

A zaj, mint lehetséges energiaforrás

Noise as potential energy source

Kovács Szilvia

Egyetemi tanársegéd, Dunaújvárosi Egyetem

Absztrakt

Az irodalmi áttekintés alapján a tanulmány fókuszában azon fordulat áll, amely szerint a zajhatás akár környezeti erőforrásként is felhasználható. A zajenergiára már tekinthetünk úgy is mint tiszta, zöld, megújuló villamosenergia-forrásra, amely leginkább a mikroelektronika és az anyagtudomány fejlődésével vált elérhetővé. A jelen kutatás újdonsága, hogy a hagyományos közgazdasági értelemben vett „származékos keresletként” tekint a zajhasznosításra. És, habár a zajenergia-termelési potenciált eredendően korlátozza a zajcsökkentés sikeressége, a hangkörnyezet fenntarthatósági céljának mégis annak kell lennie, hogy egyensúlyba hozza az elfogadható zajsintet és a kívánt zajenergia-termelést.

Kulcsszavak: zajbegyűjtés, származékos kereslet, körforgásos gazdaság, energiahasznosítás

JEL kódok: K32, N94, N95, Q42, Q53, Q55, R41

Abstract

Based on the literature review, the study focuses on the shift in which noise can even be used as an environmental resource. Noise energy can now be viewed as a clean, green, renewable source for electricity, which has become available mainly with the development of microelectronics and materials science. The novelty of the present research is that it views noise utilisation as a „derived demand” in the traditional economic sense. And although the potential for noise energy production is inherently limited by the effectiveness of noise reduction, the sustainability goal for the sound environment should still be to balance the acceptable noise level with the desired noise energy production.

Keywords: noise harvesting, derived demand, circular economy, energy utilisation

JEL codes: K32, N94, N95, Q42, Q53, Q55, R41

Bevezetés

Az információelméletben (mint például Shannon-Weaver kommunikáció elméletében) a zaj általában probléma, egy minimalizálandó akadály, ami a tiszta, egyértelmű jel útjába áll. Michel Serres, francia filozófus, kommunikáció- és tudományteoretikus viszont összetett és árnyalt módon ír a zajról, különösen 1980-as „Az élősködő” című könyvében. Serres a „parazita” alakját használja a zajról alkotott elképzeléseinek kifejtéséhez. A parazita egy meglévő rendszerből táplálkozik, zavart okoz, de néha új rendszereket is létrehoz. Serres számára a zaj a (kommunikációs) rendszerekben fellépő interferencia, egymást erősítő vagy gyengítő hatások eredménye, így értelmezésében a zaj nemcsak akadályoz, de termékeny is. Serres a zajt a rend feltételének tekintti, nem pedig ellentétének. A zaj megteremti a változás, az újdonság és az átalakulás feltételeit. Megzavarja a statikus rendszereket és alkalmazkodásra kényszeríti őket. Vizsgálatunk egy ebbe az irányba történő elmozdulást, fordulatot hangsúlyoz, miszerint: (legfőképpen) a mobilitáshoz kapcsolódó zajhatást immár környezeti energiaforrásként is számon kell tartanunk.

A „tudás rekombináció”-perspektívája ma már vezető keretrendszer, amely hangsúlyozza, hogy a keresés és a rekombináció fontos mechanizmusok az innovációban (Beverungen et al., 2018; Lanzolla et al., 2020; Xiao et al., 2021). Jelen tanulmány is ezt az irányvonalat tekinti leginkább egyéni, hozzáadott értékének. Ennek érdekében történik a zaj problematikájának, az akusztikai környezetek érzékelésének és tervezésének bemutatása, majd a kutatási kérdés meghatározása (1. fejezet). Ezt a környezeti energia- és zajgyűjtő technológiák fejlődéstörténetének, K+F motivációs mintázatának vizsgálata követi hipotézis (H_0) alkotással, amely mikroökonómiai szemléletű (2. fejezet). Végezetül, az igazolásra váró elképzelés bizonyítása vagy cáfolata érdekében, áttekintésre kerülnek a zajkibocsátást, és ezzel együtt a zajenergiát meghatározó legfontosabb gazdaság-, város- és közlekedésfejlődési trendek (3. fejezet).

A szakirodalmi kutatás azonosította és értékelte a témával kapcsolatos releváns forrásokat, célja volt a kapcsolódó fogalmakra való összpontosítás és következtetések levonása. A szakirodalmi gyűjtés nagyobb adatbázisokban (pl. Semantic Scholar, PubMed) olyan kulcsszavak használatával történt, mint például: energia-gyűjtés, -termelés, zajenergia, -begyűjtés, energiaátalakító és -termelő rendszerek. A tanulmányok kiválasztási kritériumai közt szerepelt a területi (pl. európai, ázsiai) alkalmazás is; a nem angol nyelvű vagy adatgyűjtésében nem egyértelmű cikkek kizárásra kerültek. Az így szűrt szakirodalmak a zajforrások típusait, a zajgyűjtés technológiáit, az energiatermelésre és a környezetminőségre vonatkozó eredményeket összegezték. Ezek bemutatásához Frank Geels (2018), angol rendszerinnováció és fenntarthatóság szakértő, többszintű perspektívája került alkalmazásra. Vagyis a tanulmány vizsgálja (a) a niche, a szűk, speciális tulajdonságok alapján megkülönböztethető piaci szegmensben zajló (zajbegyűjtő) innovációk fokozatos lendületvételt, (b) ezek hatását a meglévő társadalmi-technikai (energia) rezsimre, valamint (c) a (termelési tényező és a fogyasztói piac kölcsönös függéséből) kialakuló zavarokat és problémákat.

1. A zajszennyezéstől a zajvédelmen át a zajenergiáig

„Környezeti zaj Európában – 2025” című, az Európai Környezetvédelmi Ügynökség öt évente kiadott jelentésének főbb megállapításai szerint kb. 112 millió ember – Európa lakosságának több mint 20%-a – van kitéve hosszú távú közúti, vasúti és repülőgépek okozta zajszintnek, amely meghaladja a környezeti zaj értékeléséről és kezeléséről szóló 2002/49/EK irányelv által meghatározott küszöbértékeket. Ezek mértéke: 55 dB (decibel) a nappali-este-éjszakai időszakra (24 órás periódusra számolt átlagos zaj; L_{den}) és 50 dB az éjszakai időszakra (22:00-06:00 között; L_{night}). Ehhez képest az Egészségügyi Világszervezet küszöbértékei forrásspecifikusak: közúti zajforrás esetén $L_{den}=53$ dB, $L_{night}=45$ dB; vasútnál $L_{den}=54$ dB, $L_{night}=44$ dB; légitözlekedésben $L_{den}=45$ dB, $L_{night}=40$ dB; szélturbináknál $L_{den}=45$ dB, (L_{night} nincs); szabadidős zajforrások esetében $L_{Aeq}=70$ dB (ahol L_{Aeq} az egyenértékű folyamatos hangnyomásszint, amely időben változó zajterhelés helyettesítésére szolgál). Az Egészségügyi Világszervezet Európára vonatkozó irányelvei tehát lényegesen szigorúbb zajszint-besorolást javasoltak 2018-ban, így ezen küszöbértékek szerint becsülve kb. 150 millió ember – a lakosság több mint 30%-a – van kitéve a különböző forrásokból származó hosszú távú, egészségtelen zajszintnek.

A zajt leginkább a zavaró érzettel, a bosszúsággal, a stresszel és az alvászavarral hozzák összefüggésbe. Ez utóbbi tényezők gyulladáshoz és oxidatív stresszhez, vagyis a szabad gyökök és az antioxidánsok egyensúlyának felborulásához, sejt- és szövetkárosodáshoz vezethetnek. Ezek pedig számos negatív egészségügyi következményhez járulnak hozzá, beleértve a szív- és érrendszeri és anyagcsere-betegségeket, a mentális zavarokat és akár a korai haláleseteket is. A közlekedési forrásokból származó zajszennyezés évente körülbelül 1,3 millió egészséges életév elvesztéséhez vezet Európában, a rokkantsággal korrigált életévek alapján mérve. A többi környezeti egészségügyi kihíváshoz képest a közlekedési zaj a három legnagyobb kockázat közé tartozik, a légszennyezés és a hőmérséklettel összefüggő (éghajlati) tényezők mögött. Ezen kívül károsabb egészségügyi hatása van, mint a passzív dohányzásnak vagy az ólomnak való kitettségnek.

A jövőre vonatkozó előrejelzések alapján, a városok növekedése és a megnövekedett mobilitási igény miatt azonban nem számíthatunk arra, hogy jelentősen csökkenne ez a zajexpozíció, vagyis az a hangenergia mennyiség, amelyet egy személy egy adott időtartam alatt tapasztal, a hang hangosságának és a kitettség időtartamának kombinációjaként. Az Európai Bizottság 2021-es „Út a szennyezőanyag-mentes levegő, víz és talaj felé” elnevezésű uniós cselekvési terve irányadó célként tűzte ki, hogy 2030-ra 30%-kal csökkentse a közlekedés által okozott zaj miatt káros hatásoknak kitett személyek arányát (a 2017-es szinthez képest). Azonban a becslések szerint 2017 és 2022 között az EU-ban ez az érték mindössze 3%-kal csökkent. Egy optimista forgatókönyv szerint is a közlekedési zaj által zavart emberek száma körülbelül 21%-kal csökkenhet 2030-ra, ezért jelentősebb fellépésre lenne szükség uniós és nemzeti szinten is.

Az európai országok, régiók és városok számos intézkedést hoznak a zajproblémák kezelésére és enyhítésére, ugyanakkor a zajnak kitett emberek száma jelentősen eltér a városi és vidéki, az agglomerációs és agglomeráción kívüli területeken. A városi területek népsűrűsége magasabb, és a zajszennyezés is jobban érinti őket a sűrű közlekedési infrastruktúra és a mobilitás iránti nagyobb kereslet miatt. Tehát, a városi területeken a lehetséges zajcsökkentő intézkedések köre szélesebb, különösen a közúti forgalom tekintetében. A legnépszerűbb intézkedések például: zajvédő falak telepítése, a régi, kövezett utak burkolatának alacsony zajszintű aszfaltra cserélése, a jobb forgalomirányítás és a sebességkorlátozás. További jó gyakorlatok: csendes gumibroncsok használata a tömegközlekedési járműveken, bővített infrastruktúra kialakítása az elektromos autók számára a városokban, gyalogos utcák kijelölése stb. Ezek mellett fontosak a tudatosság növelését, valamint az emberek szokásainak megváltoztatását célzó kezdeményezések is. A fenntartható közlekedési módok irányában tett lépések közül a belvárosok forgalomcsillapítása egyre inkább megjelenő gyakorlat a nagyvárosok életében (pl. dugódíj, autómentes övezetek, zöldítés), ami viszont a gyalogos, a kerékpáros, a rolleres, illetve az elektromos mikromobilitás fejlődését is magával hozza. Úgynevezett csendes területeket is kialakítanak, ahova a lakosok elvonulhatnak a zajos városi környezetből; ezek általában zöldterületek, parkok vagy természetvédelmi területek (EEA, 2021, 2023).

Azonban a zajszennyezés a városi és vidéki lakosságon túl, a szárazföldi és a tengeri élővilágra is hatással van, befolyásolva viselkedésüket, fiziológiájukat, kommunikációjukat és érzékelésüket. Többek közt megváltoztatja a ragadozó-zsákmány dinamikát, megzavarja az ökoszisztéma funkcióit, beleértve a beporzást és a növények szaporodását. Az Európai Unió Natura 2000 hálózatának – a biológiai sokféleség megóvásában legértékesebb természeti területeknek – legalább 29%-át érinti a magas közlekedési zajszint. A hajózásból, a tengeri építkezésekből és kutatásokból származó víz alatti zajszennyezés megzavarja a tengeri élővilágot is, különösen azokat a fajokat, amelyek túlélésükhöz a hangra támaszkodnak, ilyenek például a bálnák és a delfinek. A legnagyobb víz alatti zajterhelésnek kitett európai területek a La Manche csatorna egyes részei, a Gibraltári-szoros, az Adriai-tenger egyes részei, a Dardanellák-szoros és a Balti-tenger egyes régiói (EEA-EMSA, 2025). Mindez aláhúzza az integrált kezelési stratégiák szükségességét, amelyek egyszerre helyezik előtérbe a biológiai sokféleséget és a csendet (EEA, 2025, pp. 82-84).

A fentiekben felsorolt intézkedések sora a légszennyezés csökkentése szempontjából is hasznosnak bizonyul. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a különböző intézkedések kombinációja, vagyis a technológiai fejlesztések, a zajvédelmi szakpolitikák, a megfelelőbb terület-, város- és infrastruktúratervezés/fejlesztés, valamint az emberi magatartások változtatása együtt, kombinált stratégiaként működhet a leghatékonyabban (EEA, 2023).

A rugalmas ellenállóképesség révén, a külső-belső erőforrások átgondolásával azonban a zajszennyezés „helyreállításán” túl mindinkább fókuszba kerül a „zajbegyűjtés” lehetősége is, ami a zajt környezeti energiaforrásként kezeli. A zaj, mint lehetséges energiaforrás témájának komplex feltárása pedig nem nélkülözheti a

zaj tudományközi értelmezéseit, a zajszennyezés ökonómiai megközelítéseit stb., azonban a jelen tanulmány keretei közt legfőképp azzal a kérdéssel foglalkozunk, hogy milyen előfeltételek és motivációk a meghatározók a zaj, mint lehetséges energiaforrás technológiai megvalósításában és alkalmazásában.

2. A zaj – mint környezeti energia – begyűjtésének és hasznosításának motivációi

Az energiahasznosítással kapcsolatos kutatások, az energiagyűjtés szélesebb körű tanulmányozása a XIX. század végén, a fotoelektromosság felfedezésével kezdődtek. 1876-ban az angol William Grylls Adams és tanítványa, Richard Evans Day bebizonyították, a szeléncellák képesek a fényt (napenergiát) elektromos árammá alakítani. A fotoelektromos hatásról 1905-ben Albert Einstein négy tanulmánya is megjelent (Szabó, 2017). A XX. század közepén, amikor új anyagokat és alkalmazásokat fedeztek fel a környezeti energiaforrások – például a fény, a hő, a rezgések és az elektromágneses hullámok – elektromos árammá alakítására, a fejlesztések felgyorsultak. Az 1970-es évek olajválsága és a növekvő környezeti aggodalmak pedig tovább motiválták a fenntartható, a megújuló energiaalternatívák iránti igényt és a környezeti energia begyűjtésének technológiai kutatását (Walker, 2020). Az elmúlt évtizedekben, immár a XXI. században, a mikroelektronika és az anyagtudomány fejlődése tette lehetővé a kisméretű energiagyűjtő eszközök fejlesztését, például érzékelők, orvosi implantátumok és IoT-alkalmazások energiaellátására (Bahl, 2020).

A legtöbb érzékelő és IoT-eszköz ultra-alacsony fogyasztású, nem túl magas energiaigénnyel végzi az adatok továbbítását, önállóan táplált érzékelőik képesek kis mennyiségű energiát hasznosítani a környezetből, külső áramforrás nélkül (Ulukus et al., 2015; Sarker et al., 2024). A vezeték nélküli érzékelőhálózatok zaj- és rezgésenergia-gyűjtőinek többsége a mikrowatt (μW) és az milliwatt (mW) közötti energia termelésére alkalmas. Például egy piezoelektromos energiagyűjtő mérsékelt rezgés alatt körülbelül 3,2 mW-ot képes termelni, ami elegendő egy alacsony fogyasztású érzékelőcsomópont időszakos működtetéséhez (Ruan et al., 2017). Vagyis a folyamatos működés helyett az érzékelők jellemzően kondenzátorokban vagy szuperkondenzátorokban halmozzák fel az energiát, és periodikusan mintavételeznek, illetve továbbítanak adatokat (Praužek et al., 2018). Ez az energiatermelés tehát egy rendkívül életképes és költséghatékony megoldás a kis áramkörök táplálására és az IoT-alkalmazásokhoz gyakorlatilag nincs is más megvalósítható energiaellátási megoldás a piacon, mint az akkumulátorok és az önálló energiatermelés. Az akkumulátorok azonban inkább rövid távú megoldást jelentenek, továbbá környezeti hatásukat is tudva már nem meglepő, hogy az energiatermelő technológiák fejlesztése jelenleg igen népszerű. Nem beszélhetünk tehát az energiaátmenetről, vagyis a fosszilis energiaforrások elhagyásáról és a megújuló energiaforrások térnyeréséről, illetve a fosszilis energiaforrásokkal járó problémák megszüntetéséről az energiagyűjtéssel kapcsolatos kutatások nélkül. Az alternatív, fenntartható és megújuló energiaforrások keresése pedig egyúttal átalakíthatja a környezeti újrahasznosításhoz való viszonyunkat is.

Ilyen módszerek például (Onio, 2020; JE, 2023): az elektrokinetikus hatás alkalmazása, gondoljunk csak vissza az iskolai kísérletek során burgonyával vagy citrommal működtetett izzókra; a triboelektromos nanogenerátor, ami külső mechanikus energiát alakít át felhasználható elektromos árammá, így textilekbe szőve fenntartható energiát biztosíthat viselhető elektronikai eszközöknek, például egészségügyi monitorozó érzékelők és hordozható kijelzők számára; a termoelektromos anyagok használata, amelyek a motorokból vagy elektronikai eszközökből származó hulladékhőt elektromos árammá alakítják; a bioenergia-kinyerés, amely például a testhő vagy a véráramlás révén működtet olyan eszközöket, mint a pacemaker; valamint a piezoelektromos energiatermelés, ami mechanikai feszültséget vagy rezgéseket, pl. a hangot, az emberi mozgást vagy a nyomásváltozást alakítja át elektromos energiává, lásd a csuklómozgással tölthető, elem nélküli órákat.

A zajalapú energiatermelésben nincs egyértelmű globális vezető, mivel a kutatás és fejlesztés több országban párhuzamosan zajlik, és mindegyik másképp járul hozzá a fejlesztésekhez. A terület még mindig kialakulóban van, a munka nagy része laboratóriumi prototípusokra, megvalósíthatósági tanulmányokra és kisléptékű telepítésekre összpontosít. Ugyanakkor a motivációk, hajtóerők vizsgálata rámutat kirajzolódó mintázatokra.

A zajbegyűjtés két célja: a zajcsökkentés és a zajenergia-termelés. A fejlesztések e két célkitűzés megosztott, együttes vagy kizárólagos, szóló elérése köré rendeződnek, ami a technológia zajvédő megoldásokba történő beépítését, illetve a zajszint-mérés révén az infrastruktúra- és a városszervezést jelentik. Egyes megoldások jelentősen csökkenthetik a zajszintet, miközben az elnyelt akusztikus energiát elektromos árammá alakítják. Az olyan speciális eszközök, mint például a piezoelektromos elemekkel ellátott rezonátorok, jelentős módosítások nélkül, könnyen integrálhatók a vasúti infrastruktúrába, zajvédő falakba, pálya menti panelekbe (Yuan et al., 2020; Cui et al., 2021). Ezek működésének alapjául olyan kristályok szolgálnak, mint a kvarc, Seignette-só, turmalin, amelyek megfelelő irányú deformációja, vagyis mechanikai terhelése, elektromos potenciálkülönbséget eredményez, vagyis elektromos feszültséget kelt (a folyamat visszafelé is működik). Ez a jelenség a piezoelektromosság, amelyet Pierre és Jacques Curie már 1880-ban felfedezett. Ezt használják ki az olyan nyomásérzékelőkben is, mint például a hétköznapijaink alkalmazásában álló mikrofonokban, vagy az inverz piezoelektromos hatást a mobiltelefonok hangszóróiban.

Más megoldások inkább a zajszennyezés adataalapú kezelésével foglalkoznak, de ez is csak egy felhasználási területe a zajalapú energiatermelés sokrétű kiaknázásának: az önellátó, vezeték nélküli érzékelő hálózatok energiátáplálásának. A zajszennyezésen túl, egyéb témában valós idejű monitorozást végző eszközök esetében a zajenergia az okosváros kezdeményezések támogatójaként pótlólagos és tiszta energiaforrást jelenthet, csökkentve a karbantartási igényeket, pl. minimalizálva az akkumulátorcseréket (Vázquez-Castillo et al., 2022; Erdem et al., 2022).

Tehát egyetértés mutatkozik abban, hogy tiszta, zöld, megújuló villamosenergia-forrásként tekintenek a zajenergiára. A megújuló energia olyan forrásokra utal, amelyek természetes módon pótlódnak és fenntarthatóan hasznosíthatók, mint

például a nap-, szél-, víz-, geotermikus és biomassza-energia. A nemkívánatos zaj hanghullámok formájában hordozza az energiát, a környezeti energia egy olyan formája, amely kinyerhető és elektromos energiává alakítható. Ez a kinyert, begyűjtött zajenergia megújulónak tekinthető abban az értelemben, hogy egy folyamatosan jelenlévő, természetes melléktermékből (pl. közlekedési vagy ipari zajból) származik, amely nem merít ki semmilyen véges erőforrást. Ebben az összefüggésben olyan megújuló energiaforrás, amelyet gyakran emberi tevékenységek vagy maguk a megújuló energiarendszerek generálnak (pl. ahogy a szélturbinák működés közben zajt keltenek) (Sarkar et al., 2019; Tze-Zhang, 2022; Chaitanya et al., 2024; Kumar, C., & V., 2025). A jelenleg betakarítható zajenergia mennyisége kicsi, így leginkább alacsony energiafogyasztású alkalmazásokban, például utcai világításra, mikroelektronikai eszközök táplálására vagy más megújuló energiaforrások kiegészítésére alkalmas (Farghaly et al., 2019; Singh et al., 2021). Az energiatermelésben történő felhasználása viszont még így is segíthet csökkenteni a nem megújuló energiaforrásoktól való függőséget és a környezeti terhelést.

Amint a példák is mutatják, a zajbegyűjtő projektek gyakran kapcsolódnak tágabb fenntarthatósági és városfejlesztési célokhoz, a többfunkciós infrastruktúra és a ráfordítások megtérülésének maximalizálása érdekében is. Ugyanakkor a kapcsolódó motivációkban már vannak területi eltérések. Az európai motivációkat szigorú környezetvédelmi és zajszabályozások vezérik, amelyek a közegészségügy és a városi élhetőség javítására összpontosítanak. A zajalapú energiatermelést gyakran a zajcsökkentés járulékos előnyének tekintik, nem pedig az elsődleges célnak (Ibid; Tsionas et al., 2025). Továbbá, az európai projektek hangsúlyozzák a zajvédő falak és az energiagyűjtők városi tájba való harmonikus beillesztését, a funkcionális teljesítmény mellett előtérbe helyezve a vizuális megjelenést is. Ez magában foglalja a különféle felületek, formák és a növényzet használatát a hangzaskép és az esztétika javítása érdekében (Yang & Jeon, 2020; Mir et al., 2023). Egyre növekvő tendencia figyelhető meg a megújulóenergia-infrastruktúra „esztétizálásának” irányába is, valamint a lakosság bevonására a közös tervezési folyamatokba annak érdekében, hogy a létesítmények pozitívan járuljanak hozzá ne csak a technikai célokhoz, hanem a mindennapi városi élményhez is (Törnroth et al., 2022).

Ázsiában a vezeték nélküli akusztikus érzékelő hálózatokat (és a hozzájuk kapcsolódó gépi tanulási algoritmusokat) nemcsak a zaj mérésére, hanem pl. forgalmi helyzetek kezelésére, hangutasításokra vagy rendellenes hangok kiszűrésére is alkalmazzák (Luo et al., 2020). Ezzel egyidejűleg lehetővé téve az intelligens megfigyelést, a forgalomirányítást és a közbiztonság ellenőrzését is. Az adatvezérelt monitorozás az ázsiai okosvárosok tágabb céljait támogatja azáltal, hogy valós idejű adatokat biztosít a várostervezéshez, a zajcsökkentéshez és az infrastruktúra optimalizálásához. Továbbá, itt fontos szempont a hálózatok skálázhatósága és gyors telepítése is, hogy növelhessék a kapacitást és a teljesítményt, megfelelve a növekvő igényeknek a városodás, vagyis a városok számának gyarapodásában, és városiasodás, vagyis a települések belső minőségi változása, infrastruktúrális ellátottsága, életmódjának fejlődése tekintetében (Zhong et al., 2021; Hassan et al., 2023).

Ehhez hasonlóan az USA-t is inkább a technológiai innovációban rejlő lehetőségek motiválják, különösen a hatékony, robusztus és skálázható energiagyűjtők (pl. akusztikus metaanyagok, piezoelektromos anyagok) fejlesztése terén, amelyeket az okosváros infrastruktúrába lehet integrálni. A begyűjtött energiát gyakran vezeték nélküli érzékelő hálózatok és IoT-eszközök működtetésére szánják, amelyek valós idejű monitorozást és a városi környezet kezelését teszik lehetővé (Biswas & Manimala, 2022; An et al., 2023).

És végül a legfőbb motivációs erő szempontjából is különbség figyelhető meg a vizsgált területek közt. Ázsiában, különösen a gyorsan növekvő városokban, az energiaellátás kiegészítése áll a fókuszban, a nagy népsűrűség, a gyors urbanizáció és a növekvő villamosenergia-igény miatt (Singh et al., 2021; Mir et al., 2023). A zajból származó energiatermelést a növekvő igények egyik pótlólagos kielégítési módjának tekintik. Kína esetében a legfontosabb cél a nemzeti villamosenergia-hálózat kiegészítése és a gyors urbanizáció támogatása a megújuló energiaforrások városi infrastruktúrába való integrálásával. Erre példa a fotovoltaiikus zajvédő falak telepítése, amellyel az energiaigényt és a zajszenyezést egyszerre tudják kezelni a növekvő városokban (Zhong et al., 2021).

A zajalapú energiahasznosítási technológiák városi infrastruktúrába való integrálásának motivációi eltérhetnek a különböző politikai prioritások, városi kihívások és technológiai megközelítések miatt. A vizsgált szakirodalmak alapján feltételezhető, hogy a zaj, mint lehetséges energiaforrás felhasználásának jelenlegi társadalmi, gazdasági, technológiai és (szak)politikai feltételei kevésbé érdekelték a zajszenyezés csökkentésében, és ezzel inkább fenntartják a zaj, mint környezeti energia származékos keresletét (H_0).

3. Származékos kereslet a zaj, mint energiatermelési tényező iránt

A közlekedési zaj – beleértve a közúti, vasúti és légi forgalmat is – a kutatásokban vizsgált összes antropogén zajforrás körülbelül 32-43%-át teszi ki (Sordello, 2020). Emiatt érdemes áttekinteni azokat a társadalmi-gazdasági-területi folyamatokat, amelyek a közlekedésben tapasztalt változásokat generálják és ezzel összefüggésben hatással vannak a hangkörnyezet idő- és térszerkezetének változására is. Részletesen két tényező kerül bemutatásra a jelen tanulmány keretei közt, ezek: az európai és a globális gazdaság jövőképe, illetve a fokozódó, terjeszkedő és okosodó urbanizáció. Mindkettő közvetett módon befolyásolja a zajszintet: a gazdasági növekedés egyéni és szervezeti szinten is általában nagyobb mobilitással jár; illetve a városrégiók terjeszkedése (a megtett kilométerek növekedésével) ugyancsak hozzájárul a zajszenyezés növekedéséhez.

Az előrejelzések szerint a világ népessége a jelenlegi 8,1 milliárd főről 2050-re 9,8 milliárdra fog növekedni (UN, 2024). A globális GDP 2025-ben kb. 114 billió USD lesz (Statista, 2025), ami 2050-re várhatóan 228 billióra nő (Lu, 2023). Azonban míg 2015-ben szinte azonos nagyságú volt a feltörekvő országok (E7: Kína, India, Indonézia, Brazília, Oroszország, Mexikó és Törökország) és az ipa-

rilag legfejlettebb demokratikus országok (G7: USA, UK, Franciaország, Németország, Japán, Kanada és Olaszország) GDP aránya, addig 2040-re az E7-ek már megduplázzák a G7 teljesítményét (PwC, 2024). A világ GDP-jének jövőbeli növekedése pedig összefügg a globális kereskedelem növekedésével (tovább gyorsítja) és az áruforgalom változásával mennyiségében, valamint a feltörekvő országok, mint kiindulási és célállomások irányába való eltolódással (L'Hostis et al., 2016, p. 19). Tehát a globális növekedés fokozni fogja a teherszállítási mobilitást, különösen a fontos átjárókat összekötő európai utakon (kikötők, repülőterek, főbb logisztikai parkok) a nagyvárosi területek fogyasztói piacának elérése érdekében. A gazdasági növekedés egyéni szinten pedig általában nagyobb mobilitássá is alakul, amit pl. a turizmus növekedése mutat (Dubois et al., 2011).

Európában a városi térségekben élők aránya a 2014-es 73%-ról 2050-re várhatóan 84%-ra fog nőni (UN, 2018). Mivel a városok és régiók egymással versenyezve, lakosokat, munkahelyeket, turistákat stb. vonzanak magukhoz, a városi terjeszkedés a város-régiók kialakulásához és ezzel a nagyobb távolságok megtételéhez, például a munka- és lakóhely közti hosszabb ingázáshoz is vezet. Az okos városokkal összefüggésben a legfontosabb mobilitási trendek az (egyedi) IKT-szolgáltatások integrációjához, a közlekedési rendszerek digitalizálásához, a felhasználók és a közlekedési rendszerek közötti többszörös interakcióhoz, az okos (elektro)mobilitáshoz kapcsolódnak. Lásd pl. az (e-)autómegosztást, az igény szerinti mobilitást, az előfizetési rendszerű szolgáltatásokat, a mobilitás, mint szolgáltatás koncepcióját. További cél a mobilitás hatékonyságának növelése (csökkenteni a forgalom zsúfoltságát), az életminőség emelése, illetve az energiahatékonyság is, hogy a fenntartható közlekedés kevesebb költséget, kárt jelentsen a társadalom számára (lásd az externális problémáit (Kovács, 2024, pp. 53-61)).

A várostérségi közlekedés terhelési faktorai közt a személyszállításon túl a teherszállítás is fontos tényező. A városok mint gazdasági központok, nemcsak az áruk célállomásaként jelennek meg, de kiindulási helyekként is: a várostérségek a kimenő fuvarok 20-25%-áért, a beérkező szállítmányok 40-50%-áért felelősek (kamion-km). Ezen kívül a hulladékszállításról sem feledkezhetünk meg, ami 3-5% (ALICE, 2015, p. 14). A városi logisztika rendkívül rugalmas tevékenység, alkalmazkodik a demográfiai változásokhoz, az új fogyasztási és forgalmazási szokásokhoz és az új üzleti igényekhez, lásd az e-kereskedelem növekedését. És ahogy a logisztikai létesítmények száma nő a városokban, különösen a nagyvárosokban, a „logisztikai terjeszkedés”, szétterülés, dekoncentráció hatására, az áruszállítás mértéke is fokozódik.

Az éghajlatváltozás arra kényszerít minket, hogy lépjunk a megújuló energiák felé, aminek közvetlen hatása az alternatív hajtású járművek választása a tömeg-, az egyéni közlekedés és az áruszállítás esetében. Az elektromos járművek azonban csak a teljes autópark nagy arányú részesedésével tudják a zajkibocsátást jelentősen csökkenteni, illetve kiegészítő, pl. a sebességcsökkentési intézkedésekkel együtt. (Mivel nem a motorzaj, hanem a gördülési zaj, (gumiabroncs zaja, vagy röviden gumizaj) a fő forrása a zajkibocsátásnak 30 km/h-nál nagyobb sebességnél (Pallas et al., 2016).) Can és szerzőtársai (2020) tanulmánya, „A városi hang-

környezetek jövője: A mobilitási trendek hatása és a zajértékelés és -csökkentés módjai” alapján, először a zajszint mértéke és a járművek száma, a beépítettség, népsűrűség, valamint az úthálózat sűrűsége közt fennálló összefüggéseket érdemes tisztázni a hangkörnyezet vizsgálatához. Gyakori például az a kijelentés, hogy a járműforgalom megkétszerezése 3 dB-lel növeli a hangszintet. Továbbá, hogy a járművek számának 10%-os csökkentése csak 0,5 dB-lel csökkenti a zajt, ami alig észrevehető változás. De a járművek számának erőteljes csökkenése pl. 90%-kal (lásd forgalommentes városközpontok kerékpáros használatát) az átlagos zajszintet már 10 dB-lel csökkenti. Salomons és Berghauer Pont (2012) pedig arra hívják fel a figyelmet, hogy a közúti forgalom zaja nő, ha az úthálózat sűrűsége és a megtett út hossza nagyobb, viszont csökken a zajszint, ha a beépítettség, ezzel együtt a népsűrűség magas. Jelzik továbbá, hogy a zaj időbeli alakulása szintén kulcseleme a hatások értékelésének, vö. a nappali versus esti, éjszakai zajszintet (Can et al., 2020, pp. 4-5).

Az autópárra vonatkozó zajszabályozások az 1960-as évek óta folyamatosan fejlődnek, három-öt évente történő aktuálizálásuk révén, egyre szigorúbbak és harmonizáltabbak, világszerte alakítva a járművek tervezését és technológiáját. Például ilyen előírások: az UNECE R51 (az Egyesült Nemzetek Európai Gazdasági Bizottságának 51. számú előírásai); az Európai Gazdasági Közösség és az Európai Unió rendeletei, pl. az Európai Parlament és Tanács 540/2014/EU rendelete; az Amerikai Gépjárműmérnökök Társaságának szabványai; az ISO 362 szabványok, pl. az ISO 362-1:2015 szabvány az M és N kategóriájú (személygépjárművek és tehergépjárművek) közúti járművek jármű- és járművezető zajának (tipikus városi forgalmi körülmények között történő) mérésére vonatkozik. Ezek előírják a gyártók számára, hogy foglalkozzanak mind a hajtáslánc, mind a gumiabroncsok zajával, amelyeket viszont számos tényező befolyásol (pl. úttípus, járműtípus, üzemiállapot), így egyre bonyolultabbá téve a megfelelést. Számos műszaki, gazdasági és gyakorlati kihívás korlátozza az előírások és betartások teljes hatékonyságát (pl. magas megfelelési költségek, mérési bizonytalanságok).

A zaj tehát velünk marad. Egyrészt a gazdasági növekedés indukálta mobilitás miatt mint negatív externália. Vagyis olyan külső hatásként, amely befolyásolja a gazdasági tranzakción kívüli szereplők jóléti, fenntarthatósági nézőpontból inkább jóléti szintjét. Másrészt viszont, a gazdasági növekedés és az energiafelhasználás közötti kapcsolat szorossága, valamint az energiafelhasználás és humán fejlettség közötti pozitív irányú és szoros kapcsolat miatt (Stern, 2010; Arto et al., 2016; Ntanos et al., 2018; Bashmakov, 2019) mint pozitív externália. Vagyis olyan haszonként, amely nem a gazdasági tevékenység elsődleges szereplőinél, hanem a tevékenységhez képest külső tényezőnél jelentkezik.

Ennélfogva jön létre származékos kereslete is: a begyűjtésével előállított energiaforrás iránti kereslet eredményeként. Erre pedig azért vált alkalmassá, mert a gazdaságok fejlődésével az energiainhatékonyság nőtt, ami egyaránt tükrözi a technológiai fejlődést és az olyan strukturális változásokat is, mint például a versenyképesség javítása, a környezeti hatások mérséklése, vagy a természeti erőforrások szűkösségének enyhítése.

A zajgyűjtő technológiák iránti kereslet származékos, mivel függ a környezeti zaj jelenlététől, amely maga is más tevékenységek (pl. ipari tevékenységek, közlekedés, városi környezet) mellékterméke. A zajgyűjtő eszközök értéke csak akkor merül fel, ha megfelelő mennyiségű-minőségű környezeti zaj áll rendelkezésre ahhoz, hogy felhasználható energiává alakítsák. (H_o)

Összegzés

Amennyiben a zajra nem mint marginálisra, nem mint problémára, hanem a valóságunk feltételeként tekintünk, környezeti nézőpontból új erőforrásként kezelhetjük. A zajgyűjtés – a környezeti hangenergia begyűjtése és újrahasznosítása – a körforgásos gazdaság szemléletébe illeszkedik, mivel a zajt erőforrásként, nem pedig hulladékként kezeli, összhangban az erőforrás-hatékonysággal. A zajt környezeti externáliából értékes erőforrássá alakítja, támogatva a városi fenntarthatóságot, az erőforrás-hatékonyságot, kevésbé az ökológiai regenerációt. A hagyományos zajszabályozás „lineáris”, a zaj forrásánál vagy befogadójánál történő csökkentésre vagy blokkolására összpontosít, a körforgásos megközelítés a zaj felhasználható energiává alakításával a hasznosítási technológiákat részesíti előnyben.

A zajbegyűjtést a szakirodalom nem tárgyalja közvetlenül a hagyományos közgazdasági értelemben vett „származékos keresletként”. A koncepció azonban értelmezhető az energiabegyűjtő rendszerek és azok környezeti zajtól való függőségének fényében, amiként a jelen tanulmány elsők közt foglalkozott vele. A rezgés- és akusztikus energiagyűjtőkkel kapcsolatos kutatások azt mutatják, hogy teljesítményük és hasznosságuk közvetlenül összefügg a környezeti zaj jellemzőivel és intenzitásával. Ezen eszközök optimalizálását és telepítését tehát más elsődleges tevékenységek által keltett zaj megléte és mintázata vezérli.

Ahogy a zajcsökkentő intézkedések hatékonyabbá válnak, a begyűjtéshez rendelkezésre álló környezeti zaj mennyisége csökken. Ez azt jelenti, hogy az energiatermelési potenciált eredendően korlátozza a zajcsökkentés sikeressége. A zaj, mint energiaforrás felhasználása, a Pareto-tolerancia-zónában jelentkezik jelenleg: Pareto-javulást mutat (egyesekek helyzetének javítását anélkül, hogy mások helyzetét rontanák), de nem feltétlenül Pareto-optimalis (mindenki számára a legjobb). A közép- és hosszú távú gyakorlati megvalósítások fenntarthatósági célja azonban az kell, hogy legyen, hogy egyensúlyba hozzák ezeket, optimalizálva mind az elfogadható zajszintet, mind az energiatermelést. Ehhez azonban számos feltételnek is teljesülni kell, ilyen például az érdekelt felek egyeztetése, a jól meghatározott tulajdonjogok, az információs aszimmetria feloldása, a tranzakciós költségek csökkentése, a szakpolitikai érdekképviselő, az etikai és társadalmi tudatosság, valamint az adaptív menedzsment.

Irodalomjegyzék

- An, J., Mahmoud, W., & Denis, M. (2023). Acoustic energy harvesting of ambient noise urban environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 153(3), A46. <https://doi.org/10.1121/10.0018104>
- Arto, I., Capellán-Pérez, I., Lago, R., Bueno, G., & Bermejo, R. (2016). The energy requirement of a developed world. *Energy for Sustainable Development*, 33, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.001>
- Bahl, S., Nagar, H., Singh, I., & Sehgal, S. (2020). Smart materials types, properties and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 28(3), 1302-1306. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.505>
- Bashmakov, I. (2019). Energy efficiency and economic growth. *Voprosy Ekonomiki*, 10, 32-63. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2019-10-32-63>
- Beverungen, D., Lüttenberg, H., & Wolf, V. (2018). Recombinant Service Systems Engineering. *Business & Information Systems Engineering*, 60, 377-391. <https://doi.org/10.1007/s12599-018-0526-4>
- Biswas, S., & Manimala, J. (2022). Quiet power: Exploring the feasibility of a noise-mitigating, thermoacoustic energy harvester. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151(4), A179. <https://doi.org/10.1121/10.0011025>
- Can, A., L'Hostis, A., Aumond, P., Botteldooren, D., Coelho, M.C., Guarnaccia, C., & Kang, J. (2020). The future of urban sound environments: Impacting mobility trends and insights for noise assessment and mitigation. *Applied Acoustics*, 170, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107518>
- Chaitanya, C., Vital, M. L. N., Tejaswi, P., Ankitha, M., & SriLatha, P. N. S. (2024). A Cognitive Approach to Generate Electrical Energy from Acoustic Medium. *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 556-561. <https://doi.org/10.1109/ICPEICES62430.2024.10719322>
- Coase, R. (2004). *A vállalat, a piac és a jog*. Nemzeti Tankönyvkiadó
- Cui, X., Shi, J., Liu, X., & Lai, Y. (2021). A panel acoustic energy harvester based on the integration of acoustic metasurface and Helmholtz resonator. *Applied Physics Letters*, 119, 253903. <https://doi.org/10.1063/5.0074701>
- Dubois, G., Peeters P., Ceron, J-P., & Gössling, S. (2011). The Future Tourism Mobility of the World Population: Emission Growth versus Climate Policy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, A Collection of Papers: Transportation in a World of Climate Change*, 45(10), 1031-1042.
- Erdem, H., Leung, H., & Xie, N. (2022). Energy Neutral Urban Noise Monitoring and Classification With LoRaWAN Based IoT. *2022 IEEE Sensors*. <https://doi.org/10.1109/SENSORS52175.2022.9967073>

- Farghaly, Y., Hemeida, F. A. A., & Salah, S. (2019). Noise utilisation as an approach for reducing energy consumption in street lighting. *PLoS ONE*, 14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219373>
- Geels, F. W. (2018). Disruption and low-carbon system transformation: Progress and new challenges in socio-technical transitions research and the Multi-Level Perspective. *Energy Research & Social Science*, 37, 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.010>
- Hassan, E., Kouritem, S. A., Amer F. Z., & Mubarak, R. I. (2023). Acoustic energy harvesting using an array of piezoelectric cantilever plates for railways and highways environmental noise. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3), 102461. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102461>
- Kovács, Sz. (2024). Átálló gazdaságok - A jövőből előre hozott működés. In L. Balázs (Ed.), *Fenntarthatóság és a jövő gazdasága* (pp. 53-61). DUE Press.
- Kumar, C., & Srikanth, V. (2025). Conversion of Sound to Electric Energy Using Piezoelectric Sensor. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 7(1). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i01.36617>
- L'Hostis, A., Müller, B., Meyer, G., Brückner, A., Foldesi, E., Dablanc, L., Blanquart, C., Tuominen, A., Kostianen, J., Pou, C., Urban, M., Keseru, I., Coosemans, T., de la Cruz, M. T., Val, S., Golfetti, A., Napoletano, L., Skoogberg, J., Holley-Moore, G., Chalkia, E., van der Werf, I., Bos, F., Grosso, S., Stans, Y., & Langheim, J. (2016). *MOBILITY4EU - D2.1 - Societal needs and requirements for future transportation and mobility as well as opportunities and challenges of current solutions* [Research Report]. IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. <https://hal.science/hal-01486783v2/document>
- Lanzolla, G., Pesce, D., & Tucci, C. L. (2020). The Digital Transformation of Search and Recombination in the Innovation Function: Tensions and an Integrative Framework. *Journal of Product Innovation Management*, 38(1), 90-113. <https://doi.org/10.1111/jpim.12546>
- Lu, M. (2023, August 22). Visualising the Future Global Economy by GDP in 2050. *Visual Capitalist*. <https://www.visualcapitalist.com/visualizing-the-future-global-economy-by-gdp-in-2050/>
- Luo, L., Qin, H., Song, X., Wang, M., Qiu, H., & Zhou, Z. (2020). Wireless Sensor Networks for Noise Measurement and Acoustic Event Recognitions in Urban Environments. *Sensors*, 20, 2093. <https://doi.org/10.3390/s20072093>
- Mir, F., Mandal, D., & Banerjee, S. (2023). Metamaterials for Acoustic Noise Filtering and Energy Harvesting. *Sensors*, 23, 4227. <https://doi.org/10.3390/s23094227>
- Ntanos, S., Skordoulis, M., Kyriakopoulos, G., Arabatzis, G., Chalikias, M., Galatsidas, S., Batzios, A., & Katsarou, A. (2018). Renewable Energy and Economic Growth: Evidence from European Countries. *Sustainability*, 10, 2626. <https://doi.org/10.3390/SU10082626>

- Pallas, M.-A., Bérengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conter, M., & Muirhead, M. (2016). Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113, 89-101.
- Prauzek, M., Konecny, J., Borova, M., Janosova, K., Hlavica, J., & Musilek, P. (2018). Energy Harvesting Sources, Storage Devices and System Topologies for Environmental Wireless Sensor Networks: A Review. *Sensors*, 18, 2446. <https://doi.org/10.3390/s18082446>
- Ruan, T., Chew, Z. J., & Zhu, M. (2017). Energy-Aware Approaches for Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Nodes. *IEEE Sensors Journal*, 17, 2165-2173. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2665680>
- Salomons, E. M., & Berghauser Pont, M. (2012). Urban traffic noise and the relation to urban density, form, and traffic elasticity. *Landscape and Urban Planning*, 108(1), 2-16.
- Sarkar, S., Chew, Z. J., & Zhu, M. (2019). A Technique for Generation of Renewable Electrical Energy from Noise. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 79, 101-106. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9453-0_11
- Sarker, M., Riaz, A., Lipud, M. S. H., Md Saade, M. H., Ahmada, M. N., Kadira, R. A., & Olazagoitiab, J. L. (2024). Micro energy harvesting for IoT platform: Review analysis toward future research opportunities. *Heliyon*, 10(6), e27778. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27778>
- Serres, M. (1982). *The Parasite*. The Johns Hopkins University Press.
- Singh, A. K., Khatoon, S., Saxena, K., & Saxena, A. (2021). Impact Review Analysis & Scope of Noise Pollution for Energy Harvesting. *Journal of Engineering Research, Special Issue*, 112-121. <https://doi.org/10.36909/jer.emsme.13865>
- Sordello, R., Ratel, O., De Lachapelle, F. F., Leger, C., Dambry, A., & Vanpeene, S. (2020). Evidence of the impact of noise pollution on biodiversity: a systematic map. *Environmental Evidence*, 9, 1-27. <https://doi.org/10.1186/s13750-020-00202-y>
- Stern, D. (2010). The role of energy in economic growth. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 26-51. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05921>
- Szabó, L. (2017). The history of using solar energy. *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974451>
- Törnroth, S., Wikberg Nilsson, A., & Luciani, A. (2022). Design thinking for the everyday aestheticisation of urban renewable energy. *Design Studies*, 79, 101096. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2022.101096>
- Tsionas, I., Llaguno-Munitxa, M., & Stephan, A. (2025). Environmental effects of urban wind energy harvesting: a review. *Buildings & Cities*, 6(1), 1-24. <https://doi.org/10.5334/bc.491>

- Tze-Zhang A., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Ulukus, S., Yener, A., Erkip, E., Simeone, O., Zorzi, M., & Grover, P. (2015). Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(3), 360-381. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2391531>
- Vázquez-Castillo, J., Castillo-Atoche, A., Estrada-López, J., Osorio-de-la-Rosa, E., Becerra-Nuñez, G., & Heredia-Lozano, J. (2022). Energy-Saving Techniques for Urban Noise WSN With Kalman-Based State Estimation and Green Facade Energy Harvester. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-10. <https://doi.org/10.1109/tim.2022.3145385>
- Walker, J. (2020). Neoliberalism, Environmentalism, and the Crisis of the 1970s. Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3936-7_1
- Xiao, T., Makhija, M., & Karim, S. (2021). A Knowledge Recombination Perspective of Innovation: Review and New Research Directions. *Journal of Management*, 48(6), 1724-1777. <https://doi.org/10.1177/01492063211055982>
- Yang, W., & Jeon, J. (2020). Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. *Building and Environment*, 182, 107121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107121>
- Yuan, M., Sheng, X., Cao, Z., Pang, Z., & Huang, G. (2020). Joint acoustic energy harvesting and noise suppression using deep-subwavelength acoustic device. *Smart Materials and Structures*, 29, 035012. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab6697>
- Zhong, T., Zhang, K., Chen, M., Wang, Y., Zhu, R., Zhang, Z., Zhou, Z., Qian, Z., Lv, G., & Yan, J. (2021). Assessment of solar photovoltaic potentials on urban noise barriers using street-view imagery. *Renewable Energy*, 168, 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.044>
- ALICE. (2015). *Urban Freight. Research & Innovation Roadmap*. Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe. <https://www.etp-logistics.eu/wp-content/uploads/2022/08/Urban-Freight-Roadmap.pdf>
- EC. (2021). *Zero Pollution Action Plan*. https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en#:~:text=On%2012%20May%202021%2C%20the,the%20Zero%20Pollution%20Stakeholder%20Platform
- EEA. (2021, May 11). A zajszenyezés jelentős probléma mind az emberi egészség, mind a környezet szempontjából. <https://www.eea.europa.eu/hu/articles/a-zajszenyez-es-jelentos-problema-mind>
- EEA. (2023, August 29). A zajszenyezés továbbra is elterjedt Európa-szerte, de mértéke csökkenthető. <https://www.eea.europa.eu/hu/jelzesek/jelzesek-2020/articles/a-zajszenyez-es-tovabbra-is-elterjedt>

- EEA. (2025, June 24). Environmental noise in Europe — 2025. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environmental-noise-in-europe-2025>
- EEA-EMSA. (2025, February 4). European Maritime Transport Environmental Report 2025. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/maritime-transport-2025>
- ITF. (2023). *ITF Transport Outlook 2023*. <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/b6cc9ad5-en/index.html?itemId=/content/publication/b6cc9ad5-en>
- JE. (2023, August 17). Energy Harvesting: What Is It and How Can It Help? <https://justenergy.com/blog/energy-harvesting/>
- Onio. (2020, June 22). 5 Niche energy harvesting technologies. <https://www.onio.com/article/niche-energy-harvesting-technologies.html>
- PwC. (2024). *The World in 2050*. <https://www.pwc.com/gx/en/research-insights/economy/the-world-in-2050.html#keyprojections>
- Statista. (2025). *Global gross domestic product (GDP) at current prices from 1985 to 2030* [Data set]. <https://www.statista.com/statistics/268750/global-gross-domestic-product-gdp/>
- UN. (2018). *World Urbanization Prospects 2018*. <https://population.un.org/wup/>
- WHO. (2018, October 10). New WHO noise guidelines for Europe released. <https://www.who.int/europe/news/item/10-10-2018-new-who-noise-guidelines-for-europe-released>
- WHO. (2024, May 28). Heat and health. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health#:~:text=The%20body's%20inability%20to%20regulate,and%20cause%20acute%20kidney%20injury>