

Városi Ökoszisztémák Gazdasági Értékelése¹

Kovács Antal Ferenc²

Összefoglalás

A tanulmány célja a városi ökoszisztémák vagyonértékének meghatározását segítő új értékelési koncepció, ill. módszer bemutatása. A módszer alkalmazása elősegítheti a városok természeti vagyonának az állapotmegőrzését és értéknövelését célzó beruházások piaci alapon történő finanszírozhatóságát. Az értékelési módszer a Kárpát-medence funkcionális városi régióinak (Functional Urban Areas, FUA)³ példáján keresztül kerül alkalmazásra, két szemléleti irányból: (1) az érték meghatározáshoz kapcsolódó szakirodalmi ajánlások alapján, ill. (2) geoinformatikai adatok felhasználásával. A kétféle szemléleti rányból nyert eredmények összevetésével a tanulmány további kutatások irányát jelöli ki. Az ENSZ Fenntartható Fejlődés Célok (SDG) között szerepel a városok fenntarthatóságának, a városi természeti környezet állapotának a javítása. A tanulmányban közölt kutatás szorosan kapcsolódik az SDG 11.6 Alcélhoz (Target), ami a légszennyezés egy főre számított értékének csökkentését célozza. A tanulmány időszerűségét és indokoltságát közvetlenül alátámasztja az Európai Bizottság 2025 júliusában megjelent közleménye a természeti vagyon megőrzését célzó beruházások magán pénzügyi forrásokból történő finanszírozásának elősegítéséről (EC, 2025).

Bevezetés

A társadalmi-gazdasági rendszer fenntarthatóságának feltétele, alapja, hogy az ember, a család mindennapi életlehetőségeihez, életminőségéhez biztosított legyen a lakhatás és a települési szolgáltatások, ennek részeként a természeti környezet megfelelő minősége. A települések, különösen a városok az épített és a természeti környezet legközvetlenebb érintkezési helyszínei, ahol a legintenzívebb a humán és a természeti rendszerek egymásrahatása.

A városok társadalmi és gazdasági egységet alkotó közösségek, amelyek működését alapvetően meghatározza a természeti környezetükkel, a városi ökoszisztémákkal való szerves kapcsolat, és amit a szoros kölcsönösség és egymásrahatás jellemez. A város tehát a társadalmi-gazdasági rendszer rendelkezésére álló természeti erőforrások megőrzésének, fejlesztésének és gyarapításának egyik legfontosabb színtere, ahol a természeti rendszerek, az ökoszisztémák nyújtotta szolgáltatások közvetlenül hatást gyakorolnak a városi lakosság *jó életére, jóllétére* (wellbeing), a társadalmi-gazdasági rendszer működésére és teljesítményére, pozitív és negatív értelemben egyaránt.

Az ENSZ Fenntartható Fejlődés Célok (SDG) között szerepel a városok fenntarthatóságának, a városi fenntarthatóság különböző célkitűzései között pedig a városi természeti környezet

¹ A kutatás a Pázmány Péter Katolikus Egyetem „Fenntarthatóság, állóképesség – az éghajlatváltozás és az ahhoz való alkalmazkodás társadalmi kihívásai” című projektjének keretében valósult meg a Technológiai és Ipari Minisztérium támogatásával. A Szerző köszönetét fejezi ki Dr. Kiss Márton, PhD, ökológus, geográfus, a Szegedi Tudományegyetem, Földrajz és Földtudományi Intézet, Légkör és Téradat tudományi Tanszék adjunktusának a kutatáshoz felhasznált geoinformatikai és ökológiai adatok előállításáért.

² Egyetemi adjunktus, Neumann János Egyetem, Gazdaságföldrajzi és Településmarketing Központ

³ A Funkcionális Városi Területek egy a statisztikában alkalmazott térbeli koncepció, mely egy sűrűn lakott városi magból és az azt körülvevő „ingázó” zónából áll. Részletesen lásd: Dijkstra, L., Poelman, H., & Veneri, P. (2019). *The EU-OECD definition of a functional urban area*.

állapotának a javítása: 11.Cél Fenntartható városok és közösségek (Fenntartható, befogadó, biztonságos és alkalmazkodó városok és más emberi települések létrehozása). A vonatkozó ENSZ közgyűlési határozat (UN GA, 2015) részletesen ismerteti a városok szerepét, mind a társadalmi, mind a környezeti folyamatok, változások, kihívások tekintetében. Jelenleg a világ népességének több mint fele él városokban, és ez az arány 2050-re várhatóan közel 70%-ra fog emelkedni. A megfelelő infrastruktúra, lakhatás, közlekedés és az alapvető szociális szolgáltatások biztosítása mellett a városok élhetősége, fenntarthatósága szempontjából létfontosságú a városok egészséges természeti környezete. Az SDG 11.6 (Target) Alcél a légszennyezés egy főre számított értékének csökkentését, a 11.7 Alcél a lakosság, különösen a nők és gyermekek zöld területekhez való hozzáféréseinek javítását tűzi ki célul⁴.

A Világbank „Accelerating Access to Clean Air for a Livable Planet” (A tiszta levegőhöz való hozzáférés gyorsítása az élhető bolygóért) című jelentése (World Bank, 2025) kiemeli, hogy növelni kell a légszennyezés csökkentését célzó szakpolitikák hatékonyságát, különös tekintettel az emberi egészségre legártalmasabb PM_{2,5} részecske koncentrációja tekintetében. A jelentés hangsúlyozza a holisztikus megközelítés igényét, a levegőminőség-kezelés javítását, valamint ennek érdekében a fokozott köz- és magánfinanszírozás szükségességét. A jelentés szerint a jelenlegi légszennyezés csökkentését célzó szakpolitikák nem elegendőek és elengedhetetlen a légszennyezés problémájának ágazatokon átívelő, integráltabb megközelítése. A Világbank jelentése rámutat, hogy a világban a városok levegő szennyezettsége növekszik, különösen a fejlődő világ városaiban, ahol a PM_{2,5} koncentráció jóval magasabb, mint a fejlett országokban. Az 1. Ábra az átlagos PM_{2,5} koncentráció értékeket mutatja a Világbank jövedelmi ország-csoportok városaiban 2000-ben és 2015-ben. A vizsgált időszakban az átlagos légszennyezés minden jövedelmi osztályhoz tartozó városban növekedett: a legjelentősebb mértékben (10,5%) az Alsó-közepes jövedelmű (Lower-middle income) országokban, a legkisebb mértékben (1%) a Magas jövedelmi (High-income) ország-csoportban.



1. ábra. Átlagos PM_{2,5} városi légszennyezés koncentráció jövedelmi ország-csoportonként, 2000-2015

Forrás: (World Bank, 2025)

A természeti vagyon védelme és a gazdasági tevékenység okozta externáliák, mint például a légszennyezés, negatív hatásainak csökkentése összetett szakpolitikai feladat, amelynek egyik

⁴ A UN SDG határozat szerint míg a fejlett országokban 10 városi lakos közül 6-7 élvezi a zöld közterületekhez való hozzáférést, addig a fejlődő világban ez a szám 3.

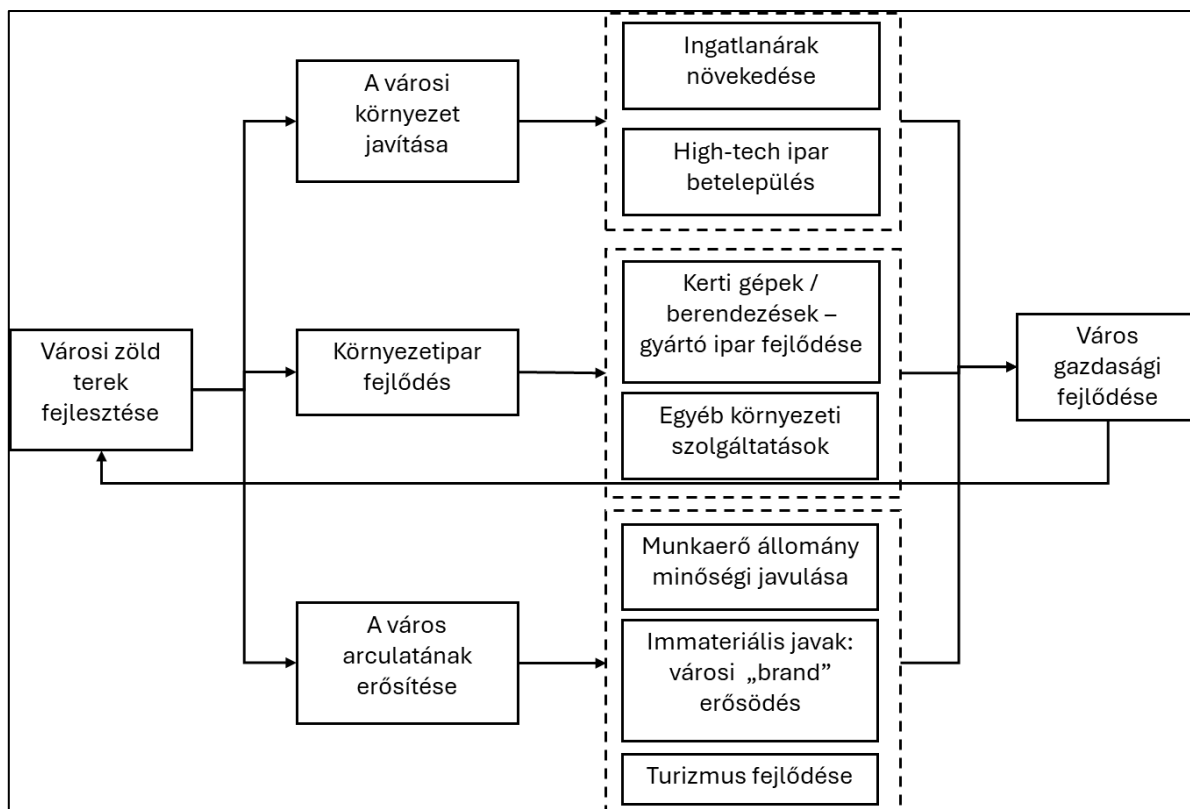
legfontosabb kérdése a beavatkozások finanszírozása, vagyis az ökoszisztémák, védelmét, állapotmegőrzését, helyreállítását és fejlesztését célzó beruházások pénzügyi forrásainak előteremtése. A természeti vagyon, az ökoszisztémák nyújtotta szolgáltatások értékének pénzben történő meghatározása összetett probléma (Barbier et al., 2023; Costanza, 2020; Croci et al., 2021; Marjainé Szerényi, 2011; Marjainé Szerényi and Kovács, 2018), ezért a természeti tőke beruházások finanszírozása elsősorban közforrásokból valósul meg. A magán forrásokból történő finanszírozás akadály, hogy a természet által nyújtott javak piaci ára nem tükrözi a természeti vagyon és a természet szolgáltatásainak valódi értékét. Azonban az Európai Bizottság Roadmap towards Nature Credits közleménye (EC, 2025) megállapítja, hogy (ennek ellenére) a közfinanszírozás mellett növekszik a természeti beruházások piaci forrásokból történő finanszírozása is, mert egyre több vállalat ismeri fel, hogy a természeti vagyon stratégiai tőke eszköz, ami új lehetőségeket teremt az értékteremtésre, a kockázatkezelésre és a gazdasági ellenállóképesség növelésére. Az említett közlemény a *természeti kreditek (nature credits)* és a kapcsolódó tanúsítvány rendszer (*certification*) bevezetését szorgalmazza, amelyek kulcsfontosságú eszközként szolgálhatnak a természeteti magánbefektetések elősegítésében. A természeti kreditek olyan pénzügyi eszközök, amelyek mindenkor piaci értékét a mögöttes környezeti beruházás ökológiai „hozama” határozza meg, amit egy független intézmény által kibocsátott tanúsítvány igazol. A természeti kredit piaci árára adott időpontban tehát a kínálati oldalról két tényező van hatással: (1) a kredit kibocsátása során megállapított addicionális gazdasági érték és (2) az ökológiai célérték irányában történt, tanúsítvány által alátámasztott előrehaladás. A kutatás eredményei mind a két tényezőt tekintve támpontul szolgálhatnak: (1) a módszerrel konkrét gazdasági érték rendelhető a városi ökoszisztéma szolgáltatások összességéhez, ill. (2) alkalmas mutató kerül bemutatásra az ökológiai célérték felé történő előrehaladás nyomonkövetéséhez.

Városi ökoszisztémák és ökoszisztéma szolgáltatások

A város természeti vagyona, a zöld infrastruktúra, vagyis a városi ökoszisztémák kiterjedése és állapota, ill. az ezek által nyújtott VÖSZ közvetlenül kapcsolatba, oksági összefüggésbe hozhatók a városok társadalmi-gazdasági működésének eredményességével, hatékonyságával.

A városi ökoszisztémák bonyolult ökológiai rendszerek, amelyeket az élőlények és az élettelen környezetük szerves egységeként, az ember által létrehozott környezetben, azzal szoros kölcsönhatásban történő működés jellemez. Az ebben a komplex rendszerben megjelenő élőhelyek összessége (biotóp) és az élővilág (biocönózis) sokfélesége (biodiverzitás), az ökoszisztémák kiterjedése és állapota határozza meg a természet által a város társadalmi-gazdasági rendszerének működéséhez nyújtott támogatás, a VÖSZ mennyiségi és minőségi karakterét. A városi ökoszisztémák tehát fontos erőforrást nyújtanak a városi közösség életéhez és a város gazdaságának működéséhez. Az 2. Ábra elvi sémán mutatja be a városi zöld terek, ökoszisztémák fejlesztésének a város gazdaságának növekedésére gyakorolt hatását. Az ábrán bemutatott elvi sémából következik, hogy a város természeti vagyonába történő beruházás a városi környezet javításán túlmenően elősegíti a környezetipar fejlődését és erősíti a város arculatát is. Ugyanakkor, a város gazdaságának erősödése pozitív hatással van a város természeti környezetének fejlődésére.

Az ismert Kuznets hipotézis a városi térségekre különösen érvényes, mely szerint a gazdasági fejlettség korai szakaszában a gazdaság teljesítményének növekedésével nő a környezetszennyezés, majd egy bizonyos fejlettségi szint elérésével a környezeti terhelés csökken. Ezt az összefüggést hagyományosan fordított U alakú görbe ábrázolja (3. ábra), de a téma kiterjedt szakirodalma a kölcsönhatást számos összetettebb görbével is megjeleníti (Kerekes, 2007).

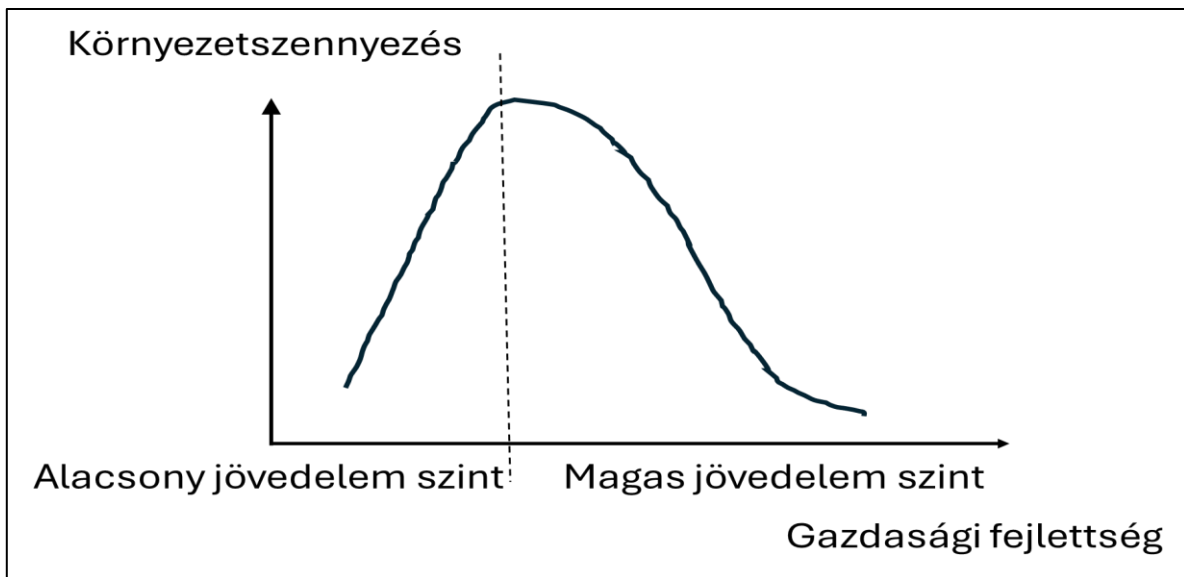


2. ábra. A városi zöld terek (infrastruktúra) fejlesztésének hatása a város gazdasági fejlődésére

Forrás: Saját szerkesztés (Zhou et al. (2022) alapján)

A Kuznetz görbék elméletének megfelelően alacsony gazdasági teljesítmény tartományokban a gazdaság növekedésével a környezet terhelése, beleértve a légszennyezést, növekszik, magasabb tartományokban csökken. Megfordítva: kis légszennyezettség (koncentráció) hatása a gazdaság növekedésére korlátozott, vagyis alacsony tartományban a légszennyezés növekedése, bár növelheti pl. az egészségügyi költségeket, nem gyakorol érdemi negatív hatást a gazdaság teljesítményére. A tanulmányban bemutatott kutatás ilyen alacsony légszennyezettségi tartomány ($PM_{2,5} < 25 \mu g/m^3$) megfigyeléseit vizsgálta: az Európai Unió Kárpát-medence régió Funkcionális Városi Területek (Functional Urban Area, FUA) esetében vizsgálta a városi VÖSZ, a légszennyezés csökkentés és a FUA gazdasági teljesítménye közötti összefüggéseket, ill. tett kísérletet a VÖSZ értékének meghatározására.

A városi természeti környezet és a város társadalmi-gazdasági működése közötti összefüggés témájának szakirodalma folyamatosan bővül. Farkas és szerzőtársai (2023) átfogó bibliometriai elemzést közölnek az elmúlt három évtized városi zöld terek vizsgálatának publikációkról. Az ökoszisztéma szolgáltatások igen sokféle módon gyakorolnak hatást az emberek életére, amelyek társadalmi, gazdasági, egészségügyi és környezeti hatáscsoportokba rendezhetők (Tate et al., 2024). Széleskörű kutatási eredmények erősítik meg a városi ökoszisztémák pozitív hatását a lakosság egyézségi állapotára: csökkentik a szív- és érrendszeri, valamint a légúti betegségek és az elhízás okozta halálozást, továbbá a 2-es típusú cukorbetegség kockázatát (Nguyen et al., 2021).



3. ábra. Környezeti Kuznets-görbe

Forrás: saját szerkesztés

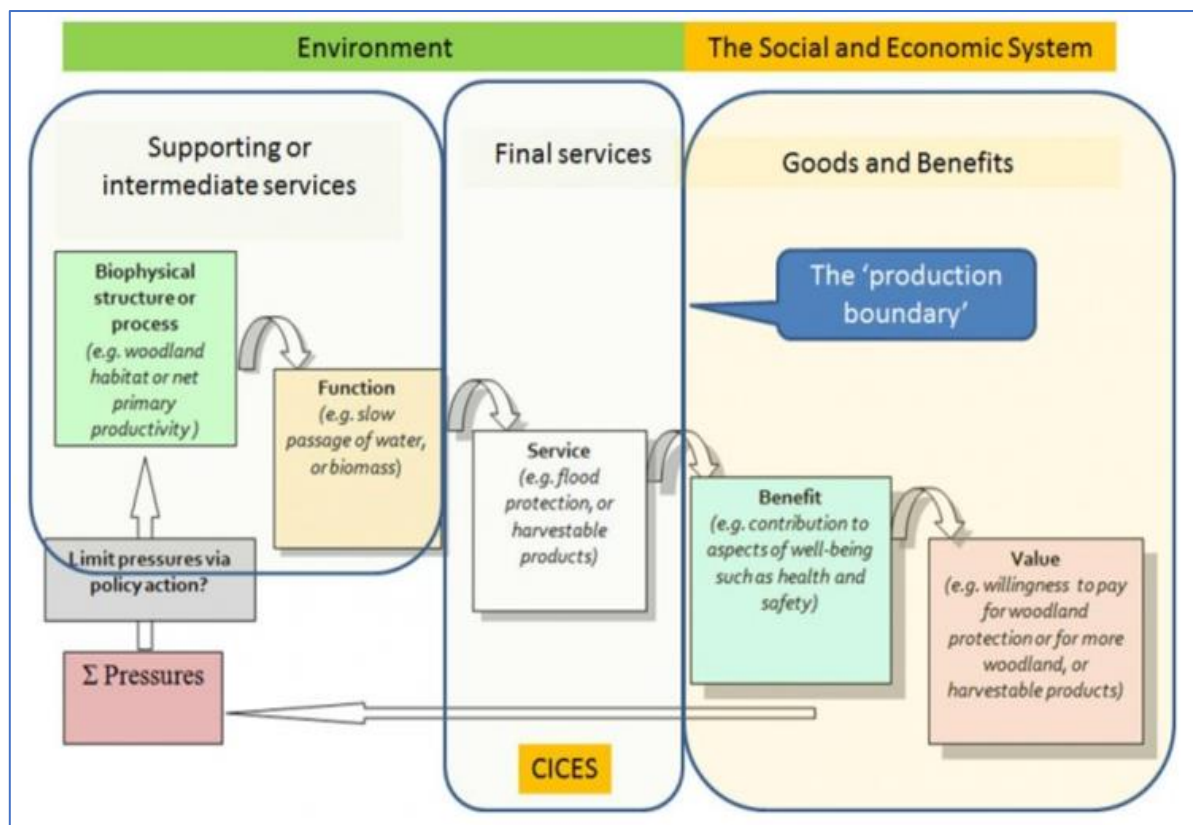
Az ökoszisztéma szolgáltatások (beleértve a városi ökoszisztémák nyújtotta szolgáltatásokat) valamilyen formában történő mérésére a tudományos világ már régóta tesz kísérleteket, amely során szükségessé vált a különböző módszertanok és metodikák egységesítése. Az Európai Környezetvédelmi Ügynökség 2016-ban egy egységes osztályozást (Common Classification of Ecosystem Services, CICES, cices.eu), és ahhoz kapcsolódóan egy u.n. kaszkád modellt dolgozott ki az ökoszisztémák és az ÖSZ csoportosítására és azok gazdasághoz való kapcsolódásának megjelenítésére (Haines-Young and Potschin, 2010). A CICES szorosan kapcsolódik az ENSZ által kidolgozott környezeti statisztikai számlák nemzetközi szabvány rendszeréhez (SEEA⁵).

A 4. Ábra szerint az ökoszisztémák egyfelől segítenek az élőhelyek fenntartásában, biomasszát képeznek, ezáltal jobb vízháztartást is biztosítanak (*Supporting, vagy intermediate services*). Ezekre az úgynevezett elsődleges, *támogató szolgáltatásokra* épülnek a funkcionális szolgáltatások (Final services), amelyek három csoportba oszthatók⁶:

- *Ellátó szolgáltatás (Provisioning)*: az ökoszisztémák által előállított javak és szolgáltatások széles köre: élelem, ivóvíz, rostok, gyógyszer alapanyag, genetikai alapanyagok, egyéb alapanyagok, ásványok, energiaforrások;
- *Szabályozó szolgáltatás (Regulation and Maintenance)*: Minden olyan folyamat, amely során az ökoszisztémák vezérlik, vagy módosítják az emberi környezetet alkotó biotikus és abiotikus paramétereket;
- *Kulturális, rekreációs szolgáltatás (Cultural)*: az ökoszisztémák nem anyagi jellegű, általánosságban nem kizárólagos (non-rival) és nem elfogyasztható szolgáltatásai, amelyek hatnak az emberek fizikai és mentális állapotára.

⁵ <https://seea.un.org/>

⁶ Az ökoszisztéma szolgáltatások részletes, frissített leírását a CICES táblázata tartalmazza: [CICESV41.xlsx](#)



4. ábra. Az ökoszisztéma szolgáltatások kaszkád rendszere

Forrás: <https://cices.eu/> (Haines-Young and Potschin, 2010)

Az ökoszisztéma szolgáltatások társadalmi-gazdasági hasznának (benefit) megragadása biofizikai mutatók felhasználásával történik (pl. az egységnyi városi fás terek által egy év alatt megkötött CO₂ mennyisége, kgCO₂/ha/év). Ezt követi ezen hasznok gazdasági értékének (value) meghatározása, amely azonban igen komoly kihívást, számos elméleti és gyakorlati problémát vet fel.

A városi ökoszisztémák, azon túl, hogy élőhelyként funkcionálnak, hatásuk legfőképpen a légszennyezés csökkentés, a városi „hő-szigetek” csillapítása, a zajszűrés és a biodiverzitás növekedése területén érzékelhető, követhető és mérhető. A globális éghajlatváltozás folyamatainak ismeretében a települési zöldfelületek ökoszisztéma-szolgáltatásai közül kiemelt jelentőségűek azok a szabályozó folyamatok, amelyek a település klimatikus viszonyaival és a levegőminőséggel kapcsolatosak, azaz a mikroklíma-szabályozás és a légszennyezés megkötés. A városi fák is szerepet játszanak az üvegházhatású szén-dioxid megkötésében, de ennek gazdasági értéke hazai kutatások szerint egy nagyságrenddel elmarad a szennyezőanyag-megkötés értékétől (Kiss et al., 2015).

Az urbanizáció világszerte jelentős hatással van a városi zöld terek kiterjedésének és szerkezetének a változására (Nor et al., 2017). Továbbá ismeretes az is, hogy a városi közlekedés, mint koncentrált forrás, felelős a globális CO₂ kibocsátás 24%-áért, ami mennyiségben és arányában is folyamatosan növekszik (Ritchie and Roser, 2024). A két trend (a városi zöld felületek átalakulása és csökkenése, valamint a növekvő CO₂ kibocsátás) együttesen jelentősen hozzájárul a városi levegő minőségének romlásához, a légúti megbetegedések kialakulásához és következésképpen a városi élet minőségének a romlásához (Tzoulas et al., 2007). Az urbanizáció a

városi vegetációra direkt és indirekt módon gyakorol hatást. A közvetlen hatás általában negatív, ami abból következik, hogy a természetes, növényzettel borított földfelszín csökken, a burkolt felszín pedig áthatolhatatlanná válik, nem teszi lehetővé a csapadék elnyelését, a csapadékvíznek a talaj és a vegetáció által történő tárolását.

A növényzetre gyakorolt közvetett urbanizációs hatást általában a városokban alkalmazott emberi gazdálkodási gyakorlat és a környező természeti területekhez képest magasabb levegő hőmérséklet határozza meg. Egy kutatás (Zhang et al., 2022) arra tett kísérletet, hogy globálisan vizsgálja meg az urbanizáció hatásait a városi zöldfelületek nagyságának változására. 2001 és 2018 között a világ eltérő klimatikus adottságú, összesen 672 nagyvárosi régióját vizsgálták meg. A városi vegetáció produktivitását és nagyságának változását műholdfelvételek segítségével elemezték. Jelentős különbségeket figyeltek meg a fejlett és a fejlődő országok nagyvárosai között, de általánosságban megállapították, hogy az urbanizáció közvetlen és közvetett hatásai a zöldfelületek csökkenését okozták.

Az urbanizáció az ökoszisztémák és a biodiverzitás összefüggéseivel foglalkozik Elmqvist és szerzőtársai mintegy 700 oldalas átfogó szakkönyve (Elmqvist et al., 2013), ami számos nagyváros példáján keresztül elemzi a városi ökoszisztémák helyét és szerepét a városok életében. A könyv Városi Ökoszisztéma Szolgáltatások című fejezete tárgyalja a városi ÖSZ klasszifikációjának kérdését, azokat ugyanarra a három nagy kategóriába osztva, mint a nem városi ökoszisztémák esetében: ellátó, szabályozó és kulturális szolgáltatások. Azonban ezek tartalmi elemei specifikusan a városi szolgáltatásoknak felelnek meg:

Ellátó VÖSZ:

- Élelmiszerek: a városszéli mezőgazdasági területek, tetőteraszok, hátsó udvarok és közösségi kertek szolgáltatása;
- Vízellátás: az ökoszisztémák biztosítják az esővizek tárolását és szabályozott lefolyását későbbi felhasználásra;

Szabályozó VÖSZ:

- A városi hőmérséklet szabályozása;
- Levegő szűrés, légtisztítás;
- Zajcsökkentés;
- Klimatikus szélsőségek csillapítása;
- Villámvizek csillapítása,
- Szerves hulladékok lebontása;
- Beporzás, növényi magok szétszórása;
- Kártevők, fertőzések csökkentése;
- Hozzájárulás a globális klímaszabályozáshoz;

Kulturális VÖSZ:

- Rekreáció;
- Esztétika
- Humán fiziológia
- Ökológiai tudatosság erősítése,
- Lakhely értékének növelése (pl. ingatlanárak);
- Társadalmi kohézió erősítése.

A szakirodalom a városi ökoszisztémákba történő gyakorlati beavatkozások három típusát különbözteti meg:

- a) a városi közösség számára korábban elhagyott helyen új zöld, vagy kék terek⁷, pl. park, tó vagy fásított sugárút létesítése;
- b) létező zöld, vagy kék terek állapotának, karakterének, szolgáltatásainak fejlesztése;
- c) a létező zöld és kék terek használatát elősegítő, promótáló társadalmi kezdeményezések, programok indítása.

Kutatások erősítik meg, hogy ezeknek a beavatkozásoknak a hatékonyságát erősíti, ha azok tartalmazzák mind a fejlesztési, mind a használatukat elősegítő programok megvalósítását (Hunter et al., 2019). A globális éghajlatváltozás folyamatainak ismeretében a települési zöld-felületek ökoszisztéma-szolgáltatásai közül kiemelt jelentőségűnek tekinthetők azok a szabályozó folyamatok, amelyek a település klimatikus viszonyaival és a levegőminőséggel kapcsolatosak: a mikroklíma-szabályozás és a szennyezőanyag-megkötés. A városi fák is szerepet játszanak az üvegházhatású szén-dioxid megkötésében, de ennek gazdasági értéke, a korábban említettek szerint csekély; a szénmegkötés és -tárolás döntő többségben a külterületeken elhelyezkedő, természetes vagy természetközeli erdőkhez köthető.

A fenntarthatóság vagyoni szemléletének rendszerében⁸ a városi ökoszisztémák a nemzet természeti vagyonának, tőkájának fontos elemei, amelyek értéke, különböző becslési módszerekkel pénzben kifejezhető. Ezek a „nem piaci” módszerek általában közvetett módon igyekeznek megállapítani egy-egy ökoszisztéma szolgáltatás áram értékét (például egy városi zöld felület levegőszűrő hatása, amelynek következtében csökken az éves légúti megbetegedések száma, és amelyhez kapcsolódóan számolható az egészségügyi rendszer éves költségeinek csökkenése). Ilyen módszerekkel és a jövőbeli megtakarítások jelenértékének számításával elvben meghatározható a városi ökoszisztéma társadalmi-gazdasági értékének egy szelete, ami azonban, mivel csak egy adott ökoszisztéma szolgáltatásra vonatkozik, nem extrapolálható, nem terjeszthető ki az ökoszisztéma teljes egészének értékére.

Az érték meghatározás másik lehetséges iránya az ökoszisztémákba történő beruházások költség-haszon becslése pl., hogy egy városi fásítási program eredményeképpen hogyan nő az VÖSZ árama (CO₂ elnyelés, hőcsillapítás, levegőszűrés stb.), ill. ezek pénzben kifejezhető értéke. Ezek a számítások azonban továbbra sem vonatkoznak az olyan ökoszisztéma szolgáltatások pénzben nem kifejezhető értékére, mint például az esztétikai élmény, ill. ezek hatása a városi *jó életre*, és következésképpen az ökoszisztémák értékét sem képesek teljességükben megragadni.

Kutatás módszertani propozíció

A kutatás célja a városi ökoszisztéma szolgáltatások összessége gazdasági értékének a meghatározása volt. Az alkalmazott módszertan újdonsága az, hogy nem egyes VÖSZ-ok értékének a

⁷ A zöld terek fás, bokros, gyepes területeket, a kék terek, vízfolyásokat, tavakat jelentenek.

⁸ A fenntarthatóság vagyoni szemlélete egy makroökonómiai elmélettel alátámasztott keretrendszer, mely szerint a társadalmi-gazdasági rendszer adott időszakban fenntarthatóan működött, ha a vagyonelemek összessége, a fizikai, humán és természeti tőke vagyon értéke együttesen nem csökken. Ez a vagyoni szemléletű fenntarthatóság gyenge kritériuma. A fenntarthatóság szigorú kritériuma nem engedi meg a kritikus természeti tőkevagyon, az ökoszisztémák értékcsökkenését. Tehát az ökoszisztémák változásával kapcsolatos vizsgálatok kitéüntetett szerepet játszanak a fenntarthatósági elemzésekben (Kovács, 2023).

meghatározására törekszik, hanem a város természeti tőkéje, a zöld infrastruktúra⁹ által nyújtott szolgáltatások teljessége gazdasági értékének a meghatározását célozza. A Kutatás módszertana két propozícióra és az ezekből következő hipotézis vizsgálatra épült. Ebben a módszertani keretben a VÖSZ-ok értékmeghatározása két szemléleti irányból, szakirodalmi adatok alapján és geoinformatikai adatok felhasználásával történt.

A légszennyezés a városok lakosságát érő egyik legjelentősebb egészségkárosító veszélyforrás. Vagyis a városi ökoszisztémák légszennyezés csökkentő hatása az egyik legfontosabb VÖSZ. Egészségügyi hatásait tekintve a legjelentősebb a 2,5 μm -nél kisebb részecske méretű szállópor ($PM_{2,5}$) koncentrációja ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). A légszennyezés megkötés a városi zöld infrastruktúra részét képező zöld felületeken történik, ami a város részére számos más VÖSZ – t (pl. mikroklíma szabályozás, esztétikai élmény stb.) is nyújt és ezért a $PM_{2,5}$ szállópor koncentráció csökkentése szorosan összefügg számos más típusú VÖSZ-sal.

Propozíció 1

A $PM_{2,5}$ szállópor koncentráció csökkentés a VÖSZ-ok összességét jellemző proxy mutató.

Indoklás: A város természeti tőkéje, az ökoszisztémák sokrétű szolgáltatást nyújtanak a város lakossága és a gazdaság részére, amely szolgáltatások egymással összefüggésben, kölcsönhatásban vannak, ezért a városi ökoszisztéma szolgáltatások összességének társadalmi-gazdasági rendszerre gyakorolt hatása nem azonos az egyes ökoszisztéma szolgáltatások hatásainak összegével, ellenben a $PM_{2,5}$ szállópor koncentráció csökkentése a VÖSZ-ok összességét jellemző attribútum.

Propozíció 2

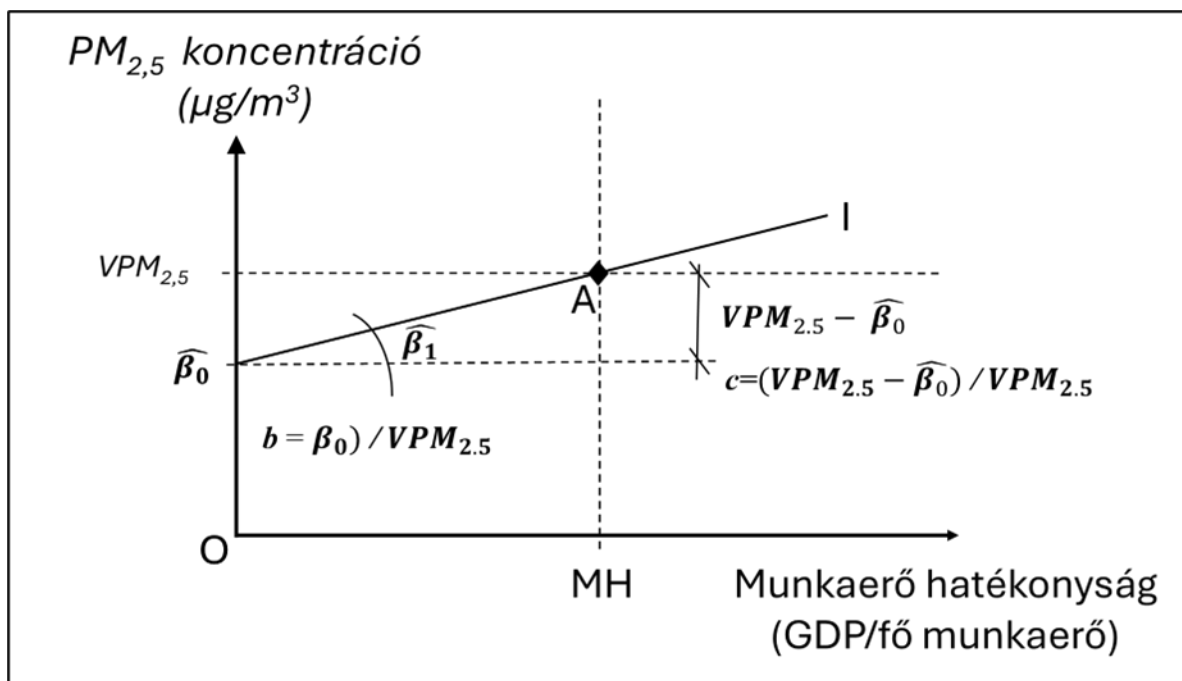
A VÖSZ-ok összességének gazdasági értéke a $PM_{2,5}$ szállópor koncentráció csökkentése által okozott munkaerő hatékonyság¹⁰ növekedés (0).

Indoklás: Az 5. Ábrán a vízszintes tengely az egy fő munkaerőre számított hatékonyság (GDP/fő munkaerő), a függőleges tengely a $PM_{2,5}$ légszennyezés koncentráció ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). **I** a FUA populációt jellemző regressziós egyenes β_0 metszésponttal és β_1 meredekséggel. A légszennyezettség várt értékét a munkaerő hatékonyság (MH) és a regressziós egyenes **A** metszéspontja jelöli ki.

A légszennyezés koncentráció csökkentés VÖSZ hatását a sárga, hipotetikus **H** egyenes szemlélteti, vagyis a légszennyezés koncentráció csökkentés hiányában az **I** egyenes $\Delta PM_{2,5}$ értékével függőlegesen felfelé tolódná (1 nyíl). Mivel a VÖSZ, vagyis a légszennyezés koncentráció csökkentés a valóságban végbemegy, ezért **H** egyenes vízszintesen jobbra tolódik, vissza az **I** egyenes eredeti állapotába (2 nyíl, a **C** pont az **A** pontba). Ennek megfelelően ΔMH (C-A szakasz) a $\Delta PM_{2,5}$ légszennyezés koncentráció csökkentést eredményező VÖSZ gazdasági értéke.

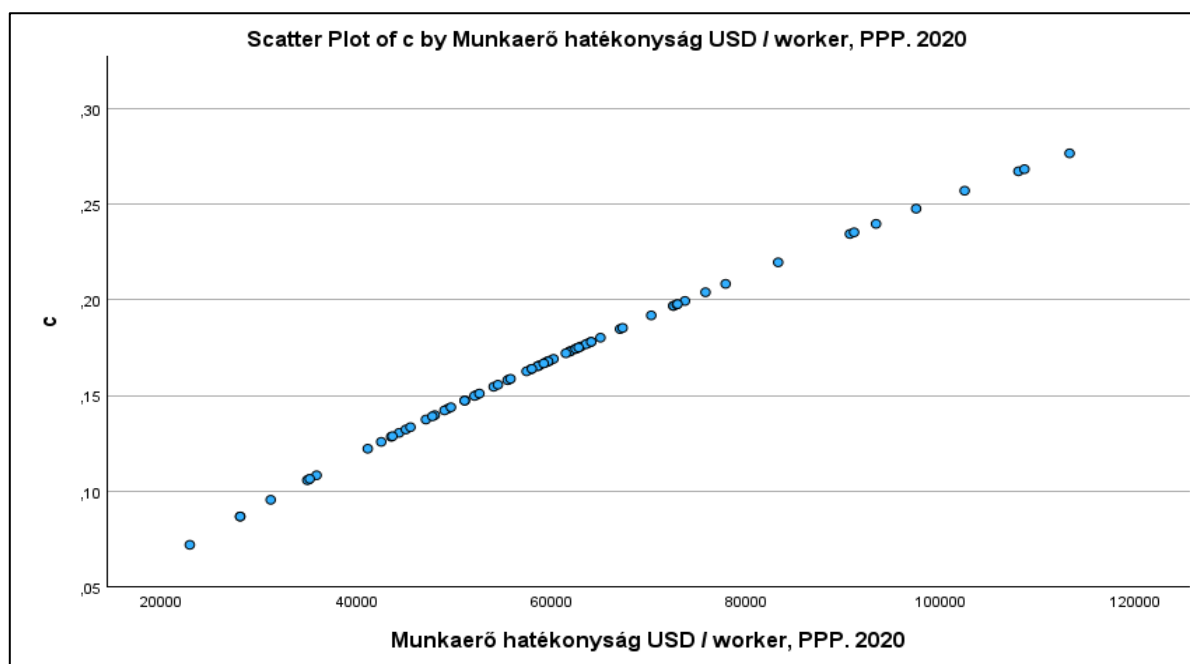
⁹ A zöld infrastruktúra, ahogy a neve is jelzi, a fás, bokros és füves területek összességét jelenti és nem terjed ki a város vizes felületeire, tavakra és vízfolyásokra.

¹⁰ A munkaerő hatékonyság az egységnyi munkaerő (fő) által előállított kibocsájtás (GDP-ben mért jövedelem). A FUA esetében a FUA GDP-jének egy fő munkaerőre számított értéke.



6. ábra. Az oksági összefüggés konstans és változó részeinek aránya

Forrás: saját elemzés



7. ábra. A légszennyezés csökkentés hatásának változó részaránya a munkaerő hatékonyság függvényében

Forrás: saját elemzés

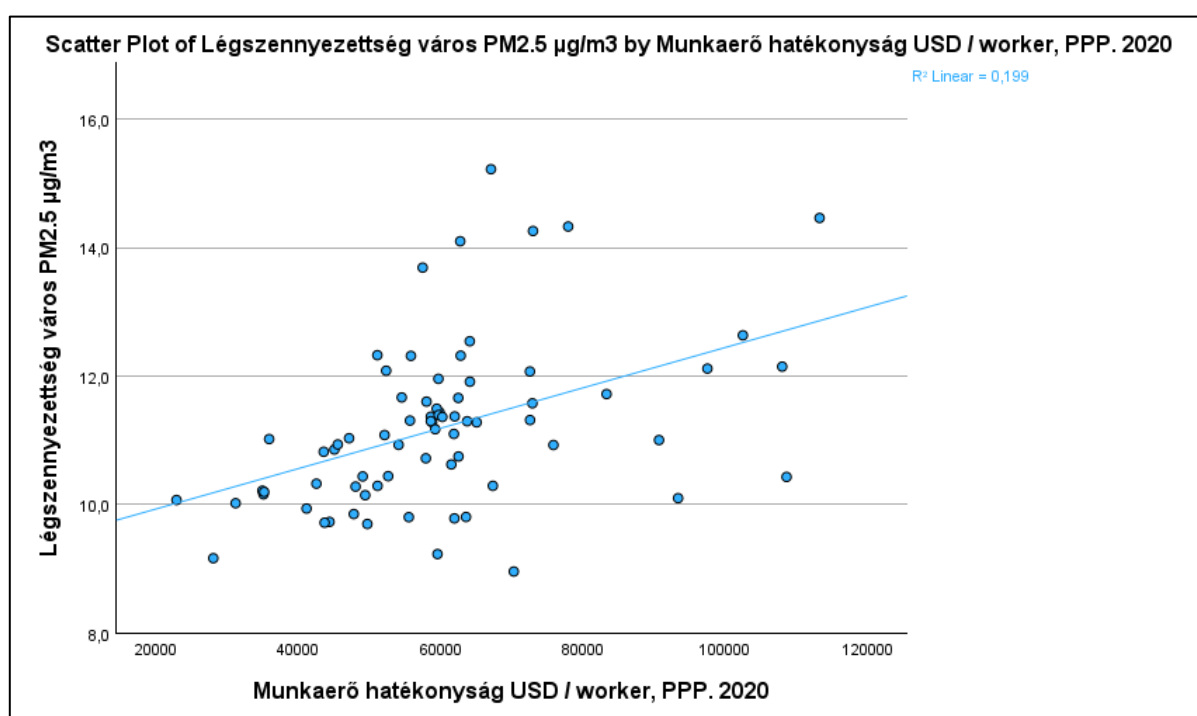
A **Propozíció 2** és **Propozíció 3** alátámasztásához szükséges az 5. ábrán bemutatott összefüggés, vagyis annak a hipotézisnek a megerősítése, hogy az együttmozgáson (korreláció) kívül van-e oksági összefüggés a gazdasági teljesítmény (munkaerő hatékonyság) és a légszennyezés koncentráció között¹¹.

¹¹ Az oksági összefüggés vizsgálatát a Kutatási eredmények fejezet mutatja be.

Hipotézis H1: A légszennyezettség $PM_{2,5}$ koncentrációja ($\mu g/m^3$) oksági összefüggésben van a város gazdasági teljesítményét kifejező munkaerő hatékonysággal (GDP/fő).

Indoklás: A $PM_{2,5}$ koncentráció növekedését lényegében a gazdasági tevékenység intenzitásának növekedése okozza, mint negatív externália. Tehát ebben az értelemben tautológia az az állítás, hogy a légszennyezettség változása oksági összefüggésben van a gazdaság teljesítmény változásával.

A 8. ábra a Kárpát-medence régió 77 FUA gazdasági teljesítmény (munkaerő hatékonyság) és $PM_{2,5}$ városi légszennyezés koncentráció adatait ábrázolja. Várakozás szerint a pontthalmaznak követni kellene a 0n bemutatott környezeti Kuznetz-görbe alakját. A későbbiekben tárgyalt regresszió elemzés során a munkaerő hatékonyság magasabb, kvadratikusan hatványának együtthatója nem bizonyult statisztikailag szignifikánsnak, ezért a lineáris oksági összefüggés feltételezése, a 8. ábrán látható illesztő görbe szerint, kiterjedt az összes, 77 FUA adataira.



8. ábra. Munkaerő hatékonyság és légszennyezettség, 77 FUA, Kárpát-medence régió

Forrás: saját szerkesztés, OECD adatok alapján

Szakirodalmi áttekintés

Ez a fejezet a kutatáshoz tematikusan közvetlenül kapcsolódó szakirodalmat tekinti át. A város és a városi ökoszisztémák, vagyis a város zöld és kék terei és a városi épített környezet, infrastruktúra komplex kapcsolata lényegében azt jelenti, hogy a városi ökoszisztémák a város társadalmi-gazdasági rendszerének szerves részét, működési tényezőjét alkotják.

Az áttekintett szakirodalmi területek:

1. Makroökonómiai elméleti szakirodalom
2. Az ökoszisztémáknak a város működésére gyakorolt hatását bemutató szakirodalom

3. A városi ökoszisztémák gazdasági értékelési módszereit bemutató szakirodalom
4. A városi zöld felületek légszennyezés csökkentő hatását tárgyaló szakirodalom
5. A légszennyezés és a gazdasági teljesítmény közötti összefüggéseket tárgyaló szakirodalom

Ezek közül az 5. szakirodalmi terület áttekintése a következő: A városok gazdasági működése, hatékonysága és a légszennyezés közötti oksági összefüggés vizsgálata összetett feladat. Egyrészről, a város gazdasági aktivitása növeli a légszennyezést, elsősorban az ipari termelés, a közlekedés és a lakosság fűtési célú energifelhasználása következtében. Másrészről, a levegőszennyezés negatív hatással van a város gazdaságának működésére az egészségre gyakorolt negatív hatás, a magasabb egészségügyi költségek, a csökkenő termelékenység miatt, de okozhatja a beruházások és a turizmus csökkenését is. Tehát az oksági összefüggés kétirányú.

A kutatás részeként folytatott további szakirodalmi elemzések megerősítik, hogy a levegőszennyezés különböző mechanizmusokon keresztül negatívan befolyásolja a gazdaság működését, pl. a munka termelékenységét. Ding és szerzőtársai Kína magas légszennyezettségű városaiban vizsgálta ezt a hatást (Ding et al., 2024) és rámutatott, hogy a levegőminőség javítása növelheti a termelékenységet, ami így módon a városirányítás és a város környezeti, fenntarthatósági politikáinak kritikus területévé válik. Szembetűnő azonban, hogy a Ding és szerzőtársai által vizsgált városok $PM_{2,5}$ szennyezettségi szintje ($21-42 \mu g/m^3$) jellemzően jóval meghaladja a kutatás során vizsgált kárpát-medencei városok légszennyezés szintjét ($PM_{2,5}$ $9-15 \mu g/m^3$), ill. az európai határértéket ($PM_{2,5}$ $25 \mu g/m^3$). (Lin et al., 2024) 155 kínai város megfigyelési adatait közli. A $PM_{2,5}$ koncentráció adatok átlaga $45.33 \mu g/m^3$. A legalacsonyabb mért koncentráció $14.13 \mu g/m^3$, a legmagasabb $91.47 \mu g/m^3$. Az 1. táblázat néhány kárpát-medencei város átlagos levegőszennyezettségi adatait mutatja.

Kutatási módszer

A kutatási módszer saját fejlesztésű, a szerző ismerete szerint közvetlen szakirodalmi hivatkozása nincs. A statisztikai és regresszió elemzés az IBM SPSS Statistics statisztikai szoftverrel történt.

Oksági összefüggés a gazdasági teljesítmény és légszennyezettség között

A gazdasági teljesítmény, vagyis a munkaerő hatékonyság és a légszennyezettség koncentráció közötti lineáris oksági összefüggést a β_0 és β_1 koefficienseinek ((1) egyenlet) becslése, a (2) regressziós egyenlet OLS elemzésével történt.

$$(1) \quad PM_{2,5} = \beta_0 + \beta_1 * MH$$

$$(2) \quad PM_{2,5,i} = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 * MH_i + \epsilon_i$$

ahol $\widehat{\beta}_0$ és $\widehat{\beta}_1$ a becsült regressziós együtthatók, $PM_{2,5,i}$ az i-dik FUA légszennyezettség koncentráció $PM_{2,5}$ értéke, MH_i az i-ik FUA munkaerő hatékonysága, ϵ_i az i-ik hibatar. Az i-ik FUA várható légszennyezettség koncentráció értékeinek, $VPM_{2,5}$, számítása a becsült regressziós együtthatókkal történik:

$$(3) \quad VPM_{2,5,i} = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 * MH_i$$

1. táblázat. Kárpát-medencei városok átlagos légszennyezettség koncentráció adatai, 2021

Case Summaries		
	City of FUA	Légszennyezettség város PM _{2.5} µg/m ³
1	Arad	11,3
2	Békéscsaba	10,9
3	Bratislava	12,1
4	Bucureşti	14,5
5	Budapest	15,2
6	Cluj-Napoca	10,9
7	Debrecen	11,4
8	Graz	11,0
9	Gyor	12,1
10	Szeged	11,4
11	Trenčín	11,2
12	Wien	12,6
13	Zagreb	14,3

Forrás: OECD

A VÖSZ gazdasági értékének számítása szakirodalmi adatok alapján

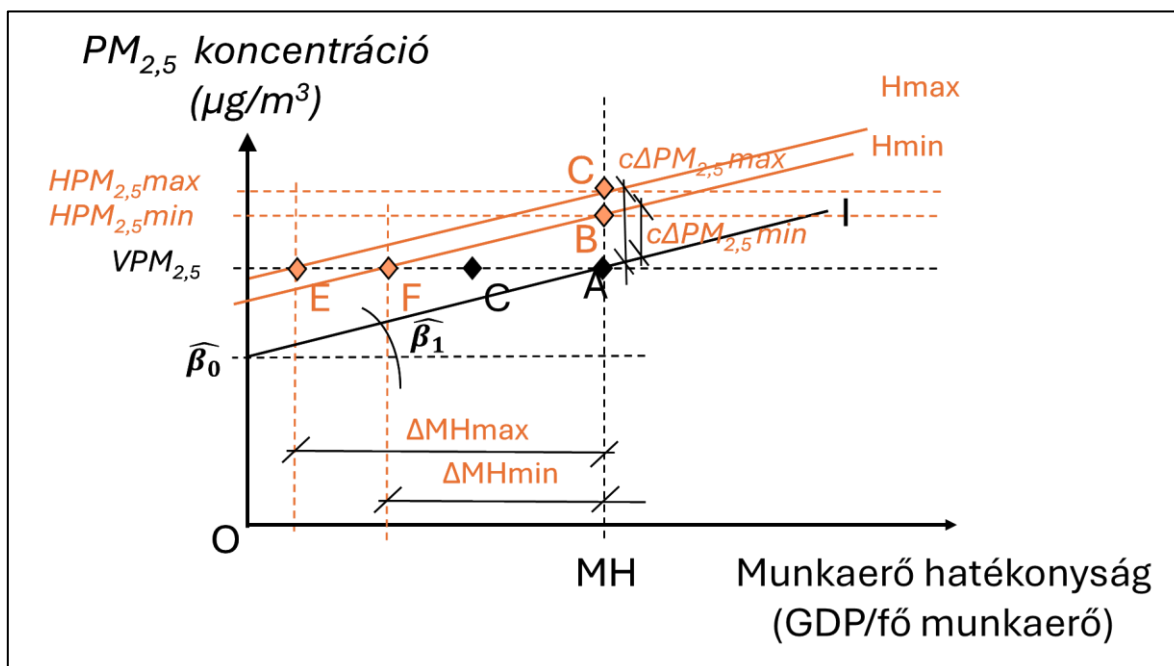
A VÖSZ gazdasági értékének szakirodalmi adatok alapján történő számítása az 5. ábrán bemutatott elv alapján a 9. ábra szerint történik. Adott FUA gazdasági teljesítményének ismeretében (munkaerő hatékonyság, MH) a (3) egyenlet szerint számítható a várható légszennyezettség koncentráció ($VPM_{2,5}$) értéke, ill. a c arány (Propozíció 3).

A szakirodalmi becslések szerint (Gong et al., 2023) a városi zöld felületek a légszennyezettség koncentrációját 16,5-26,7%-kal csökkentik ($\Delta PM_{2,5}$). A Propozíció 3 szerint (0) az I egyenes $c\Delta PM_{2,5min}$, ill. $c\Delta PM_{2,5max}$ értékkel tolódik el függőleges irányban ($Hmin$ és $Hmax$ egyenesek), ahol $c\Delta PM_{2,5min} = c \cdot \Delta PM_{2,5min}$, ill. $c\Delta PM_{2,5max} = c \cdot \Delta PM_{2,5max}$. A $Hmin$ és $Hmax$ metszéspontjai kijelölik E és F pontokat, ill. $\Delta MHmax$ és $\Delta MHmin$ értékeket. $\Delta MHmax$ és $\Delta MHmin$ a légszennyezettség koncentráció csökkentés gazdasági értéktartománya UD/fő (munkaerő, év). A FUA zöld infrastruktúrája által nyújtott éves VÖSZ gazdasági érték tartománya megfelel a min.-max értékek és a FUA munkaerő állománya szorzatának.

A VÖSZ gazdasági értékének számítása: geoinformatikai adatok módszere

A VÖSZ gazdasági értéke meghatározásának módszerét a légszennyezettség koncentráció csökkentés geoinformatikai adatok alapján történő számításával a 10. ábra mutatja. A vízszintes tengelyen MH a munkaerő hatékonyság, a függőleges tengelyen $PM_{2,5}$ a tényleges, a valószínűleg mért adatok alapján számított légszennyezettség koncentráció. A légszennyezettség koncentráció csökkentés mutatója az *Air Quality Improvement* (AQI), amelynek jelentése a légszennyezettség koncentráció csökkentés a légszennyezettség koncentrációjának %-os arányában. Az I egyenes $cAQI$ értékkel való függőleges eltolásával nyerjük H , hipotetikus egyenest.

$cAQI = c \cdot AQI^{12}$ H egyenes és a $PM_{2,5}$ vízszintes egyenes metszéke kijelöli az F metszéspontot. Az FA szakasz = ΔMH , vagyis a VÖSZ egy főre számított gazdasági értéke. A VÖSZ FUA-ra számított éves gazdasági értéke a ΔMH és a munkaerő állomány szorzata.



9. ábra. A VÖSZ gazdasági értékének számítása

Forrás: saját szerkesztés

Adatok

A kutatás során az OECD Data Explorer, Cities and functional urban areas (FUA) adatbázisából (<https://data-explorer.oecd.org/>) a Kárpát-medence régióhoz köthető 6 ország (Ausztria, Horvátország, Magyarország, Románia, Szlovákia és Szlovénia), összesen 77 FUA adatai kerültek felhasználásra. (Melléklet 1)¹³. A 11. és 12. ábra a Kárpát-medence régió 6 országa 77 FUA¹⁴ munkaerő hatékonyság és légszennyezettség koncentráció adatait, ill. leíró statisztikáját mutatja.

2. táblázat. Munkaerő hatékonyság és légszennyezettség adatok leíró statisztikája, Kárpát-medence régió FUA-k

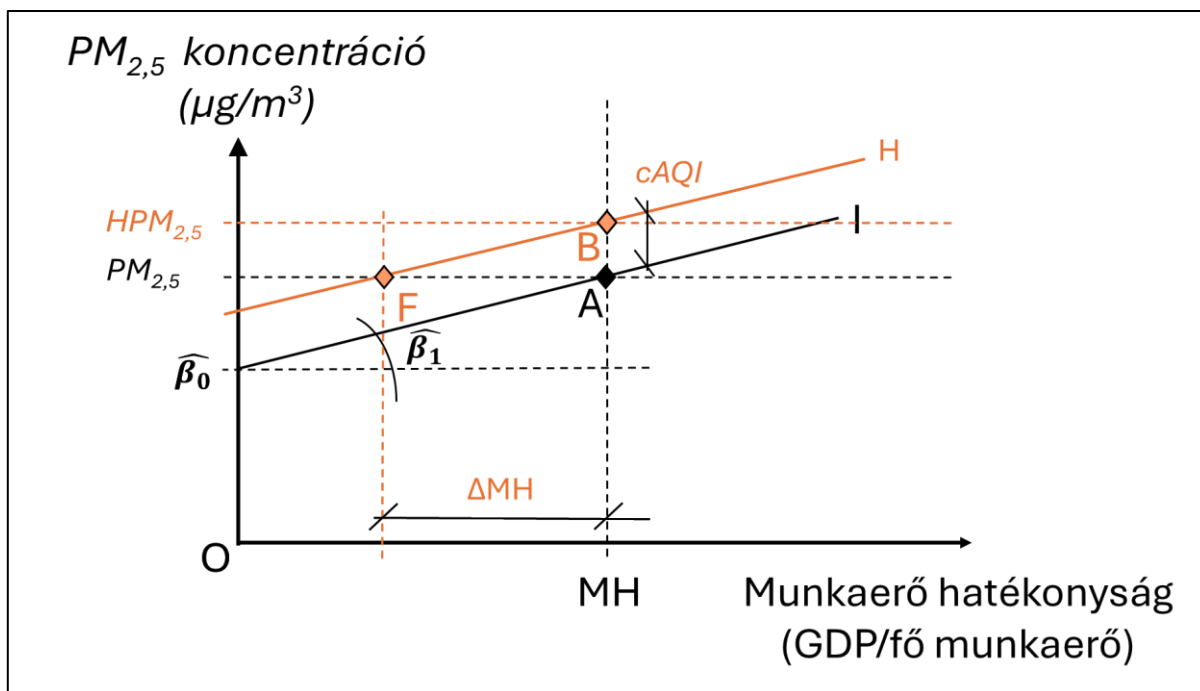
Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	77	22873	113258	60303,92	18450,336
Légszennyezettség város PM2.5 µg/m3	73	9,0	15,2	11,191	1,2764
Valid N (listwise)	73				

Forrás: saját szerkesztés, OECD adatok alapján

¹² A c arány számítása a Kutatási módszertani proposíció fejezetben közölt módszerrel történik.

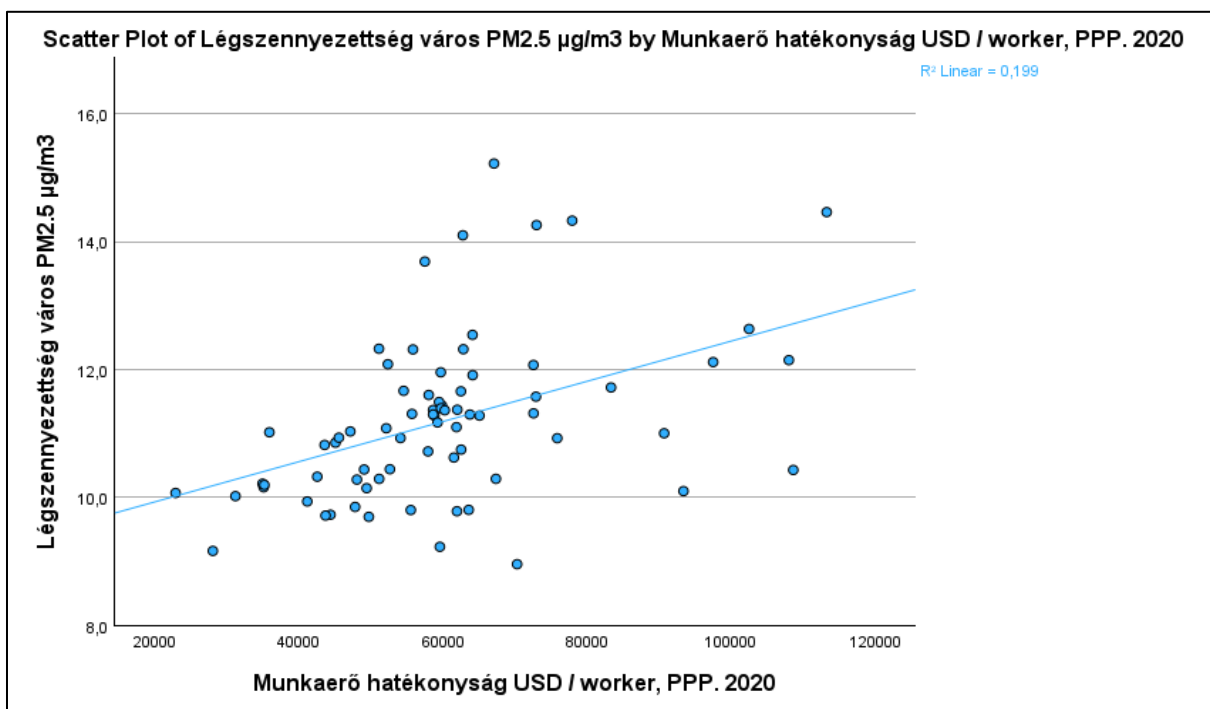
¹³ Az OECD adatok letöltése 2025. január és március között történt.

¹⁴ Hiányzó adatok miatt a légszennyezettség esetében nem 77, hanem 73 FUA adatai szerepelnek a statisztikában.



10. ábra. VÖSZ gazdasági értékének meghatározása geoinformatikai adatok alapján

Forrás: saját szerkesztés



11. ábra. Munkaerő hatékonyság - légszennyezettség, Kárpát-medence régió, 77 FUA, 2020

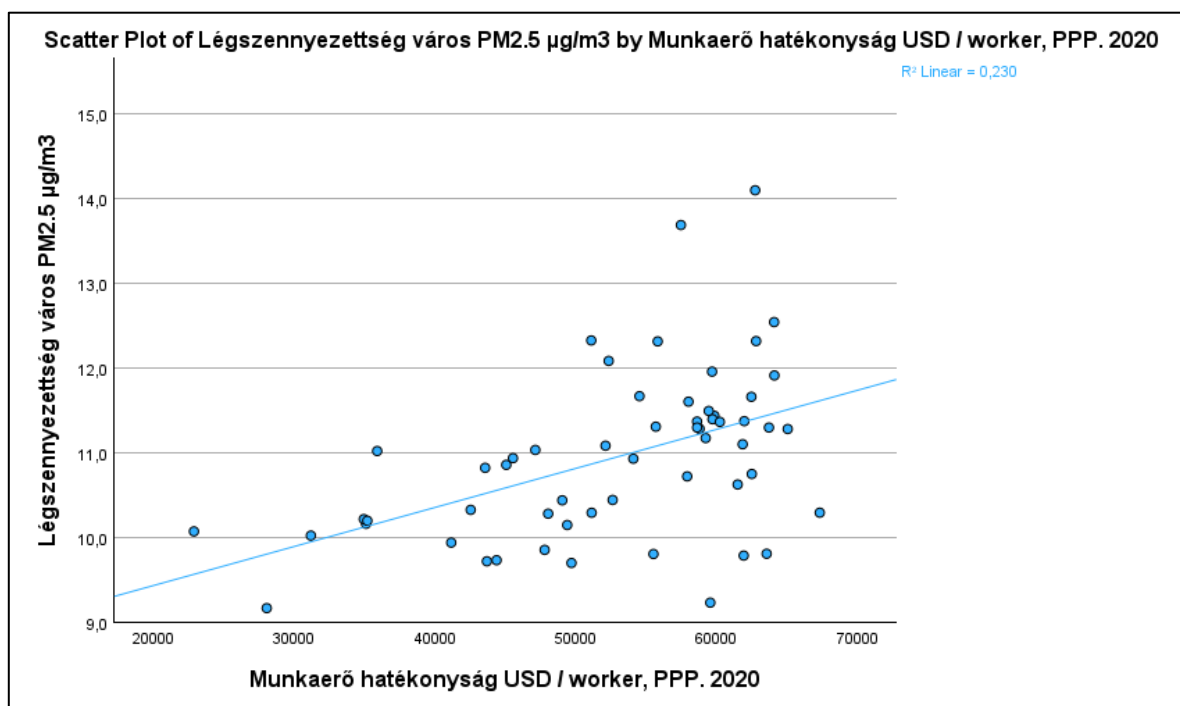
Forrás: saját szerkesztés, OECD adatok alapján

A kutatás a Kárpát-medence régió alacsony jövedelmi csoportba tartozó 59 FUA adatait vizsgálja, amelyeket a lineáris illesztő görbével a 12. ábra illusztrál ill., amelyek statisztikáját a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. Munkaerő hatékonyság és légszennyezettség adatok leíró statisztika, Kárpát-medence régió, Alacsony jövedelmi FUA csoport, 2020

Leíró statisztika					
	N	Minimum	Maximum	Átlag	Std. Deviation
Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	59	22873	67337	52528,93	10777,153
Légszennyezettség város PM2.5 µg/m3	57	9,2	14,1	10,942	,9966
Valid N (listwise)	57				

Forrás: saját szerkesztés, OECD adatok alapján



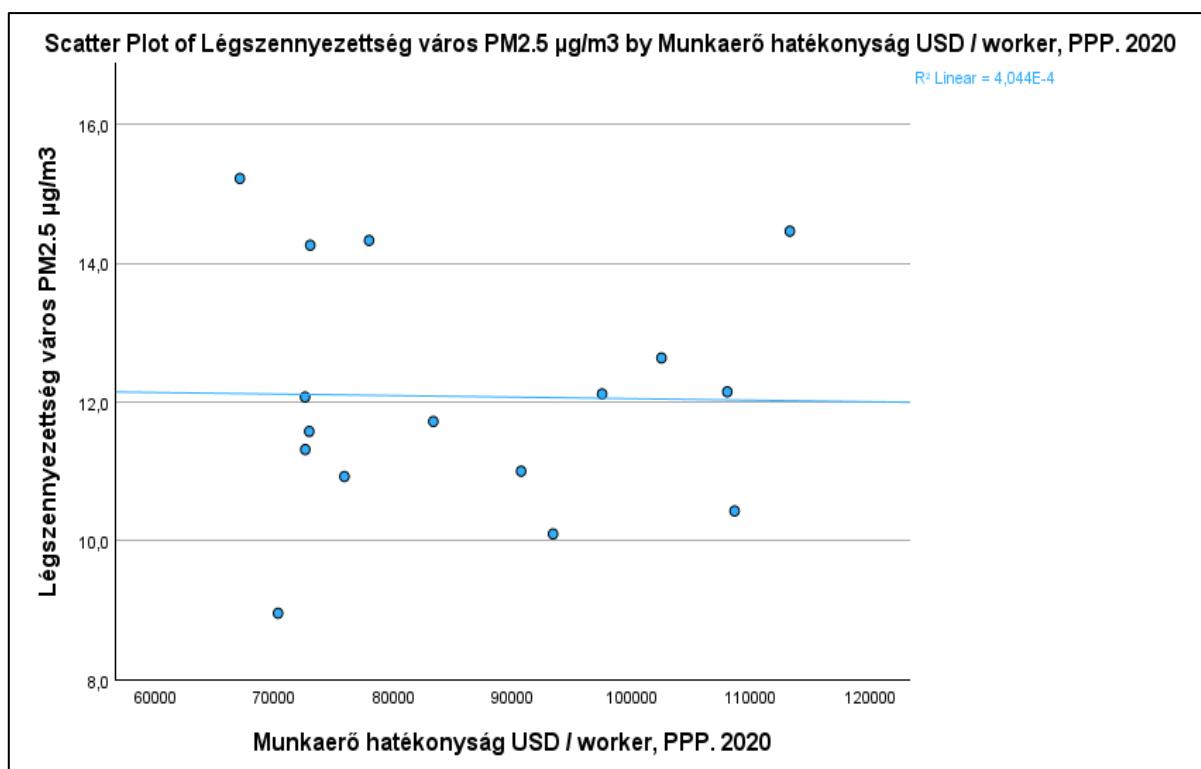
12. ábra. Munkaerő hatékonyság - légszennyezés, Kárpát-medence régió, Alacsony jövedelmi FUA csoport, 2020

Forrás: saját szerkesztés, OECD adatok alapján

4. táblázat. FUA adatok statisztika, Kárpát-medence régió, Magas jövedelmi FUA csoport, 2020

Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	18	67071	113258	85788,61	15103,524
Légszennyezettség város PM2.5 µg/m3	16	9,0	15,2	12,079	1,7422
Valid N (listwise)	16				

Forrás: saját szerkesztés, OECD adatok alapján



13. ábra. Munkaerő hatékonyság - légszennyezés, Kárpát-medence régió, Magas jövedelmi FUA csoport, 2020

Forrás: saját szerkesztés

Kutatási eredmények

Regresszió elemzés

A 11. 12. és 13. ábrákon bemutatottak szerint az Alacsony jövedelmi csoport (12. ábra) és a Magas jövedelmi csoport (13. ábra) esetében a munkaerő hatékonyság és a légszennyezettség koncentráció összefüggéseinek jellege eltérő, ami vizuálisan, az illesztőgörbék meredekségének különbségéből is érzékelhető. Az Alacsony jövedelmi (munkaerő hatékonyság) tartományban az illesztőgörbe szignifikánsan növekvő, a Magas jövedelmi tartományban enyhén csökkenő, ami lényegében megfelel a 3. ábrán bemutatott környezeti Kuznetz-görbe jellegének. Vagyis, alacsony jövedelmi (munkaerő hatékonysági) tartományban a jövedelem (munkaerő hatékonyság) növekedésével a légszennyezettség nő, magasabb jövedelmi (munkaerő hatékonyság) tartományban a munkaerő hatékonyság növekedésével a légszennyezettség csökken.

Az Alacsony jövedelmi csoport minta esetén a regressziós modell magyarázó ereje $R^2 = 0,23$, és a regressziós együtthatók statisztikailag szignifikánsak, azonban a Magas jövedelmi csoport esetén a modell magyarázó ereje elhanyagolható ($R^2 = 0,000$) és a regressziós együtthatók statisztikailag nem szignifikánsak, ami minta kis méretével is magyarázható. A Magas jövedelmi FUA csoport adatainak regressziós elemzését a Melléklet 5 tartalmazza. Figyelmet érdemel, hogy a Munkaerő hatékonyság regressziós együtthatója ugyan nem szignifikáns, de negatív, ami a környezeti Kuznetz görbe leszálló ágát jelzi.

Az Alacsony jövedelmi FUA csoport mintájával folytatott regresszió elemzés eredményeit az 5. és 6. táblázat mutatja. A 12. Ábrán láthatóan az adatok heteroskedaszticitást mutatnak, ami ugyan nem befolyásolja a regressziós együtthatók várható értékeinek torzítatlanságát (unbiasedness), de rontja a hatékonyságát (effectiveness), vagyis növeli a konfidenciaintervallumot. Az input adatok kis száma és az adatminőség bizonytalanságai miatt esetünkben ezt nem tekintjük problémának.

5. táblázat. Regressziós modell, Alacsony jövedelmi FUA csoport

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,480 ^a	,230	,216	,8823
a. Predictors: (Constant), Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020				

Forrás: saját elemzés, OECD adatok alapján

6. táblázat. Regressziós együtthatók, Alacsony jövedelmi csoport

Coefficients ^a					
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	Sig.
		B	Std. Error	Beta	
1	(Constant)	8,508	,611		13,920
	Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	4,612E-5	,000	,480	4,056
a. Dependent Variable: Légszennyezettség város PM2.5 µg/m3					

Forrás: saját elemzés, OECD adatok alapján

A regressziós modell (2) magyarázó ereje $R^2=0,23$, amely hiányzó magyarázó változókat jelez. Ezzel együtt a $\widehat{\beta}_0$ (Constant) együttható értéke 8,508, statisztikailag szignifikáns ($\text{Sig}<0,001$), úgy szintén a $\widehat{\beta}_1$ együttható (4,612E-5, $\text{Sig}<0,001$). Tehát oksági összefüggés mutatható ki a FUA gazdasági teljesítménye és a légszennyezettség koncentráció között.

A VÖSZ gazdasági értéke – szakirodalmi adatok alapján

A városi zöld felületek által nyújtott VÖSZ-ok **Propozíció 2** alapján számított min. – max. értékei a Kárpát-régió Alacsony jövedelmi csoportjába tartozó 59 FUA régió esetében (3. táblázat) kerültek meghatározásra. Ezen Kárpát FUA régiók jövedelem, egy főre számított jövedelem, ill. munkaerő hatékonyság adatok statisztikáját a 7. táblázat mutatja:

7. táblázat. Kárpát-medence FUA régiók statisztikái, Alacsony jövedelmi csoport, 2023

Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
GDP FUA, million USD PPP	59	812	9528	3518,24	2110,742
GDP FUA, USD /person, PPP	59	12064	29135	21274,17	4427,549
Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	59	22873	67337	52528,93	10777,153
Valid N (listwise)	59				

Forrás: saját elemzés, OECD adatok alapján

A légszennyezés csökkentés és az ökoszisztéma szolgáltatások értékelése a módszertani fejezetben közöltek szerint történt. A VÖSZ egy munkaerőre számított munkaerő hatékonyság növekedése, vagyis a VÖSZ egy munkaerőre számított becült min.-max. gazdasági érték tartományok statisztikáját a mutatja a 8. táblázat, a FUA VÖSZ gazdasági érték eredményeit a Melléklet 3. tartalmazza.

8. táblázat. A VÖSZ becült gazdasági értéktartomány statisztikája, 60 Kárpát-medence régió Alacsony jövedelmi csoport FUA, USD/év/fő, 2021

Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	59	22873	67337	52528,93	10777,153
Munkaerő hatság növekedés min	58	3263	9838	7599,14	1596,669
Munkaerő hatság növekedés max	58	5279	15920	12296,78	2583,701
Valid N (listwise)	58				

Forrás: saját elemzés

A 8. táblázat a VÖSZ egy munkaerőre számított gazdasági értékeit mutatja. Az OECD munkaerő állomány adatok nem minden FUA esetében állnak rendelkezésre, különösen az Alacsony jövedelmi csoport adatai hiányosak. Ezért a VÖSZ teljes FUA-ra becült gazdasági értékének (BVÖSZémin. – BVÖSZémax) számítása csak 4 Alacsony jövedelmi csoportba tartozó FUA esetén történt meg, amelyek statisztikáját a 9. táblázat mutatja. Más forrásból származó munkaerő állomány adatok használatával a VÖSZ gazdasági értéke más FUA-k esetén is becsülhető az adatok harmonizációjával kapcsolatos bizonytalanságok figyelembe vételével.

9. táblázat. A VÖSZ gazdasági teljesítményt növelő hatásának becsült értéktartománya, million USD, 2021

Descriptive Statistics			
	N	Minimum	Maximum
GDP FUA, million USD PPP	59	812	9528
BVÖSZmin	4	867	1340
BVÖSZmax	4	1403	2168
Valid N (listwise)	4		

Forrás: saját elemzés

10. táblázat. A VÖSZ gazdasági érték tartománya, millió USD, 2020

Case Summaries					
	OECD Functional Urban Area	GDP FUA, million USD PPP	BVÖSZmax	BVÖSZmin	
1	Debrecen	7217	1597	987	
2	Miskolc, FUA	6058	1403	867	
3	Podravska, FUA - Maribor	9195	2168	1340	
4	Székesfehérv	7723	1818	1123	
Total	N	4	4	4	4

Forrás: saját elemzés

A VÖSZ gazdasági értéke geoinformatikai adatok alapján

A városi zöld felületek által nyújtott VÖSZ gazdasági értékének geoinformatikai adatok alapján történő számítása a módszertani fejezetben közöltek szerint történt. A levegőminőség-javítás mutatója az **AQI**, ami a $PM_{2,5}$ koncentráció csökkentés átlagos %-os értékét jelenti, a **GA** mutató és a vizsgált **H** légréteg vastagság függvényében. A kutatás során a VÖSZ gazdasági értékének számítása az AQI H=30m és H=1500m légréteg vastagságnak megfelelő értékek alkalmazásával történt. Az AQI adatok számítása 30, ill. 31 Alacsony jövedelmi csoportba tartozó FUA központi városára történt, amely adatok statisztikáját a 11. táblázat, FUA adatait pedig a Melléklet 4 tartalmazza.

11. táblázat. Légszennyezés koncentráció csökkentés a légréteg vastagság függvényében, 1500 m és 30 m

Descriptive Statistics			
	N	Minimum	Maximum
AQI 30m légt mag	30	,1157	,3125
AQI 1500m légt mag	31	,002314	,006250
Valid N (listwise)	30		

Forrás: saját elemzés

A H=30m és 1500m légréteg magasság figyelembevételével számított légszennyezés csökkentés kétféle VÖSZ gazdasági értékét eredményez, amelynek statisztikáit a 12. táblázat, FUA értékeit a Melléklet 3 tartalmazza.

12. táblázat. VÖSZ munkaerő hatékonyságot növelő hatása, légréteg vastagság: 30m, 1500 m, 35 Kárpát FUA, USD/munkaerő, 2023

Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	59	22873	67337	52528,93	10777,153
dMHAQI30	30	1170	4101	2712,84	710,606
dMHAQI1500	31	23	82	54,71	14,204
Valid N (listwise)	30				

Forrás: saját elemzés

Hipotézis vizsgálat

Hipotézis H1: A légszennyezés $PM_{2,5}$ koncentrációja ($\mu g/m^3$) oksági összefüggésben van a város gazdasági teljesítményét kifejező munkaerő hatékonysággal (GDP/fő).

A kutatás eredményei a **H1** hipotézist megerősítették, mert a (2) lineáris regressziós egyenlet változóinak korrelációs együtthatója, valamint a regressziós együtthatók értékei szignifikánsak.

A 13. táblázat a FUA városok munkaerő hatékonyság és légszennyezettség koncentráció adatainak korrelációját mutatja. A korreláció 0,48, statisztikailag szignifikáns. Lényeges kiemelni, hogy itt a munkaerő hatékonysági adatokkal nem a FUA-k teljes területének légszennyezettség adatai kerültek viszonyításra, hanem a FUA-k gazdasági központját jelentő városok légszennyezettség adatai. Ennek azért van jelentősége, mert általánosságban a gazdasági tevékenység a FUA-n belül a városok területére koncentrálódik, tehát elsősorban a város légszennyezettsége van összefüggésben a gazdaság teljesítményével.

13. táblázat. A gazdasági teljesítmény és a légszennyezés együttlmozgása (korreláció), Kárpát-medence régió FUA, Alacsony jövedelmi csoport, 2023

Correlations			
		Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	Légszennyezett ség város $PM_{2.5}$ $\mu g/m^3$
Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	Pearson Correlation	1	,480**
	Sig. (2-tailed)		<,001
	N	59	57
Légszennyezettség város $PM_{2.5}$ $\mu g/m^3$	Pearson Correlation	,480**	1
	Sig. (2-tailed)	<,001	
	N	57	57
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).			

Forrás: saját elemzés

A (2) egyenlet szerinti regresszió elemzés eredményeként számított regressziós paraméterek statisztikailag szignifikánsak ($\text{Sig} < 0,001$, $\widehat{\beta}_0 = 8,508$ és $\widehat{\beta}_1 = 4,612\text{E-}5$). Vagyis megállapítható, hogy a Kárpát-medence régió Alacsony jövedelmi csoportba tartozó FUA-k esetében a gazdaság teljesítményével a légszennyezés növekszik, azaz magasabb gazdasági teljesítmény esetén magasabb a légszennyezés várható értéke (12. ábra). Magasabb jövedelmi tartományban a gazdasági teljesítmény növekedésével a légszennyezés csökken (12. és 13. ábra), ami megfelel a környezeti Kuznets görbék jellegzetességének, vagyis, hogy a gazdasági fejlettséggel a társadalmi-gazdasági rendszer által okozott környezeti terhelés, így a légszennyezés is, csökken. A magasabb munkaerő hatékonysági tartományban azonban jelentősen nő az adatok szórása (heteroszkedaszticitás), ami a légszennyezettséget befolyásoló sajátos egyedi (idioszinkretikus) tényezők hatását jelzi.

Az OECD adatbázisában a Kárpát-medence régió FUA adatai a korábbiakban bemutatottak szerint korlátozottak, ezért a további kutatások során célszerű kiterjeszteni a vizsgálatot nagyobb európai régióra, esetleg az összes, rendelkezésre álló FUA adatokra. Megfelelő nagyságú minta esetén kisebb munkaerő hatékonyság tartományok is kijelölhetők, amelyekkel várhatóan jobban követhető a környezeti Kuznets görbe karaktere, ill. az ismertetett módszerrel pontosítani lehet a különböző jövedelmi csoportokba tartozó FUA-k VÖSZ gazdasági értékeit.

Módszertani diszkusszió

A szakirodalmi ajánlások alapján (Gong et al., 2023), valamint geoinformatikai adatokkal előállított adatok alapján a kutatás során meghatározásra került a városi ökoszisztéma szolgáltatások összességének egy főre jutó, ill. néhány esetben a teljes munkaerő állományra vetített min. – max. érték tartománya. Ez megerősíti, hogy a szerző által kidolgozott VÖSZ gazdasági értékelési módszer általánosságban alkalmazható, vagyis a *Propozíció 1* és *Propozíció 2* szerint alkalmas a különböző forrásokból származó adatok alapján a VÖSZ összességét megragadó gazdasági érték meghatározására. Ez erősíti a módszer robusztusságát, vagyis a több adatforrás használata jobban alátámaszthatja a városi zöld infrastruktúrák védelmét, fejlesztését célzó projektek pénzübeni értékelését, projekt finanszírozási modellek tervezését és beruházási opciók összehasonlítását a piaci alapon történő finanszírozás elősegítésére. A kutatás eredményei szerint a vizsgált FUA mintára (alacsony jövedelmi csoport) vonatkozóan a VÖSZ egy főre számított teljes gazdasági értéktartománya átlagban a 7,600 – 12,000 USD/fő (munkaerő). A geoinformatikai adatok felhasználásával történt számítás szerint, 30m légréteg vastagság alkalmazása esetén az átlagos VÖSZ gazdasági érték mintegy 2,700 USD/fő, 1500m légréteg vastagság esetén 54 USD/fő. Érzékelhető, hogy a 30m légréteg vastagság alkalmazása esetén az eredmény jóval közelebb esik a szakirodalmi adatok alapján számított értéktartományhoz, mint az 1500m légréteg vastagság figyelembevétele esetén. Ez rávilágít arra, hogy a geoinformatikai módszerrel történő számítás során mind az alkalmazott légréteg vastagság, mind a légszennyezettség koncentráció eloszlás, ill. mintázat adatainak jelentősége van és ezek lényegesen befolyásolják a VÖSZ biofizikai, ill. pénzübeni értékét. Ebből a szempontból a kutatás eredményei tehát módszertani jelentőségűek és felrajzolják további kutatások igényét, ill. irányát.

A VÖSZ összességének gazdasági értéke geoinformatikai adatokból származó légszennyezettség koncentráció csökkentés alapján a kutatási módszertani propozíció szerint (Propozíció 2., 5. ábra) került meghatározásra. A módszer lényegéből adódóan bármilyen forrásból, bármilyen módszerrel előállított *gazdasági teljesítmény – légszennyezettség koncentráció és légszennyezettség koncentráció csökkentés* adatok felhasználásával számítható a VÖSZ gazdasági értéke. Ilyen értelemben a módszer tehát rugalmas, egyben érzékeny is, mert egyrészt teret ad az egyes geoinformatikai és ökológiai adatok bizonytalanságainak a figyelembevételére, másrészt a

VÖSZ gazdasági értékének eredményei nagyban függenek ezen adatok milyenségétől, megfelelőségétől, ami, elfogadva a gazdasági statisztikai adatok megbízhatóságát, elsősorban geoinformatikai és ökológiai feladat. Tehát a módszer alkalmazása jól ötvözi mind a három tudományág, a geoinformatika, az ökológia és a közgazdaságtan kompetenciáit.

A VÖSZ gazdasági értéke az ökoszisztéma szolgáltatás jellegéből adódóan áram (flow), tehát éves érték. A városi zöld infrastruktúrának, az ökoszisztémának, azaz a város természeti vagyonának az értéke készlet (stock). Az ENSZ SESA környezeti statisztikai szabványának, az ökoszisztéma számlák kialakításának végcélja az ökoszisztémák vagyonértékének a meghatározása, emiatt elvben a VÖSZ gazdasági értékének jelenérték számításával határozható meg. A diszkontálás, a jelenérték számításhoz használt diszkontráta meghatározása komplex feladat, ami lényegében azt jeleníti meg, hogy az egyén, ill. a társadalom hogyan vélekedik a generációk közötti igazságosság kérdésében, hogyan ítéli meg a jelen és a jövőbeli fogyasztás egymáshoz való viszonyát (átváltás, trade-off), ami azonban túlmutat a jelen kutatás keretein.

Összefoglalás

A tanulmányban bemutatott új szemléletű módszer hozzájárulhat a városi zöld infrastruktúrák (ökoszisztémák) gazdasági értékének megalapozottabb meghatározásához. A módszer a Kárpát-medence régió FUA-k (Functional Urban Area) esetében, OECD adatok felhasználásával került alkalmazásra és összegzése helyett a módszer lényege, hogy az egyes városi ökoszisztéma szolgáltatások értékének meghatározása és összegzése helyett a teljes városi ökoszisztéma gazdasági értékének meghatározását célozza. A kutatás az ökoszisztéma szolgáltatások összességének gazdasági értékét egyrészt szakirodalmi ajánlásokra alapozva, másrészt geoinformatikai adatok és ökológiai számítások alapján határozta meg. A kutatás arra a proposícióra épült, hogy a városi ökoszisztémák zöld felületei által nyújtott légszennyezés megkötés, mint ökoszisztéma szolgáltatás összefüggésben van minden más ökoszisztéma szolgáltatással (pl. mikroklíma szabályozás, vízviSSzartartás, esztétikai szolgáltatás), ezért azok összességének proxy mutatójaként alkalmazható. A Kárpát-medence régió Alacsony jövedelmi csoportba tartozó FUA-k esetében (munkaerő hatékonyság: GDP/fő munkaerő < USD70,000) az összefüggés lineárisan növekvő, magasabb jövedelem tartományban a gazdasági teljesítmény növekedésével a légszennyezettség csökken, ami megfelel a Kuznets görbék jellegének. Az Alacsony jövedelmi csoportba tartozó 60 FUA adatainak mintájával a regresszió elemzés eredményeként nyert regressziós együtthatók statisztikailag szignifikánsak, tehát a gazdasági teljesítmény és a légszennyezés közötti oksági összefüggés megerősítést nyert.

A városi zöld infrastruktúra gazdasági értékének szakirodalmi adatok alapján történt számítása azon az ajánlason alapult, hogy a városi zöld felületek a légszennyezettség 16,5%-26,7% - át kötik meg. A FUA városok várható légszennyezettség koncentráció adatai a regressziós együtthatók alkalmazásával került meghatározásra, és ezek alapján történt az ökoszisztéma szolgáltatások összessége gazdasági értékét jellemző értéktartomány megállapítása egy fő munkaerőre (USD/fő), ill. az egész FUA-ra számítva (USD).

A geoinformatikai adatok alapján végzett számítások 30m és 1500m légréteg vastagság figyelembevételével történtek és 30m légréteg vastagság esetén az ökoszisztéma szolgáltatások gazdasági értéke közelítette a szakirodalmi adatok alapján számított értéktartományt. Ez alapján intuitíven megállapítható, hogy a város gazdasági teljesítménye szempontjából a légréteg alsó, néhány 10m-es vastagságának szennyezettsége a meghatározó, de a releváns légtömeg magasságának és a légszennyezettség mintázatának az átlagos légszennyezettségre gyakorolt hatása további pontosítást kíván, követő kutatási feladatot jelent.

A kutatás fontos korlátja, hogy a regressziós vizsgálat eredményei a Kárpát-medence régió Alacsony jövedelmi csoportjába tartozó FUA régiókra, ill. városokra érvényesek. Tehát ezek az eredmények nem érvényesek a magasabb jövedelmi tartományba tartozó városok esetén a várható légszennyezettség koncentráció számítására. Más, ill. nagyobb populáció, ill. minta, pl. az OECD adatbázisban szereplő összes FUA adatainak felhasználása esetén az oksági összefüggés pontosítására összetettebb, pl. kvadratikus változókkal bővített regressziós modell vizsgálata is indokolt lehet.

A geoinformatikai adatok alapján történt kutatás további korlátja, hogy a légszennyezettség, jellegéből adódóan nem homogén. A város egyes helyein a légszennyezés koncentráció magasabb, máshol alacsonyabb. A kutatás eredményei természetesen átlagos értékek, amelyek magas absztrakciós szinten jellemzik a városi zöld infrastruktúra és a gazdasági teljesítmény összefüggéseit. Ez a megállapítás érvényes a geoinformatikai adatokkal végzett számításokra is. Adott légtömeg magasságban a szennyező anyagok nem egyenletesen oszlanak el: alacsonyabb magasságban magasabb, magasabb légrétegekben alacsonyabb a szennyező anyagok koncentrációja, ami ráadásul a szélviszonyoktól és más egyéb paraméterektől is függ.

A kutatási korlátok lényegében kijelölik a további kutatások irányát. Ezek egyöntetű célja, hogy a pontosabb alapadatok elősegítsék a városi ökoszisztéma szolgáltatások gazdasági értékének meghatározását célzó számításokat, ezzel jobban alátámasztva a természeti vagyon megőrzésére, védelmére irányuló beruházások piaci eszközökkel történő finanszírozhatóságát. Ennek a törekvésnek az az egyik legfontosabb támpontja, hogy a természeti vagyon számított értéke minél jobban tükrözze a társadalom számára annak valós gazdasági értékét. A jövőbeli kutatási igények és lehetőségek tere tehát széles. A kutatás az ebben a térben megfogalmazott kérdésekre a hipotézis és a proposíciók alapján keresett válaszokat.

Felhasznált szakirodalom

- Barbier, E.B., Mensah, A.C.E., Wilson, M., 2023. Valuing the Environment as Input, Ecosystem Services and Developing Countries. *Environ. Resour. Econ.* 84, 677–694. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00570-0>
- Costanza, R., 2020. Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability. *Ecosyst. Serv.* 43. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101096>
- Croci, E., Lucchitta, B., Penati, T., 2021. Valuing ecosystem services at the urban level: A critical review. *Sustainability* 13, 1129.
- Ding, X., Wang, P., Jiang, X., Zhang, W., Sokolov, B.I., Liu, Y., 2024. Impact of Urban Air Quality on Total Factor Productivity: Empirical Insights from Chinese Listed Companies. *Sustainability* 16, 3613.
- EC, 2025. Nature Credits Roadmap to reward nature-positive action and boost private finance [WWW Document]. *Eur. Comm. - Eur. Comm.* URL https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_1679 (accessed 7.10.25).
- Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P.J., McDonald, R.I., Parnell, S., Schewenius, M., Sendstad, M., Seto, K.C., 2013. Urbanization, biodiversity and ecosystem services: challenges and opportunities: a global assessment. Springer Nature.
- Farkas, J.Z., Hoyk, E., de Moraes, M.B., Csomós, G., 2023. A systematic review of urban green space research over the last 30 years: A bibliometric analysis. *Heliyon* 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13406>
- Gong, C., Xian, C., Wu, T., Liu, J., Ouyang, Z., 2023. Role of urban vegetation in air phytoremediation: differences between scientific research and environmental management perspectives. *Npj Urban Sustain.* 3, 24.
- Haines-Young, R., Potschin, M., 2010. Proposal for a Common International Classification of Ecosystem Goods and Services (CICES) for Integrated Environmental and Economic Accounting (V1) (Report to the European Environmental Agency No. ESA/STAT/AC.217).

- Hunter, R.F., Cleland, C., Cleary, A., Droomers, M., Wheeler, B.W., Sinnett, D., Nieuwenhuijsen, M.J., Braubach, M., 2019. Environmental, health, wellbeing, social and equity effects of urban green space interventions: A meta-narrative evidence synthesis. *Environ. Int.* 130, 104923. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104923>
- Kerekes, S., 2007. *A környezetgazdaságtan alapjai*. Aula Kiadó Kft., Budapest.
- Kiss, M., Takács, Á., Pogácsás, R., Gulyas, A., 2015. The role of ecosystem services in climate and air quality in urban areas: Evaluating carbon sequestration and air pollution removal by street and park trees in Szeged (Hungary). *Morav. Geogr. Rep.* 23, 36–46.
- Kovács, A.F., 2023. Beyond GDP: The Wealth Perspective of Sustainability. *Köz-Gazd.-Rev. Econ. Theory Policy* 18. <https://doi.org/10.14267/retp2023.04.06>
- Lin, J., Wan, H., Yu, Y., 2024. What you breathe makes you poor: The effect of air pollution on income. *China Econ. Rev.* 83, 102103. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2023.102103>
- Marjainé Szerényi, Z., 2011. Az Ökoszisztéma Szolgáltatások Közgazdasági Megközelítése. *Magy. Tud.* 7, 789–794.
- Marjainé Szerényi, Z., Kovács, E., 2018. Merre tart a környezetértékelés? A teljes gazdasági értéktől az ökoszisztéma szolgáltatásokig, in: *Környezet – Gazdaság – Társadalom : Tanulmányok Kerekes Sándor 70. születésnapja tiszteletére*. Kaposvári Egyetem Gazdaságtudományi Kar, Kaposvár, pp. 135–150.
- Nguyen, P.-Y., Astell-Burt, T., Rahimi-Ardabili, H., Feng, X., 2021. Green space quality and health: a systematic review. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 18, 11028.
- Nor, A.N.M., Corstanje, R., Harris, J.A., Brewer, T., 2017. Impact of rapid urban expansion on green space structure. *Ecol. Indic.* 81, 274–284. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.031>
- Ritchie, H., Roser, M., 2024. Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from? Our World Data.
- Tate, C., Tran, N., Longo, A., Barry, J., Taylor, T., O'Neill, C., Hunter, R., 2024. Economic evaluations of urban green and blue space interventions: A scoping review. *Ecol. Econ.* 222, 108217. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108217>
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., James, P., 2007. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landsc. Urban Plan.* 81, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001>
- UN GA, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, A/RES/70/1.
- World Bank, 2025. Accelerating Access to Clean Air for a Livable Planet. Washington DC.
- Zhang, L., Yang, L., Zohner, C.M., Crowther, T.W., Li, M., Shen, F., Guo, M., Qin, J., Yao, L., Zhou, C., 2022. Direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth across the world's cities. *Sci. Adv.* 8, eabo0095.
- Zhou, H., Liu, Y., He, M., 2022. The Spatial Interaction Effect of Green Spaces on Urban Economic Growth: Empirical Evidence from China. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610360>

Melléklet 1.

Kárpát-medence régió Funkcionális Városi Területek (FUA) adatai

A táblázat az OECD Kárpát-medence régió 77 FUA munkaerő hatékonyság (MH) és légszennyezettség koncentráció (PM2.5) adatait tartalmazza. A rendelkezésre álló adatok miatt az MH esetében 2020-as, a PM2.5 esetében 2023-as adatok kerültek felhasználásra, amelyek elégségesen közeliek, tekintettel a légszennyezettségi adatok egyéb bizonytalanságaira.

Case Summaries^a

			City of FUA	Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	Légszennyezettség, city PM2.5 µg/m3, 2023
Country of FUA	Austria	1	Graz	90689	11,0
		2	Innsbruck	91118	.
		3	Klagenfurt	93373	10,1
		4	Linz	97492	12,1
		5	Salzburg	108617	10,4
		6	Wien	102477	12,6
		Total	N	6	6
	Croatia	1	Osijek	52341	12,1
		2	Pula/Pola	57472	13,7
		3	Rijeka	59715	11,4
		4	Slavonski Brod	51103	12,3
		5	Split	52622	10,4
		6	Zadar	67337	10,3
		7	Zagreb	72979	14,3
		Total	N	7	7
	Hungary	1	Békéscsaba	54092	10,9
		2	Budapest	67071	15,2
		3	Debrecen	59847	11,4
		4	Dunaújváros	64093	12,5
		5	Eger	58619	11,4
		6	Gyor	72546	12,1
		7	Kaposvár	58622	11,3
		8	Kecskemét	62478	11,7
		9	Miskolc	63059	.
		10	Nyíregyháza	54529	11,7
		11	Pécs	55689	11,3
		12	Sopron	72897	11,6
		13	Szeged	60238	11,4
		14	Székesfehérvár	64113	11,9
		15	Szolnok	61974	11,4
		16	Szombathely	59685	12,0
		17	Tatabánya	62815	12,3
		18	Veszprém	58012	11,6
		19	Zalaegerszeg	55822	12,3
		Total	N	19	19
	Romania	1	Alba Iulia	61933	9,8
		2	Arad	58796	11,3
		3	Bacău	35101	10,2
		4	Baia Mare	49394	10,1

	5	Bârlad	22873	10,1
	6	Bistrița	44376	9,7
	7	Botoșani	34941	10,2
	8	Brăila	42538	10,3
	9	Brașov	70279	9,0
	10	București	113258	14,5
	11	Buzău	49043	10,4
	12	Călărași	31183	10,0
	13	Cluj-Napoca	75852	10,9
	14	Constanța	65061	11,3
	15	Craiova	47129	11,0
	16	Drobeta-Turnu Severi	41154	9,9
	17	Focșani	49698	9,7
	18	Galați	48041	10,3
	19	Giurgiu	51131	10,3
	20	Iași	45065	10,9
	21	Oradea	43564	10,8
	22	Piatra Neamț	28047	9,2
	23	Pitești	52116	11,1
	24	Ploiești	59449	11,5
	25	Râmnicu Vâlcea	47792	9,9
	26	Roman	28047	.
	27	Satu Mare	45542	10,9
	28	Sibiu	63563	9,8
	29	Slatina	35894	11,0
	30	Suceava	35193	10,2
	31	Târgoviște	61860	11,1
	32	Târgu Jiu	55522	9,8
	33	Târgu Mureș	62509	10,7
	34	Timișoara	73740	.
	35	Tulcea	43688	9,7
	Total	N	35	35
Slovakia	1	Banská Bystrica	59559	9,2
	2	Bratislava	108004	12,1
	3	Košice	72564	11,3
	4	Nitra	63726	11,3
	5	Prešov	57918	10,7
	6	Trenčín	59232	11,2
	7	Trnava	83318	11,7
	8	Žilina	61504	10,6
	Total	N	8	8
Slovenia	1	Ljubljana	77921	14,3
	2	Maribor	62748	14,1
	Total	N	2	2
Total	N		77	77

Forrás: <https://data-explorer.oecd.org/>

Melléklet 2.

A levegőminőség-javítás számításának módszertana

Szerző: Kiss Márton

Bevezetés

A légszennyezés, mint napjaink egyik legnagyobb közegészségügyi problémájának ismeretében a városi ökoszisztémák egyik legfontosabb szolgáltatása a különböző légszennyező anyagok ülepítése a növények levélfelületén. A városi levegőkörnyezet fő szennyezőforrásait tekintve a belsőégésű motorokkal szerelt gépjárművek közlekedése, a szilárd szennyező anyagokat kibocsátó ipari tevékenység és a főként fosszilis tüzelőanyagok lokális elégetéséből adódó fűtés célú tüzelőanyag-felhasználás a vezető okok (Kiss et al. 2021). Az így a levegőbe jutó kémiai szennyező anyagok klimatikus hatásait tekintve megváltoztatják a légkör fizikai tulajdonságait, élettani hatásait tekintve pedig káros hatással vannak a városban élők szervezetére, hosszú távon pedig életkilátásaikra. Éppen ezért fontos annak ismerete, hogy a szilárd – és cseppfolyós légszennyező anyagok, milyen mértékben és mennyi idő alatt távoznak a légkörből elkeveredéssel nagyobb területen vagy felfelé szálló légáramlatokkal, illetve lefelé irányulóan száraz – illetve nedves kiülepedéssel az élő és élettelen felületekre lerakódva, majd onnan lemosódva vagy ott megtapadva. Egészségügyi hatásai és a szakpolitikai jelentősége miatt az elemzés a 2,5 μm -nél kisebb részecskeméretű szálló por (PM 2,5) ülepedésével foglalkozik.

A tényleges légszennyezés-megkötés a szálló por koncentrációjától, valamint a levélfelület és a meteorológiai körülmények által meghatározott ülepedéstől függ. Az alábbi alfejezetek ezek adatforrásait és módszertanát, végül magának a levegőminőség-javításnak a szűkebben értelmezett számítási eljárását mutatják be.

Adatok és módszertan

A szállópor-koncentráció alapadata

A levegőminőség-javítási hatékonyság nem csak a települési zöldfelületek elterjedésének és sűrűségének, hanem a szállópor-szennyezettségnek a térbeli mintázatától is nagy mértékben függ. Emiatt a vizsgált városokban egyébként többségében rendelkezésre álló pontszerű mérőállomások-adatai nem feleltek meg a kutatás céljainak, hanem azt térben interpolált adatként kellett használni, ezt lehetővé tevő adatbázisok felhasználásával. Az egyik legrégebben rendelkezésre álló ilyen jellegű adatforrás, ami a légszennyezés-megkötés, mint ökoszisztéma-szolgáltatás számításaiban is megjelent, az EMEP-MSC-W modell interpolált outputja. Bár a modell eredményei között napi vagy akár órás értékeket is találhatunk, de a térbeli felbontása (5 km-es grid) a városi fókuszú elemzések igényeinek csak nagyon korlátozott mértékben felel meg. Ígéretes adatforrást jelenthet a RIO szoftver outputja, ami egy specifikusan hazai célokra végzett, megbízható modelladaptáció eredménye, 3 km-es térbeli felbontással. Viszont ennek eredményei egyelőre csak Magyarországra elérhetők, az elemzésünkben pedig teljes Kárpát-medencei kitekintéssel dolgozunk. A fenti szempontok miatt a nemzetközi szakpolitikai színtereken leggyakrabban alkalmazott adatforrást, az Európai Környezeti Ügynökség (EEA) térben interpolált légszennyezettségi adatbázisát használtuk az elemzésben, amelynek 1 km-es felbontása a Kárpát-medencei városok teljes körére elérhető adatforrások közül a legjobbnak mondható.

A szállópor-megkötés számítása

A levélfelületeken való ülepedés meghatározásában légköri koncentráció mellett a másik meghatározó tényező az ülepedési sebesség (V_d), ezt általában cm/s-ban adjuk meg. Ennek az ülepedési sebességnek a modellezéséhez azt kell eldöntenünk, hogy a V_d alapértelmezett értékeken, éves vagy szezonális levélfelületi indexen (LAI) alapul-e. Továbbá ez az érték a PM₁₀ és a PM_{2,5} részecskék esetében eltérő. A fentiek értelmezésében így V_d modellezésére négyféle megközelítés használható (EC-EUROSTAT 2023).

A már említett négy megközelítés közül az adatok elérhetősége (azaz a környezeti PM_{2,5} és a PM₁₀ koncentráció, a LAI és a szélesebbesség) és a számítási teljesítmény alapján kell választani. Feltéve, hogy a modell input adataiból megfelelő mennyiségűek és minőségűek állnak rendelkezésre, a fejlett megközelítések valószínűleg pontosabbak lesznek, mint az alapértelmezett megközelítések. A minél nagyobb időbeli felbontás azért fontos, mert a PM-koncentráció (CPM) mind a szélesebbességgel, mind a LAI-val összefügg, és ezek folyamatosan változnak az év során. Így például Észak-Európában a PM-koncentráció jellemzően magasabb a téli időszakban a tüzelőanyagok, többek között a fa lakossági fűtésre történő használata és a kedvezőtlen diszpergációs körülmények miatt, míg Dél-Európában nyáron a szállópor újbóli visszakeveredése miatt. A PM-koncentráció alacsonyabb a távoli, kevésbé sűrűn lakott és kevés ipari termelőüzemmel rendelkező területeken is. Mivel a PM-koncentráció országonként változik, az is előfordulhat, hogy egy ökoszisztéma típusra nemzeti szinten átlagolva az egyes ökoszisztéma típusok között is eltér a mutató. Például az erdei ökoszisztémákban az átlagos PM-koncentráció alacsonyabb lehet az országos átlagnál, a településeken és más mesterséges területeken pedig a PM-koncentráció meghaladhatja az országos átlagot. Az éves átlagos V_d ökoszisztéma-típusonként egy alapértelmezett értékeken alapul. A fejlett modellezési megközelítés lehetővé teszi ezeknek az összetettségeknek a figyelembevételét.

A V_d modellezése esetén figyelembe kell venni, hogy a LAI havi, szezonális vagy éves alapértelmezett értékeit használják-e. A LAI és így a V_d jellemzően magasabb a tavaszi és nyári időszakban. Az LAI és így a V_d szezonális vagy havi alapértelmezett értékei ezért pontosabbak, mint az éves értékek. A szezonális és havi LAI adatok távérzékelési képekből származtathatók. Természetesen, ha úgy döntünk, hogy a V_d -t mondjuk havi LAI alapján modellezzük, akkor a CPM-nek ugyanilyen vagy magasabb (pl. CAMS adatok) időbeli felbontásban kell rendelkezésre állnia. Ha csak éves átlagos CPM áll rendelkezésre, akkor nincs értelme a LAI időbeli felbontásának növelésének. Ugyanez vonatkozik a szélesebbesre is. Ha a PM_{2.5}-t választják levegőminőségi mutatónak, és ha havi vagy szezonális megközelítést választanak, akkor a szélesebbességnek ugyanilyen vagy magasabb időbeli felbontásban kell rendelkezésre állnia.

A jelen munkában az alap megközelítés számítási eljárását alkalmaztuk a PM_{2,5} szennyezőre vonatkozóan (vagyis éves átlagok alapértelmezett értékei, amelyeket nem igazítunk ki a LAI vagy a szélesebbesség szezonális ingadozásához).

Ha a V_d térbeli adatát a megfelelő módon megszorozzuk a koncentrációtérképpel, ez a PM lerakódását adja meg hektáronként és évente tonnában. Következésképpen egy hektárnyi, hasonló LAI-val rendelkező, azonos fafajból álló terület egy városi parkban sokkal több részecskét szűrhet ki a légkörből, mint egy hegyvidéki erdőben, mivel a belvárosi PM-koncentráció általában magasabb. Általánosságban elmondható, hogy a levegőszűrő szolgáltatás biztosítása magasabb a magas PM-koncentrációjú területeken (és nulla a PM légszennyezés nélküli területeken).

Ez a számítás a következő képlettel végezhető el:

$$PM \text{ kiülepedés (tonna/ha/év)} = Vd \text{ (cm/s)} \times CPM \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)} \times 3.1536 \times 10^{-3}$$

Teljes PM-lerakódás (tonna/év) = $\sum$ PM-lerakódás (tonna/ha/év) az elszámolási területen található összes cellára (a teljes lerakódás az összes területre összegzett lerakódás, ezért tonnában/évben kifejezve). Megjegyzendő, hogy a PM kiülepedést egy bizonyos időszakra kell kiszámítani, ez lehet egy hónap, egy évszak vagy egy év, a fenti egyenlet alapján számított Vd és a CPM időbeli felbontásától függően. A munkánkban óránkénti megkötési értékekkel dolgoztunk, a modellezési környezetet biztosító INCA szoftvermodul éves megkötési értékeiből kiindulva.

A $3,1536 \times 10^{-3}$ tényező egy egységnyi korrekciós tényező, és ebben az esetben a másodpercek évekké, a mikrogrammok tonnává, és a centiméterek méterre alakításához szükséges. Ha más egységeket használnak (pl. szezonális adatok), az egységnyi korrekciós tényező megváltozik; az évszakonkénti másodpercek számát kell használni, azaz 4 azonos hosszúságú évszak esetén: $0,7884 \times 10^{-3}$ (a $3,1536 \times 10^{-3}$ helyett). A korrekciós tényező könnyen kiszámítható a kiválasztott időszakon belüli másodpercek számának kiszámításával.

A levegőminőség-javítás számítása

A tényleges légszennyezés-megkötés, vagyis a levegőminőség százalékban kifejezett javításának számítása a tömegegységben kifejezett lerakódás eredményei és a PM_{2,5} koncentrációértékek alapján történik. A levegőminőség-javítási hatékonyság erősen függ a települési zöldfelületek elterjedésétől és sűrűségétől, ezért a számítások során fontos figyelembe venni annak térbeli mintázatát. Emiatt a szállópor-szennyezettséget térben interpolált adatként vettük figyelembe, az Európai Környezeti Ügynökség erre vonatkozó adatbázisának felhasználásával (térbeli felbontás: 1 km).

A levegőminőség-javítást (AQI – Air Quality Improvement) Nowak et al. (2006) és Vaezin et al. (2021) megközelítése alapján számítottuk:

$$AQI\% = \frac{GR}{(GA+GR)} \times 100,$$

ahol GR (g) a PM_{2,5} átlagos óránkénti megkötése (az üleptett mennyiség korábban bemutatott módszertana alapján), GA (g) pedig a PM_{2,5} mennyisége a vizsgált légtömegben. Mivel a légszennyezettség alapadatában a PM_{2,5}-koncentráció térfogategységre vonatkoztatva van megadva (általában $\mu\text{g/m}^3$ -ben), ezért a végeredmény és az értelmezés szempontjából fontos a megfelelően megválasztott légtömegre vonatkozó átszámítás:

$$GA = PM_{2,5} (H_i) \times H_i \times A,$$

ahol A a vonatkoztatási terület, itt az ülepedés modelljében alkalmazott 100 méteres oldalhosszúságú cellákkal számoltunk. H_i a vizsgált légréteg vastagsága. Mivel az elemzés fókuszában a szálló por ökoszisztémák általi megkötése áll, ezért azzal a légréteggel számoltunk, ahol a megkötés szempontjából kulcsfontosságú városi fák jelen vannak. Ezt a magasságot 30 méternek tekintettük, mivel ez adódott a városi lombkoronaszint magasságának a mintavárosok egyikében (Szeged), a város nagyobb részét lefedő egyed-alapú fakataszter alapján (Gulyás et al. 2015). Mivel a vizsgált városok mindegyike a Kárpát-medencében

helyezkedik el, a városfásításban alkalmazott fajkészlet és a növekedési tulajdonságok pedig közelítőleg megegyeznek, ezért ez elfogadható a vizsgált légréteg magasságaként. Bár ez egyszerűsítést jelent, de az ilyen típusú számításokban a szennyezők koncentrációját homogénnek lehet tekinteni a vizsgált légrétegben (Colbeck és Harrison 1985, Vaezin et al. 2021). PM_{2,5} (H_i) a PM_{2,5} átlagos koncentrációja a vizsgált légrétegben, az EEA interpolált alapadata alapján.

Hivatkozások:

Colbeck, I., Harrison, R.M. (1985): Dry deposition of ozone: Some measurements of deposition velocity and of vertical profiles to 100 meters. *Atmospheric Environment*, 11, 807–818.

EC-EUROSTAT (2023): Guidance Note for accounting for the air filtration ecosystem service in the EU. Final draft by Task force on ecosystem accounting for a written consultation by the Environmental accounts working groups

Gulyás, Á., Kiss, M., Takács, Á., Varga, L. (2015): Szeged közterületi faállományának vizsgálata. In: Rakonczai, J., Blanka, V., Ladányi, Zs. (szerk.) *Tovább egy zöldebb úton: A Szegedi Tudományegyetem Földrajzi és Földtani Tanszékcsoport részvétele a ZENFE programban (2013-2015)*. Szeged, Magyarország SZTE TTIK Földrajzi és Földtani Tanszékcsoport (2015) 176 p., pp. 67-79.

Kiss M., Báthoryné Nagy I. R., Buzás K., Csősz M., Gulyás Á., Lenkei P., Mészáros R., Pinke Zs., Tanács E. (2021): A városi ökoszisztéma szolgáltatások értékelése – Az ökoszisztéma állapottól a ténylegesen igénybe vett ökoszisztéma-szolgáltatás értékelésig. A közösségi jelentőségű természeti értékek hosszú távú megőrzését és fejlesztését, valamint az EU biológiai sokféleség stratégia 2020 célkitűzéseinek hazai szintű megvalósítását megalapozó stratégiai vizsgálatok projekt, Ökoszisztéma-szolgáltatások projektjelem. Agrárminisztérium, Budapest, pp. 52.

Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J. C. (2006): Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4, 115–123.

Vaezin, S.M.H., Juybari, M.M., Daei, A., Hemmat, M.A., Shirvany, A., Tallis, M.J., Hirabayashi, S., Moeinaddini, M., Hamidian, A.H., Sadeghi, S.M.M., Pypker, T.G. (2021): The effectiveness of urban trees in reducing airborne particulate matter by dry deposition in Tehran, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 193:842

Internetes hivatkozás:

[1] <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/82700fbd-2953-467b-be0a-78a520c3a7ef>

Melléklet 3.
VÖSZ gazdasági érték, Kárpát-medence régió, Alacsony jövedelmi FUA
csoport, USD/fő, 2021

Case Summaries								
			City of FUA	Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	Munkaerő hatság növekedés min	Munkaerő hatság növekedés max	dMHAQI30	dMHAQI1500
Country of FUA	Croatia	1	Osijek	52341	7592	12286	2367	47
		Total	1	1	1	1	1	1
	Hungary	1	Békéscsaba	54092	7853	12708	2116	42
		2	Debrecen	59847	8713	14100	3373	67
		3	Dunaújváros	64093	9350	15131	3031	61
		4	Eger	58619	8530	13802	2174	43
		5	Kaposvár	58622	8530	13803	3181	64
		6	Kecskemét	62478	9108	14738	2766	55
		7	Miskolc	63059	9195	14879	3340	67
		8	Nyíregyháza	54529	7918	12814	2037	41
		9	Pécs	55689	8092	13094	3413	68
		10	Szeged	60238	8772	14195	2556	51
		11	Székesfehérvár	64113	9353	15135	3140	63
		12	Szolnok	61974	9032	14616	2796	56
		13	Szombathely	59685	8689	14061	2876	58
		14	Tatabánya	62815	9158	14820	4101	82
		15	Veszprém	58012	8439	13655	3374	67
		16	Zalaegerszeg	55822	8111	13126	3330	67
		Total	16	16	16	16	16	16
	Romania	1	Alba Iulia	61933	9026	14606	2808	56
		2	Arad	58796	8556	13845	2990	60
		3	Baia Mare	49394	7154	11577	3260	65
		4	Bistrița	44376	6410	10373	1334	27
		5	Oradea	43564	6290	10179	1170	23
		6	Satu Mare	45542	6583	10652	1260	25
		7	Târgu Mureș	62509	9112	14746	1830	37
		Total	7	7	7	7	7	7
	Slovakia	1	Banská Bystrica	59559	8670	14030	3589	72
		2	Prešov	57918	8425	13633	3209	64
		3	Trenčín	59232	8621	13951	2573	51
		4	Žilina	61504	8962	14502	2361	47
		Total	4	4	4	4	4	4
	Slovenia	1	Maribor	62748	9148	14804	2526	51
		Total	1	1	1	1	1	1
	Total	N	29	29	29	29	29	29

Forrás: saját elemzés

Melléklet 4.
Air Quality Improvement (AQI), Kárpát-régió Alacsony jövedelmi FUA
csoport, 30m és 1500m légtömeg magasság

Case Summaries			
	OECD Functional Urban Area	AQI 30m légt mag	AQI 1500m légt mag
1	Alba Iulia, FU	,1804	,003608
2	Arad, FUA	,2104	,004208
3	Baia Mare	,3125	,006250
4	Banská Bystrica	,2469	,004938
5	Békéscsaba,	,1725	,003450
6	Bistrița, FUA	,1550	,003100
7	Debrecen	,2301	,004602
8	Dunaújváros,	,1834	,003668
9	Eger, FUA	,1538	,003076
10	Kaposvár, FUA	,2250	,004500
11	Kecskemét, FU	,1750	,003500
12	Miskolc, FUA	,2079	,004158
13	Nyíregyháza,	,1637	,003274
14	Oradea, FUA	,1406	,002812
15	Osijek, FUA	,2046	,004092
16	Pécs, FUA	,2643	,005286
17	Podravska, FUA	,1586	,003172
18	Prešov, FUA	,2319	,004638
19	Satu Mare, FUA	,1397	,002794
20	Sibiu, FUA	,1538	,003076
21	Szeged, FUA	,1724	,003448
22	Székesfehérv	,1899	,003798
23	Szolnok, FUA	,1794	,003582
24	Szombathely, F	,1971	,003942
25	Târgu Mureș,	,1157	,002314
26	Tatabánya, FU	,2570	,005140
27	Trenčín, FUA	,1787	,003574
28	Veszprém, FUA	,2431	,004862
29	Zalaegerszeg,	,2568	,005136
30	Žilina, FUA	,1535	,003070
Total	N 30	30	30

Forrás: saját elemzés

Melléklet 5.

Regresszió elemzés, Kárpát-medence régió Magas jövedelmi FUA csoport

Descriptive Statistics			
	Mean	Std. Deviation	N
Légszennyezettség város PM2.5 µg/m3	12,079	1,7422	16
Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	86208,56	15708,991	16

Forrás: saját elemzés

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,020 ^a	,000	-,071	1,8029

a. Predictors: (Constant), Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020

Forrás: saját elemzés

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	12,272	2,594		4,731	<,001
	Munkaerő hatékonyság USD / worker, PPP. 2020	-2,230E-6	,000	-,020	-,075	,941

a. Dependent Variable: Légszennyezettség város PM2.5 µg/m3

Forrás: saját elemzés