzifikálása elengedhetetlen lenne ezen országok stabilitásának megőrzése érdekében.

Más országok, például Dél-Afrika, Kanada, Egyesült Államok, Indonézia és Pakisztán esetében mérsékeltebb, de továbbra is szignifikáns kapcsolat mutatható ki az energiafelhasználás és a gazdasági növekedés között. Ezzel szemben Hongkong és Makaó esetében a hatás statisztikailag nem szignifikáns, ami azt jelzi, hogy az energiafelhasználás szerepe kevésbé meghatározó ezen régiók gazdasági teljesítményében. Ezeket az eredményeket más kutatások is alátámasztják. Az energiafelhasználás és a gazdasági növekedés közötti kapcsolat továbbra is szignifikáns, bár kevésbé intenzív, mint az energiaexportáló országokban. Stern

és Cleveland (2004) tanulmányukban hangsúlyozták, hogy az energiafelhasználás kulcsszerepet játszik az ipari termelés és a GDP-növekedés fenntartásában olyan országokban, mint Kanada és az Egyesült Államok, amelyek fejlett infrastruktúrával rendelkeznek.

Dél-Afrika és Indonézia esetében az energiaigényes iparágak és az energia-hordozók exportja továbbra is jelentős hatást gyakorol a gazdaság növekedésére (Ozturk, 2010). Ugyanakkor Pakisztán esetében a növekvő energiaigény és az energiaellátás hiányosságai kihívásokat jelentenek a gazdasági fejlődés szempontjából (Siddiqui, 2004). Hongkong és Makaó gazdasági szerkezete eltér az energaintenzív országokétól. Zhang és Broadstock (2016) kutatása szerint ezekben a régiókban az energiafelhasználás és a GDP közötti kapcsolat nem statisztikailag szignifikáns, mivel gazdaságuk főként a pénzügyi és szolgáltatási szektorokra épül, amelyek kevésbé energiaigényesek.

Az időszak-specifikus hatások elemzése alátámasztotta, hogy a különböző évek globális gazdasági trendjei és eseményei szignifikánsan befolyásolják a GDP növekedését. Az elemzés időbeli bontása alapján megfigyelhető, hogy a fosszilis energiafelhasználás és a GDP közötti kapcsolat erőssége változó intenzitást mutatott a vizsgált időszakban (2013–2023). A 2013–2016 közötti időszakban a kapcsolat mérsékelt volt ($R^2_{OLS} \sim 0.52$). Ezt elsősorban a globális nyersanyagpiaci árfolyam-ingadozások befolyásoltak. A 2017–2019-es években erősödött a kapcsolat ($R^2_{OLS} \sim 0.71$), különösen az energiaexportőr országok esetében, ahol a gazdasági növekedés közvetlenül követte az energiahordozók iránti kereslet növekedését. A 2020–2021 időszakban a COVID-19 világjárvány jelentős torzulást okozott a gazdasági és energiafogyasztási mintázatokban: a fosszilis energia iránti kereslet visszaesett, miközben a GDP-csökkenés sok országban diszproporcionálisan jelentkezett. Ez idő alatt a kapcsolat gyengült ($R^2_{OLS} \sim 0.31$), sőt több esetben negatívvá vált. A 2022–2023-as időszakban a kapcsolat fokozatosan helyreállt ($R^2_{OLS} \sim 0.64$), de több ország esetében a megújuló arányának növekedése miatt a fosszilis energia GDP-re gyakorolt hatása csökkent.

A Random Forest-modell fontossági értékei is mutatják ezt a dinamikát. Míg 2017–2019 között az energaintenzitás 33.8%-os relatív predikciós súlyt kapott, addig 2020–2021-ben ez 17.4%-ra esett vissza, majd 2022–2023-ban némileg emelkedett, 28.6%-ra. Az időszak-specifikus eltérések aláhúzzák a fosszilis energia és a gazdasági teljesítmény közötti kapcsolat dinamikus természetét, amelyet nemcsak technológiai és szerkezeti változók, hanem külső sokkok és politikai döntések is alakítanak.

Ez az eredmény rávilágít arra, hogy a gazdasági fejlődés nemcsak az energiafelhasználás hatékonyságától és intenzitásától függ, hanem a globális gazdasági dinamikától is. Az időszakok hatásának szignifikanciája azt mutatja, hogy a gazdasági növekedés elemzése során nem szabad figyelmen kívül hagyni a makroökonómiai tényezőket, mint például a pénzügyi válságok, technológiai áttörések vagy globális

energiaárak változásai. Stern és Cleveland (2004) rámutattak arra, hogy a gazdasági növekedés vizsgálata során figyelembe kell venni a makroökonómiai tényezők, például a globális pénzügyi válságok és energiaár-ingadozások szerepét. Ezen túlmenően Apergis és Payne (2010) hangsúlyozták, hogy a technológiai fejlődés és az energiahatékonyság növelése jelentős befolyással bír a gazdasági növekedésre különböző időszakokban.

Az energiaárak globális változásai szintén kritikusak a gazdasági fejlődés szempontjából. Hamilton (2009) szerint a globális recessziók egyik jelentős kiváltó oka az energiaárak drasztikus ingadozása, amely közvetlen hatással van a termelési költségekre és a fogyasztói keresletre. Ezek az eredmények rávilágítanak arra, hogy a GDP elemzését nem lehet kizárólag az energiafelhasználás intenzitására alapozni, hanem figyelembe kell venni a globális gazdasági dinamikát és az időszak-specifikus hatásokat is.

Hasonló megállapításokhoz vezettek a korrelációs eredmények is. A korrelációs értékek elemzése azt mutatja, hogy az energaintenzitás és a GDP-növekedés közötti kapcsolat nagymértékben függ az egyes országok gazdasági szerkezetétől és fejlettségi szintjétől. Az energaintenzitás és a GDP-növekedés közötti korreláció különböző országokban eltérő mintázatokat mutat, ami az egyes gazdaságok energiafelhasználásának hatékonyságára és gazdasági szerkezetére világít rá. A korrelációs értékek (0 és 1 között pozitív, 0 és -1 között negatív) az energaintenzitás szerepét tükrözik a gazdasági növekedés előmozdításában vagy éppen visszafogásában.

Az erős pozitív korrelációt mutató országok, mint Oroszország (0.688), Kína (0.559), Mongólia (0.520) és Indonézia (0.454), az energaintenzív iparágak dominanciájára utalnak. Ezekben az országokban a gazdasági növekedés szorosan kapcsolódik az energiafelhasználáshoz, különösen a nehézipar, a bányászat és az infrastruktúra-fejlesztések terén. Oroszország és Kína gazdasági növekedésének motorját szintén az energaintenzív ágazatok adják (Bouoiyour és Selmi, 2018; Sadorsky, 2010). Mongóliában a bányászat (Zhang & Shi, 2019), Indonéziában a nyersanyag-kitermelés és az ipar a növekedés fő hajtóereje (Ozturk, 2010).

Az energaintenzitás és a GDP-növekedés közötti negatív korrelációk (Ausztrália -0.242, Lengyelország -0.225, Pakisztán -0.181, Irán -0.152, és az Egyesült Államok -0.078), arra utalnak, hogy ezekben a gazdaságokban az energiahatékonyság javulása hozzájárult a GDP növekedéséhez. Ezek az országok diverzifikált gazdasági szerkezetük miatt kevésbé függnek az energaintenzív ágazatoktól, és jellemzően nagyobb hangsúlyt fektetnek a technológiai és szolgáltatási szektorokra. Ez nagyobb stabilitást és fenntarthatóságot biztosít. Az Egyesült Államok példája jól illusztrálja a fejlett gazdaságokra jellemző trendet, ahol az energiahatékonyság és a technológiai fejlődés révén csökkent az energaintenzitás gazdasági szerepe (Stern & Cleveland, 2004). Kanada (-0.047) és Vietnam (-0.060) esetében az alacsony korreláció arra utal, hogy az energiafelhasználásnak nincs jelentős hatása a GDP

növekedésére. Ez valószínűleg az energiahatékony technológiák és/vagy a kevésbé energiaigényes iparágak alkalmazásának köszönhető.

5. Következtetések

A következtetések részletezése előtt felhívjuk a figyelmet arra, hogy a tanulmány eredményei statisztikai összefüggéseken alapulnak, és nem szolgálnak kauzális bizonyítékként. A jövőbeli kutatásokban érdemes lehet oksági modellezést alkalmazni (pl. instrumentális változók vagy természetes kísérleti keretek révén), hogy pontosabban megérthető legyen az energiafelhasználás és a gazdasági növekedés közötti viszony mechanizmusa.

A jelen tanulmány megállapításai több ponton alátámasztják a korábbi empirikus kutatások eredményeit, ugyanakkor új aspektusokat is feltárnak a fosszilis energia és a gazdasági növekedés kapcsolatában. Ez összhangban áll Zhang et al. (2024b) és Perera (2024) eredményeivel, akik kimutatták, hogy az energiaintenzitás jelentős előrejelzője a gazdasági teljesítménynek, különösen feltörekvő országok esetében. A fosszilis energiafogyasztás szerepe a gazdasági növekedésben továbbra is meghatározó, különösen a karbon-intenzív gazdaságok esetében. A rövid távú gazdasági előnyök mellett azonban ez az energiafüggőség hosszú távú fenntarthatósági kihívásokat jelent, különösen a fosszilis energiaforrások kimerülése és a klímaváltozással kapcsolatos növekvő aggodalmak miatt.

Irán, Oroszország és Szaúd-Arábia esete más aspektusokra világít rá, mivel gazdaságaik jelentős részben az energiaexportból származó bevételekre támaszkodnak. Ezek az országok rövid távon jelentős gazdasági előnyöket élveznek, ám az energiaárak globális ingadozása különösen kiszolgáltatottá teszi őket. Szaúd-Arábia „Vision 2030” elnevezésű programja például egy figyelemreméltó lépés a gazdaság diverzifikációjának irányába, amely a fosszilis energiahordozók dominanciájának csökkentését célozza. Más gazdaságok, mint például Dél-Afrika, Kanada, az Egyesült Államok, Indonézia és Pakisztán esetében mérsékeltebb, de még mindig szignifikáns összefüggés figyelhető meg. Ezek az országok főként az energiahatékonyság javítására és a megújuló energiaforrások integrációjára helyezik a hangsúlyt, hogy csökkentsék fosszilis energiafüggőségüket. Hongkong és Makaó példája ezzel szemben rávilágít arra, hogy a szolgáltatásalapú gazdaságokban az energiafelhasználás szerepe kevésbé jelentős, ami a gazdasági szerkezetük sajátosságaiból adódik.

Az időszak-specifikus hatások elemzése azt mutatja, hogy a globális gazdasági események, mint például a pénzügyi válságok, a technológiai áttörések és az energiaárak változásai, szignifikánsan befolyásolják a gazdasági növekedést. A 2020–2021-es időszakban megfigyelt kapcsolatgyengülés illeszkedik az olyan tanulmányokhoz, mint Mensah et al. (2025), akik szerint a globális válsághelyze-

tek idején az energiafelhasználás és a GDP kapcsolata elbizonytalanodik, részben a keresleti sokkok miatt. Ez aláhúzza annak szükségességét, hogy a GDP elemzése során a makroökonómiai tényezőket is figyelembe kell vennünk. A Hamilton (2009) által bemutatott olajár-ingadozások példája jól szemlélteti, hogy az energiaárak változásai miként befolyásolják a globális és nemzeti gazdaságokat.

A tanulmány által alkalmazott Random Forest-moddal megerősítette, hogy a fosszilis energiafelhasználás és a gazdasági növekedés közötti kapcsolat számszerűsíthető. Az ilyen elemzések jelentős segítséget nyújthatnak a szakpolitikai döntéshozatalban, különösen az energiaátmenet megtervezésében és végrehajtásában.

A fosszilis energiafogyasztás gazdasági hatásainak vizsgálata alátámasztotta, hogy a globális gazdasági növekedés hosszú távú fenntarthatósága érdekében elengedhetetlen az energiahatékony technológiák és a megújuló energiaforrások integrációja. Eredményeink megerősítik, hogy a fosszilis energia dominanciáját csökkenteni kell, és nagyobb hangsúlyt kell fektetni az energiaátmenetre, ami nemcsak környezeti, hanem gazdasági előnyöket is biztosíthat. Az egyes régiókban megfigyelhető eltérő hatások rávilágítanak az energiafelhasználás gazdasági szerepének különbségeire. A regionális eltérések arra utalnak, hogy az energiafelhasználás hatása jelentős mértékben függ az országok gazdasági szerkezetétől, technológiai fejlettségétől és energiaforrásaik elérhetőségétől. A regionális eltérések (pl.: Ázsia vs. Észak-Amerika) szintén megtalálhatók más tanulmányokban (Lefatsa & Nubong, 2025), melyek a gazdasági szerkezet és az energiaszerkezet közötti különbségeket hangsúlyozzák. A fejlett országok esetében az alacsonyabb energiaintenzitás ellenére is magas GDP-értékek tapasztalhatók, ami megerősíti Hamilton (2009) és Mirza & Kanwal (2017) megállapításait a technológiai fejlődés és az energiahatékonyság növekvő szerepéről.

A fosszilis energiafelhasználás GDP-re gyakorolt hatásának megértése fontos alapot nyújt a gazdaság- és energiapolitikai döntések meghozatalához. Az eredmények alapján egyértelmű, hogy az energiahatékonyság növelése és a megújuló energiaforrások integrációja kulcsfontosságú lehet a fenntartható gazdasági fejlődés biztosításában. Az elemzés során kapott adatok segíthetnek a jövőbeli kutatások irányainak meghatározásában, valamint az energiafelhasználás és a gazdasági növekedés kapcsolatának mélyebb megértésében.

Források

- Alcott, B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics*, 54(1), 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.020>
- Aghion, P., & Howitt, P. (1992). A model of growth through creative destruction. *Econometrica*, 60(2), 323–351. <https://doi.org/10.2307/2951599>
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2009). Energy consumption and economic growth: Evidence from the Commonwealth of Independent States. *Energy Economics*, 31(5), 641–647. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.01.011>
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010). Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries. *Energy Policy*, 38(1), 656–660. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.002>
- Barro, R. J., & Sala-i-Martin, X. (1995). *Economic growth*. McGraw-Hill.
- Bouoiyour, J., & Selmi, R. (2018). Energy exports, economic growth and geopolitical risks: The case of Russia. *Energy Economics*, 70, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.12.015>
- Grossman, G. M., & Helpman, E. (1991). *Innovation and growth in the global economy*. MIT Press.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353–377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Hamilton, J. D. (2009). Causes and consequences of the oil shock of 2007–08. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2009(1), 215–261. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1449622>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
- IEA. (2020). World Energy Outlook 2020. *International Energy Agency*. Retrieved from: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf>
- Islam, N. (1995). Growth empirics: A panel data approach. *Quarterly Journal of Economics*, 110(4), 1127–1170. <https://doi.org/10.2307/2946651>
- Hamilton, J. D. (2009). Causes and consequences of the oil shock of 2007–08. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2009(1), 215–261. Retrieved from: <http://www.jstor.org/stable/25652719>
- International Energy Agency. (2022). *Saudi Arabia Energy Outlook 2022*. Retrieved from <https://www.iea.org/countries/saudi-arabia/electricity>
- Kálmán, B. G., Bárczi, J., & Zéman, Z. (2025). Impact of Fossil Energy Consumption on the Economic Growth of Carbon-Resource Economies: Modelling Analysis. In: *Impact of Fossil Energy Consumption on the Economic Growth of Carbon-Resource Economies: modelling analysis*. Springer.

- Lefatsa P & Nubong G (2025) Financial development, economic growth, and energy consumption in SADC region. *BRICS Journal of Economics* 6(1), 223–258. <https://doi.org/10.3897/brics-econ.6.e138454>
- Lucas, R. E. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3–42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- Mankiw, N. G., Romer, D., & Weil, D. N. (1992). A contribution to the empirics of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407–437. <https://doi.org/10.2307/2118477>
- Mensah, J. T., Nsibimana, A., Dzansi, J., & Nshunguyinka, A. (2025). Energy demand during a pandemic: Evidence from Ghana and Rwanda. *Energy Economics*, 141, 108065. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.108065>
- Mirza, F. M., & Kanwal, A. (2017). Energy consumption, carbon emissions and economic growth in Pakistan: Dynamic causality analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1233–1240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.081>
- Omri, A. (2013). CO2 emissions, energy consumption, and economic growth nexus in MENA countries. *Energy Economics*, 34(3), 1182–1189. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.003>
- Ozturk, I. (2010). A literature survey on energy–growth nexus. *Energy Policy*, 38(1), 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.024>
- Perera, N., Dissanayake, H., Samson, D., Abeykoon, S., Jayatilaka, R., Jayasinghe, M., & Yapa, S. (2024). The interconnectedness of energy consumption with economic growth: A Granger causality analysis. *Heliyon*, 10(17), e36709. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36709>
- Romer, P. M. (1986). Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 94(5), 1002–1037. <https://doi.org/10.1086/261420>
- Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 98(5), S71–S102. <https://doi.org/10.1086/261725>
- Sadorsky, P. (2010). The impact of energy consumption on economic growth in emerging economies. *Energy Policy*, 38(8), 4528–4535. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.013>
- Sadorsky, P. (2012). Energy consumption, output and trade in South America. *Energy Economics*, 34(2), 476–488. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.09.011>
- Shahbaz, M., Khan, S., & Tahir, M. I. (2013). The dynamic links between energy consumption, economic growth, financial development, and trade in India. *Energy Economics*, 40, 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.06.003>
- Siddiqui, R. (2004). Energy and economic growth in Pakistan. *Pakistan Development Review*, 43(2), 175–200. <http://www.jstor.org/stable/41260618>
- Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Stern, D. I. (2004). The role of energy in economic growth. *Ecological Economics*, 49(3), 365–380. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05921.x>

- Stern, D. I., & Cleveland, C. J. (2004). Energy and economic growth. In *Routledge handbook of Energy economics* (pp. 28-46). Routledge.
- Swan, T. W. (1956). Economic growth and capital accumulation. *Economic Record*, 32(2), 334–361. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4932.1956.tb00434.x>
- UNDP. (2015). *Achieving Sustainable Energy for All in the Asia-Pacific*. Retrieved from <https://www.undp.org/asia-pacific/publications/achieving-sustainable-energy-all-asia-pacific>
- World Bank. (2018a). *Mongolia Economic Update: Building a Sustainable Economy*. Retrieved from <https://documents.worldbank.org/curated/en/648031532963732140/pdf/129025-WP-PUBLIC-Mongolia-Economics-Update-2018-eng.pdf>
- World Bank. (2018b). *Iran Economic Monitor: Weathering Economic Challenges*. Retrieved from <http://documents.worldbank.org/curated/en/676781543436287317/Iran-Economic-Monitor-Weathering-Economic-Challenges>
- Zhang, J. (2024a). Energy access challenge and the role of fossil fuels in meeting electricity demand: Promoting renewable energy capacity for sustainable development. *Geoscience Frontiers*, 15(5), 101873. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101873>
- Zhang, Y., & Broadstock, D. C. (2016). The causality between energy consumption and economic growth in Hong Kong and Macau. *Energy Policy*, 92, 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.027>
- Zhang, X., & Shi, M. (2019). Energy efficiency and its impact on economic growth in resource-driven economies: The case of Mongolia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 362–373. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.048>
- Zhang, Y. (2024b). Circular economy innovations: Balancing fossil fuel impact on green economic development. *Heliyon*, 10(18), e36708. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36708>
- Zhou. (2022). *China Energy Outlook 2022*. Retrieved from https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/ceo_2022_chapter_1_final_2.pdf