



Reziliens útpályaszerkezetek méretezése

Primusz Péter, Kisfaludi Balázs

Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

E-mail: primusz.peter@uni-sopron.hu, kisfaludi.balazs@uni-sopron.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.06](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.06)

KIVONAT

Az útpályaszerkezetek tervezése napjainkban már nem csupán a forgalmi terhelés és költséghatékonyság figyelembevételével történik, hanem a fenntarthatóság és a reziliencia elvei mentén is. A reziliencia – azaz az infrastruktúra ellenálló- és alkalmazkodóképessége – a klímaváltozás, a növekvő hálózati terhelés és az egyre gyakoribb zavaró hatások (pl. extrém időjárás) miatt vált hangsúlyossá. A korszerű útpálya-gazdálkodásban (PMS) a reziliencia célja nemcsak a károsodások elkerülése, hanem a gyors helyreállítás biztosítása, társadalmi és gazdasági következmények minimalizálása mellett.

A tanulmány célja egy olyan mechanikai-empirikus méretezési megközelítés kialakítása, amely integrálja a reziliencia négy kulcs-dimenzióját: robusztusság, gyorsaság, redundancia és erőforrás-mobilizáció. A szerzők a „reziliencia háromszög” analitikus modelljén keresztül mutatják be, miként számszerűsíthető a pályaszerkezet működőképességének időbeli alakulása egy zavaró esemény után. Az új megközelítés célja, hogy a klasszikus méretezési eljárások kibővítésével hozzájáruljon az ellenállóbb és adaptívabb úthálózatok tervezéséhez.

Kulcsszavak: reziliencia, útpályaszerkezet-méretezés, fenntartható infrastruktúra, klímaváltozás, adaptáció

ABSTRACT

Contemporary pavement design encompasses considerations beyond traffic load and cost-efficiency, with an increasing emphasis on sustainability and resilience principles. The term "resilience" is defined as the infrastructure's ability to withstand and adapt to various challenges. This concept has gained prominence due to the impact of climate change, increasing network loads, and the growing frequency of disruptive events, such as extreme weather conditions. In contemporary pavement management systems (PMS), the objective of resilience is twofold: firstly, to prevent damage, and secondly, to ensure rapid recovery while minimising social and economic consequences.

The objective of this study is to develop a mechanistic-empirical design approach that integrates the four key dimensions of resilience: robustness, rapidity, redundancy, and resource mobilisation. Utilising the analytical model of the "resilience triangle," the authors demonstrate the quantification of the temporal evolution of pavement functionality following a disruptive event. This novel approach aims to extend classical design methodologies to facilitate the planning of more resilient and adaptive road networks.

Keywords: resilience, pavement design, sustainable infrastructure, climate change, adaptation

Dr. Primusz Péter

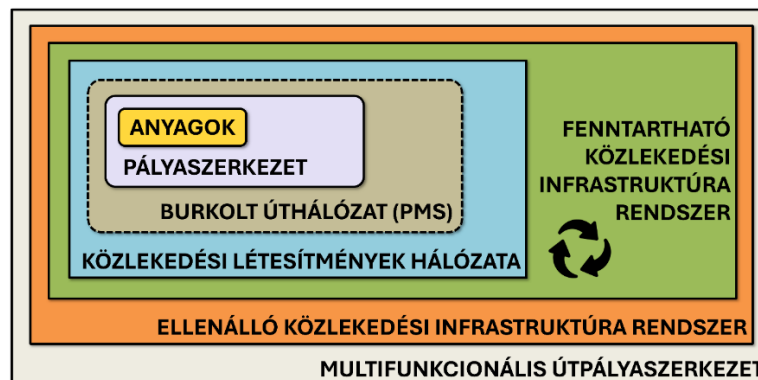
A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése. PhD hallgató a BME Út és Vasútépítési Tanszéken.

Dr. Kisfaludi Balázs

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Elsődlegesen erdészeti utak forgalomelemzésével foglalkozott, emellett részt vett talajstabilizációval, illetve úthálózatok vizsgálatával foglalkozó kutatásokban.

1. BEVEZETÉS

Az útpályaszerkezetek méretezése, építése és fenntartása kezdetben elsősorban a járműforgalom biztonságos lebonyolítására és a gazdasági szempontból hatékony kivitelezésre, illetve üzemeltetésre összpontosított. A technológia és a tudományos ismeretek fejlődésével azonban a mérnöki célok és a pályaszerkezetekkel szemben támasztott elvárások folyamatosan bővültek, ami egyúttal a rendszerhatárok újra definiálását is szükségessé tette [1].



1. ábra. Útpályaszerkezet rendszerhatárváltozások az elmúlt 100 évben, szerkesztve [1] alapján.

Míg a 20. század elején a hangsúly az altalaj teherbíró képességének meghatározásán és a különböző útépitési anyagok szerkezeti teljesítményén volt, a közúthálózat kiépítésével a figyelem kiterjedt a burkolattípusok és -szerkezetek optimalizálására. A hálózatok kiépülését követően a fő cél a meglévő infrastruktúra fenntartása és felújítása lett, elsősorban költséghatékonysági és közlekedésbiztonsági szempontok szerint. Az elmúlt évtizedekben ehhez társult a fenntarthatóság szempontja is, amely a környezeti hatások, az erőforrás-felhasználás, valamint a társadalmi igények figyelembevételével bővítette az útpályaszerkezetekkel kapcsolatos mérnöki gondolkodás kereteit [1].

A komplex közlekedési rendszerekbe való integráció, a munkaterületek okozta forgalmi zavarok csökkentése, valamint az éghajlatváltozás hatásaival szembeni alkalmazkodási igény nyomán mára a fenntarthatóság mellett egyre hangsúlyosabban jelenik meg a reziliencia fogalma, ami szoros kapcsolatban áll a pályaszerkezet gazdálkodási rendszerrel (Pavement Management Systems, PMS). A PMS eszköztárként szolgál az útpályák állapotának nyomon követéséhez, elemzéséhez és karbantartásához, figyelembe veszi a forgalmi terhelést, az éghajlati viszonyokat és a költségvetési korlátokat is, ezáltal támogatja a hosszú távú teljesítmény optimalizálását és az úthálózat ellenállóbbá tételét. A reziliens infrastruktúra így nem csupán a fenntartás hatékonyságát növeli, hanem hozzájárul a közlekedési rendszer egészének megbízhatóságához és alkalmazkodóképességéhez is.

2. A REZILIENCIA FOGALMA

A rugalmas ellenálló képesség (reziliencia) fogalma viszonylag újnak tekinthető és folyamatosan fejlődik, bár első meghatározása már az 1970-es évekre nyúlik vissza. A fogalom meghatározása a két fő fejlődési irányzat szerint lehet **fogalmi** és **analitikus** [2].

A fogalmi meghatározások egyik legkorábbi és legismertebb példája [3] munkájához kapcsolódik, aki az ökológiai rendszerek kontextusában vizsgálta az ellenállóképességet. Az ő megközelítése szerint az ellenállóképesség mértéke az a zavarás, amelyet egy rendszer képes elviselni anélkül, hogy

összeomlana. Egy másik fontos definíció [4] nevéhez fűződik, amelyet ma is széles körben alkalmaznak. Az ellenállóképességet az emberi közösségek azon képességeként határozta meg, amely lehetővé teszi számukra, hogy elviseljék az infrastruktúrájukat érő külső hatásokat, majd képesek legyenek helyreállni ezekből a zavarokból. Ez a meghatározás két kulcsfontosságú elemet vezetett be:

1. Az ellenállóképesség nem csupán az egyes szerkezetek vagy infrastruktúrák, hanem a közösségek tulajdonsága.
2. Az ellenállóképesség nemcsak az ellenállás képességét jelenti, hanem a gyors és hatékony helyreállítási folyamat biztosítását is.

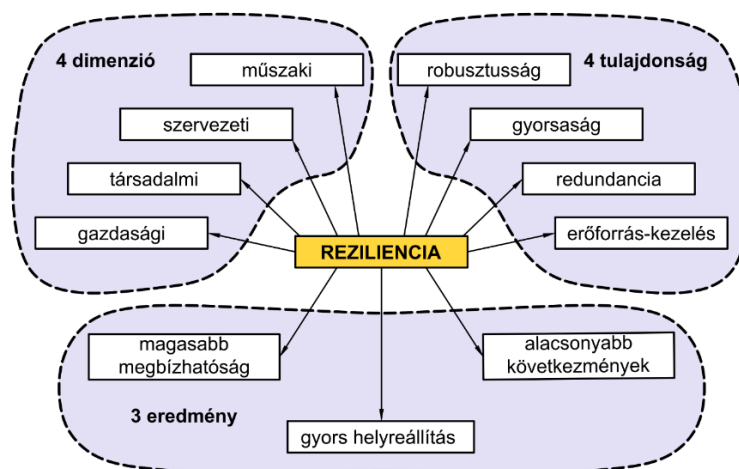
A fenti két aspektus szorosan összefügg egymással. Például egy híd szerkezeti ellenállóképessége nagyrészt a műszaki jellemzőitől függ, míg a helyreállítás folyamata már erősen befolyásolt a társadalom technológiai, gazdasági és politikai feltételeitől is. A helyreállítási képesség fontosságát [5] tovább hangsúlyozta, aki szerint az ellenállóképesség azon múlik, milyen gyorsan térnek vissza a vizsgált változók az egyensúlyi állapotukhoz egy zavaró hatást követően. A rugalmas ellenálló képesség minden meghatározásában megjelenik a robusztusság (azaz az ellenállás egy külső sokkhatással szemben) és a gyors helyreállítás képessége. [6] egy keretrendszert alkottak, amely szerint az infrastruktúrák ellenállóképességének négy dimenziója van:

1. Műszaki dimenzió: az építési és technológiai jellemzők.
2. Szervezeti dimenzió: a menedzsment, karbantartás és vészhelyzeti reakciók.
3. Társadalmi dimenzió: a közösségre gyakorolt hatások és azok mérséklése.
4. Gazdasági dimenzió: az infrastruktúra működőképességének csökkenésével és helyreállításával kapcsolatos költségek.

Ezeket túl az ellenállóképességet négy tulajdonság jellemzi:

1. Robusztusság: a rendszer azon képessége, hogy egy szélsőséges eseményt követően is fenntartsa működését.
2. Gyorsaság: az infrastruktúra funkcionalitásának helyreállítási sebessége.
3. Redundancia: a rendszer elemeinek és komponenseinek helyettesíthetősége.
4. Erőforrás-mobilizáció: a problémák azonosítása, a prioritások meghatározása és a szükséges erőforrások mozgósítása.

A robusztusság és a gyors helyreállítás az ellenállóképesség fő céljai, míg a redundancia és az erőforrás-mobilizáció ezek elérésének eszközei.



2. ábra. Az ellenállóképesség meghatározásában figyelembe vett szempontok [2].

Az ellenállóképesség három fő **eredménye** a következő:

1. Nagyobb megbízhatóság: csökkenti annak valószínűségét, hogy a rendszer kritikus állapotba kerüljön.
2. Gyors helyreállítás: minimalizálja a működéskiesés időtartamát.
3. Alacsony társadalmi-gazdasági következmények: mérsékli az extrém események társadalmi és gazdasági hatásait, ezzel csökkentve az ezekhez kapcsolódó kockázatokat is.

Bruneau és mtsai. (2003) [6] meghatározása az egyik legszélesebb körben alkalmazott megközelítés maradt, bár számos további definíció született, amelyek különböző infrastrukturális rendszerekre és alkalmazási területekre összpontosítanak.

Az Egyesült Államok Szövetségi Autópálya Igazgatósága (FHWA) szerint egy közlekedési rendszer rezilienciája azt jelenti, hogy képes előre látni, felkészülni és alkalmazkodni a változó körülményekhez, valamint ellenállni, reagálni és gyorsan helyreállni a zavaró hatások után. Ez magában foglalja [7]:

(A) a veszélyekkel szembeni ellenállást vagy a szélsőséges időjárási események és természeti katasztrófák hatásainak elviselését, illetve a zavaró időjárási események vagy természeti katasztrófák hatásának mértékének vagy időtartamának csökkentését egy projektre nézve; és

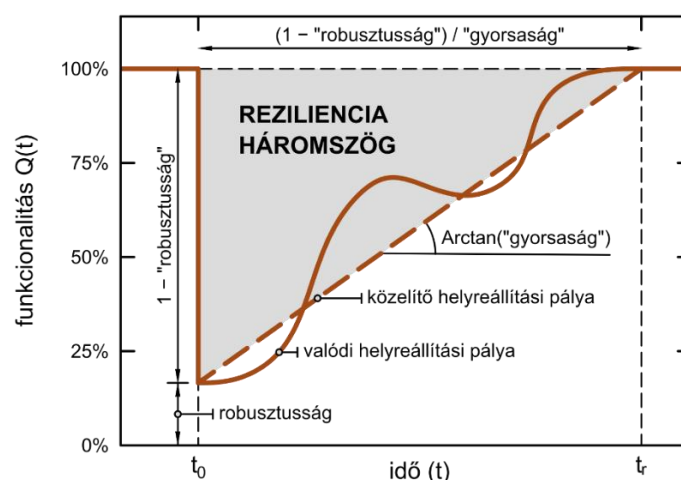
(B) azt a képességet, hogy a projekt rendelkezzen elnyelő-, alkalmazkodó- és helyreállító kapacitással, amely csökkenti annak sérülékenységet az időjárási eseményekkel vagy egyéb természeti katasztrófákkal szemben.

A reziliencia fogalma tehát nem csupán az infrastruktúra megerősítését jelenti, hanem magában foglalja az alkalmazkodóképességet és a reagálási képességet is. Az aszfalt útpályaszerkezetek esetében ez különböző kötőanyagok alkalmazását, a „Perpetual Pavement” tervezési megközelítést vagy a várható zavaró eseményeket figyelembe vevő tervezési módszereket jelentheti.

3. AZ ELLENÁLLÓKÉPESSÉG ANALITIKAI ÉRTELMEZÉSE

Az eddigi kutatások szerint a reziliencia négy tulajdonsága közül a robusztusság és redundancia határozza meg a funkcióvesztés mértékét, míg a gyorsaság és erőforrások befolyásolják a helyreállítás időtartamát. Ez a világos megfeleltetés a funkcionalitás és az idő dimenzióinak szempontjából különösen alkalmasnak bizonyul a reziliencia szisztematikus, vizsgálatára. Ennek megfelelően a továbbiakban a reziliencia vizsgálata két dimenzióra – funkcionalitás és idő – koncentrál, míg a négy részterületet e két dimenzióhoz párosítva elemzi.

Az analitikai rugalmas ellenállóképesség (reziliencia) egy széles körben használt koncepcionális meghatározása [6] munkájára vezethető vissza, amely bevezette a „reziliencia háromszög” fogalmát. Ez a modell leírja a reziliencia csökkenését egy szélsőséges esemény hatására, és összekapcsolja a reziliencia számszerűsítését a funkcionalitás időbeli változásával.



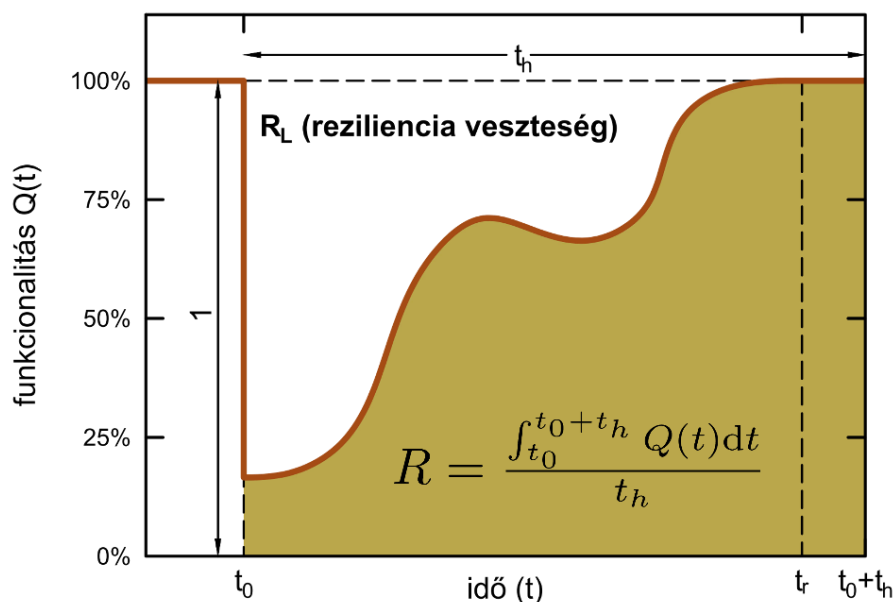
3. ábra. Rugalmassági háromszög (árnyékolt terület); $t = t_0$ -nál a külső sokk bekövetkezik, és $t = t_r$ -nél a helyreállítás befejeződik [2].

A reziliencia háromszög egyik oldala a funkcionalitásvesztést méri (1 – robusztusság), a második oldal a teljes helyreállítási időt jelöli, míg az átló a funkcionalitás helyreállításának közelítő egyenesét adja meg. A 3. ábrának megfelelően a reziliencia növekedése a funkcióvesztés időbeli alakulását ábrázoló szürke terület minimalizálásával jár együtt. Ez az egyszerű analitikai modell később több kutatás alapjául szolgált.

Az alábbi egyenlet egyetlen ún. reziliencia indexben (R) egyesíti a rugalmas ellenállóképesség összes dimenzióját, tulajdonságát és eredményét:

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+t_h} Q(t)dt}{t_h} \quad (1)$$

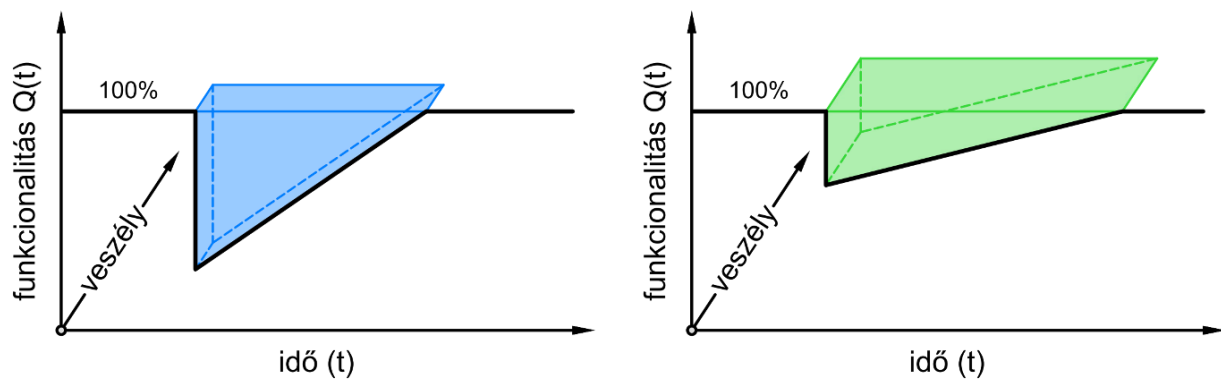
ahol R a reziliencia-index $[0,1]$ intervallumon, $Q(t)$ a rendszer százalékos „működőképessége” (vagy „használhatósága”) a t időpillanatban, t_h pedig az elemzés által vizsgált időhorizont. A fenti egyenlet számlálója a $Q(t)$ helyreállítási pálya alatti területet jelöli, míg a nevező az esemény hatása nélküli ellenállóképesség értékét mutatja, mivel $100\% \cdot t_h = t_h$. Az egyenlet grafikus értelmezését a 4. ábra mutatja be.



4. ábra. Az 1. egyenlet számlálója a helyreállítási görbe alatti színezett terület, a nevező pedig a teljes terület, ahol a szélesség = t_h a magasság = 1 [2].

Az (1) egyenlet előnye, hogy a reziliencia minden dimenzióját, tulajdonságát és eredményét egyetlen skaláris mutatóban egyesíti, amely a $[0;1]$ intervallumon értelmezett. Ez különösen értékes eredmény a jelenlegi infrastruktúra-fenntarthatósági értékelési rendszerekhez képest, amelyekben a kvantitatív mutatók alkalmazása még mindig fejlesztés alatt áll. Ugyanakkor kérdéses, mennyire indokolt a reziliens infrastruktúrát meghatározó különböző jellemzőket egyetlen összetett indexszé sűríteni [2], [8].

Többféle veszélyforrás esetén, fontos szem előtt tartani, hogy a különböző veszélyek eltérő hatással lehetnek a rezilienciára, továbbá ezek a hatások eltérően érinthetik a funkcionalitást és az időt. Ezt a 5. ábra egy háromdimenziós ábrázolással szemlélteti: az egyik veszélyforrás (jobb oldali kép) kisebb funkcióvesztést okoz, viszont hosszabb helyreállítási időt igényel, míg egy másik veszélyforrás (bal oldali kép) nagyobb funkcióvesztéssel jár, de gyorsabban helyreállítható.



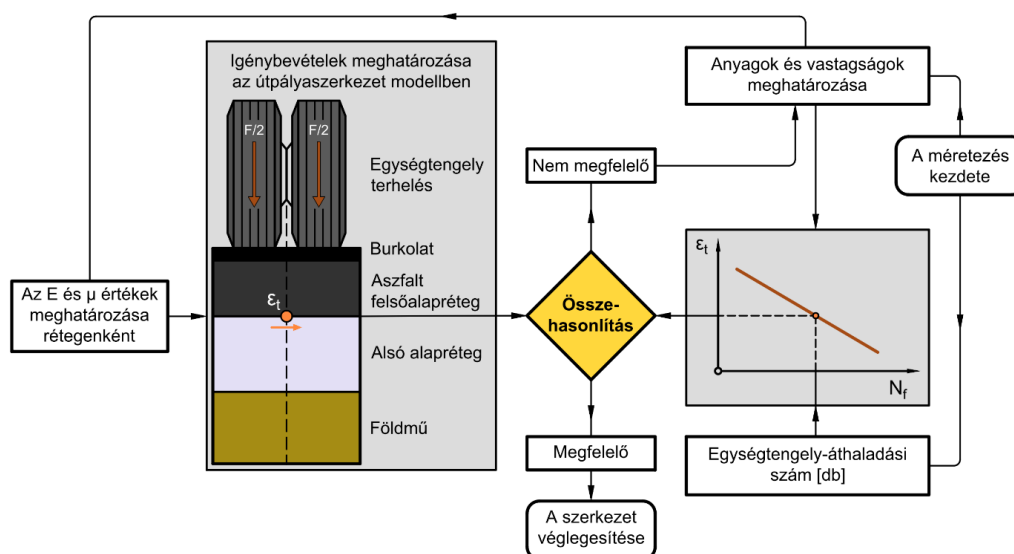
5. ábra. A testek „mélységéből” jól látható, hogy a veszély által okozott kockázat hol nagyobb [9].

A reziliencia értékelésénél érdemes tehát harmadik dimenzióként figyelembe venni a veszélyeztetettség mértékét is. Így a terület térfogattá alakul, ami a vizsgált szerkezet sérülékenységet jelzi: minél kisebb a reziliencia és minél nagyobb a veszély relevanciája, annál nagyobb a térfogat. Ugyanakkor ez egyben reziliencia potenciált is mutat, vagyis azt, hogy a reziliencia növelésére fordított befektetések milyen hatékonysággal csökkenthetik a kockázatokat [9].

A reziliencia értékelését veszélyenként külön-külön végző számítási eljárás lehetővé teszi, hogy az adott objektum rezilienciáját minden egyes veszélyforrás tekintetében külön mutassuk ki. Ennek egyik előnye, hogy az alkalmazók számára olyan mutatószámok állnak rendelkezésre, amelyek pontosan meghatározzák, mely veszélyekkel szemben mutat alacsony rezilienciát az adott rendszer. Amennyiben egy összesített reziliencia-indexet alkalmazunk, amely az összes figyelembe vett veszélyforrást egyesíti egy mutatóban, fontos figyelembe venni az egyes veszélyek tényleges kockázati súlyát.

4. HAGYOMÁNYOS PÁLYASZERKEZET MÉRETEZÉS

A mechanikai-empirikus (M-E) útpályaszerkezet méretezés elve egyszerű, és megfelel bármely más tartószerkezet méretezési gyakorlatának. A külső kerékterhelés által okozott kritikus igénybevételeket összehasonlítják azokkal a határigénybevételekkel, amelyeket a rétegek az anyagi tulajdonságaik alapján képesek elviselni. A határigénybevételeket, amelyek általában a forgalom függvényében alakulnak, laboratóriumi vizsgálatok vagy kísérleti útszakaszokon végzett hosszútávú megfigyelések empirikus teljesítményegyenletei, ún. leromlási modellek alapján számolják ki.



6. ábra. A hagyományos mechanikai-empirikus (M-E) útpályaszerkezet méretezés folyamata.

A méretezés fő lépései a következők:

1. Kiindulási adatok meghatározása: A tervezési időtartam, a forgalom nagysága (nehéz járművek egységtengelye), a talajvizsgálat alapján meghatározott földműteherbírás és **klimatikus jellemzők** (pl. hőmérséklet, csapadék).
2. Előzetes útpályaszerkezet összeállítása a forgalom és földműteherbírás figyelembevételével.
3. Rugalmasságtani számítások a kerékterhelés következtében ébredő kritikus feszültségek, alakváltozások és elmozdulások meghatározására, többféle forgatókönyv figyelembevételével.
4. Ellenőrzés határigénybevételekkel: Az anyagfajták határigénybevételeit az egységtengelyáthaladási szám függvényében vizsgálják.
5. Szerkezeti adatok véglegesítése az útépitési technológia figyelembevételével.

Az egyes lépéseket grafikusán a 6. folyamatábra mutatja be.

Az (1) pontban jól látható, hogy az M-E méretezési módszer fontos bemeneti adatai közé tartoznak a klimatikus jellemzők, mint amilyen pl. a hőmérséklet és a csapadék. A csapadék hatással van az útpályaszerkezet szemcsés rétegeinek és a földműnek a teljesítményére, mivel ezek csak megfelelő víztartalom mellett teherbíróak, míg a hőmérséklet elsősorban az aszfaltrétegek merevségét befolyásolja. Az M-E méretezési módszerek általában múltbeli éghajlati adatokra támaszkodnak. Azonban a következő évszázadban várható jelentős éghajlati változások fényében a történeti éghajlati adatok alkalmazása a jövőbeli események előrejelzésében, azok súlyosságának vagy gyakoriságának meghatározásában már nem feltétlenül fogja biztosítani a szerkezettől elvárt élettartamot.

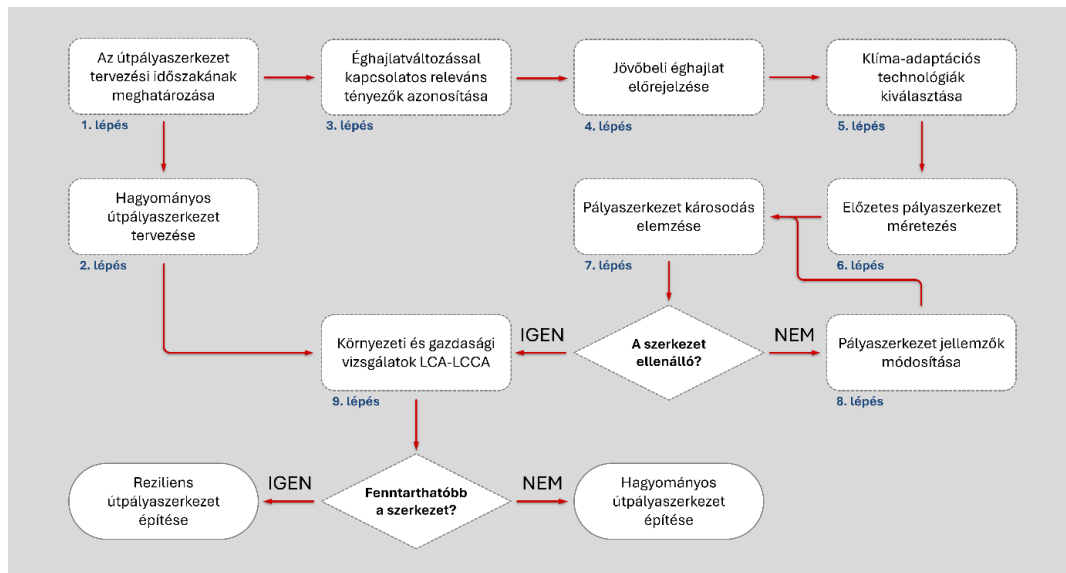
5. REZILIENS PÁLYASZERKEZET MÉRETEZÉS

Az eddigiek alapján megállapítható, hogy szükségszerű az M-E méretezési keretrendszer kiegészítése a reziliens tervezési megközelítéssel, amely már tekintettel van a jövőbeni éghajlati viszonyokra is. Ez azt jelenti, hogy az útpályaszerkezet tervezésénél a történeti adatok helyett prediktív éghajlati modellekből származó adatokat kell használni, vagyis az útpályaszerkezet-tervező szoftverek történeti éghajlati adatbázisait egyre inkább prediktív modellekkel kell felváltani. Továbbá a hajlékony útpályaszerkezetek M-E méretezési módszerét ki kell egészíteni az extrém eseményekkel kapcsolatos kockázatok kezelésének képességével, valamint már a méretezés kezdeti fázisban érvényesíteni kell a reziliencia szempontjait.

A 7. ábra bemutat egy kilenclépcsős módszertant, amely szervesen integrálja magában az M-E méretezési eljárást mellett az életciklus-értékelés (LCA) és az életciklus-költségelemzés (LCCA) feladatait is. A módszertan lépései a következők [10]:

1. Tervezési időszak meghatározása: Az útpályaszerkezet élettartamának meghatározása a vonatkozó jogszabályok és előírások alapján. A hagyományos szerkezetek tervezési élettartama általában 20–30 év, míg a „perpetual” burkolatoké 50–60 év.
2. Hagyományos útpályaszerkezet tervezése: Ennek célja egy referenciaérték meghatározása az összehasonlításhoz.
3. Éghajlati tényezők azonosítása: Az adott földrajzi térséghez kapcsolódó éghajlatváltozási jelenségek meghatározása, például hőmérséklet-emelkedés, hőhullámok, extrém téli hidegek, áradások vagy városi hősziget-hatás.
4. Jövőbeli éghajlat előrejelzése: Éghajlati modellezés a tervezési időszak végéig, beleértve az extrém időjárási eseményeket.
5. Klíma-adaptációs technológiák alkalmazása: A rugalmas ellenállóképességet a kívánt szintre növelő technológiák kiválasztása.
6. Előzetes pályaszerkezet méretezés: Az M-E méretezési módszerre támaszkodva a kellő ellenálló képességgel rendelkező útpályaszerkezet létrehozása.
7. Pályaszerkezet károsodás elemzés: Az útpályaszerkezet viselkedésének modellezése a teljes élettartam alatt, beleértve az aléptítményt is. A klimatikus hatások hatékony vizsgálatához sokszor végelemek- (FEA) vagy egyéb numerikus módszereket alkalmaznak.

8. Pályaszerkezet jellemzők módosítása: Amennyiben a vizsgálatok szerint az előzetes útpályaszerkezet nem képes ellenállni a klímaváltozással kapcsolatos hatásoknak, a szerkezeti rétegek vastagságát vagy anyagát szükséges módosítani.
9. Fenntarthatósági értékelések (LCA és LCCA) elvégzése: A teljes életciklusra kiterjedő környezeti és gazdasági vizsgálat alapján annak meghatározása, hogy az elvárt ellenálló képességre méretezett útpályaszerkezet fenntarthatóbb-e a hagyományos változatnál. Ha igen, a reziliens útpályaszerkezet építése javasolt, ellenkező esetben a hagyományos szerkezet előnyösebb.



7. ábra. Reziliens útpályaszerkezet méretezés folyamata [10].

A 7. ábrát vizsgálva láthatjuk, hogy a 7. lépés után döntenünk kell arról, hogy a méretezett útpályaszerkezet ellenálló képessége megfelel-e a klímaváltozással kapcsolatos kihívásoknak. Ennek egyik lehetséges módja, hogy az egyes pályaszerkezet alternatívák ellenálló képesség szintjét az extrém események hatására bekövetkező szerkezet-romlás valószínűségével (p) fejezzük ki. Ha $p = 0$, akkor az útpályaszerkezet rezilienciája magas (robustus), ha $p > 0$, akkor pedig még mindig a hagyományos viselkedés érvényesül. Ez utóbbi esetben szükséges a klíma-adaptációs technológiáknak megfelelően a szerkezeti rétegek vastagságát vagy azok anyagát módosítani [11].

Az aszfalt útpályaszerkezetek rezilienciájának vizsgálatában a végeselemes modellezés kiemelt szerepet tölt be, mivel lehetőséget ad a különböző mechanikai és klimatikus hatások — például forgalmi terhelés, hőmérséklet-ingadozás, csapadék vagy fagyás–olvadás ciklusok — pontos szimulációjára. E modellek révén vizsgálható, hogyan változik a pályaszerkezet viselkedése időben és térben, illetve hogyan hatnak rá a különböző éghajlati forgatókönyvek, például a hosszabb ideig tartó extrém hőhullámok vagy az intenzív csapadékesemények, áradások [12]. Szerencsére már hazai kutatási eredmények is rendelkezésre állnak ezen a téren, különösen a hajlékony útpályaszerkezetek hőmérsékletprofil alapú méretezése témakörben, ami jelentős előrelépést jelent a klímaadaptív tervezés irányába [13], [14], [15]. Ezek az eredmények megalapozzák a rezilienciát előtérbe helyező, hosszú távon fenntarthatóbb útpályaszerkezetek hazai fejlesztését és alkalmazását.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkben részletesen tárgyaltuk az útpályaszerkezetek rezilienciájának elméleti és gyakorlati vonatkozásait, különös tekintettel a klimatikus kihívásokra adott anyag- és szerkezettervezési válaszokra. Az alábbiakban a legfontosabb megállapításokat foglaljuk össze, kiemelve azokat a kockázatokat és alkalmazkodási lehetőségeket, amelyek meghatározzák a jövőbeli infrastruktúra-

ellenállóképesség irányait. Általános egyetértés van az útpályaszerkezetek éghajlati stresszhatásokkal szembeni sebezhetőségéről [7]:

- **Hőmérséklet-emelkedés:** Alkalmazkodási stratégiák nélkül az útpályaszerkezetek élettartama jelentősen csökken, ami hosszú távon költségnövekedéshez vezet. A kutatások elsősorban az aszfalt kötőanyagok hőmérséklet-függő tulajdonságaira és a betonburkolatok hő okozta alakváltozásaira összpontosítanak.
- **Elöntés és áradás:** A megnövekedett vízmennyiség károsíthatja az útpályaszerkezetet, mivel az elárasztás gyorsan telíti az alépítményt, gyengíti a szerkezeti elemeket és növeli a sérülékenységet az áradások idején és közvetlenül utána. A talajvízszint emelkedésének hatásai kevésbé kutatott területet jelentenek. Általánosságban elmondható, hogy a vastagabb szerkezetek ellenállóbbak az elöntéssel szemben.
A kutatások egyetértenek bizonyos megoldási lehetőségekben is:
- **Pályaszerkezet méretezés:** Az éghajlati előrejelzéseket be kell építeni a tervezési modellekbe a történeti adatok részleges vagy teljes helyettesítésével. Ez eltérő anyagok és szerkezetek alkalmazásához vezethet a jelenlegi műszaki előírásokhoz képest.
- **Ellenállóbb anyagok:** Meglévő anyagok, például magasabb PG (Performance Grade) fokozatú kötőanyagok és nedvességállóbb alaprétegek használhatók az ellenállóbb szerkezetek kialakítására.

Az irodalomban számos olyan alkalmazkodási javaslat jelenik meg, amelyek gyakorlati bevezetése még nem tekinthető általánosan elfogadottnak vagy kellően alátámasztottnak. Ilyenek például a pályaszintek megemlése, az alépítmények stabilizálása és elöntési érzékenységeinek részletes vizsgálata, a vastagabb és merevebb szerkezeti rétegrendek alkalmazása, a hatékonyabb vízelvezetési rendszerek kialakítása, valamint az elárasztott útszakaszok újbóli megnyitására vonatkozó protokollok kidolgozása. E megközelítések értékelésére és fejlesztésére kiváló alapot nyújt a mechanikus-empirikus útpályaszerkezet-méretezés, amely a fizikai-mechanikai modellezést és a tapasztalati összefüggéseket ötvözve jól adaptálható rezilienciára fókuszáló, kockázatalapú elemzésekhez. Ez a keretrendszer véleményünk szerint lehetővé teszi a veszélyek bekövetkezési valószínűségének és azok következményeinek számszerűsítését, ezáltal támogatva a preventív tervezést, az éghajlati alkalmazkodást és a hosszú távon fenntartható útfenntartási stratégiák kialakítását.

7. NYILATKOZAT

A cikk tartalma a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke és Út- és Vasútépítési Tanszéke, a Budapesti és Pest Vármegyei Mérnöki Kamara, valamint a Nemzetközi Betonszövetség Magyar Tagozata közös szervezésében megrendezett I. REZILIENS ÚTPÁLYASZERKEZETEK KONFERENCIA – Szélsőséges időjárási körülményeknek kitett útpályák tervezése, építése, fenntartása című szakmai eseményen elhangzott előadás alapján készült.

8. HIVATKOZÁSOK

- [1]: Harvey, John. 2023. „Keynote Presentation: Improving Pavement Sustainability through Integrated Design, Construction, Asset Management, LCA, LCCA, and S-LCA”. In The Second International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Constructed Infrastructure Facilities (MAIREINFRA2), 69. MDPI. <https://doi.org/10.3390/engproc2023036069>
- [2]: Bocchini, Paolo, Dan M. Frangopol, Thomas Ummenhofer, és Tim Zinke. 2014. „Resilience and Sustainability of Civil Infrastructure: Toward a Unified Approach”. Journal of Infrastructure Systems 20 (2): 04014004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000177](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000177)
- [3]: Holling, C S. 1973. „Resilience and Stability of Ecological Systems”. Annual Review of Ecology and Systematics 4 (1): 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [4]: Timmerman, P. 1981. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of models and possible climatic applications. Environmental monography / Institute for Environmental Studies, University of Toronto, no. 1. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.

- [5]: Pimm, Stuart L. 1984. „The Complexity and Stability of Ecosystems”. *Nature* 307 (5949): 321–26. <https://doi.org/10.1038/307321a0>
- [6]: Bruneau, Michel, Stephanie E. Chang, Ronald T. Eguchi, George C. Lee, Thomas D. O'Rourke, Andrei M. Reinhorn, Masanobu Shinozuka, Kathleen Tierney, William A. Wallace, és Detlof Von Winterfeldt. 2003. „A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities”. *Earthquake Spectra* 19 (4): 733–52. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- [7]: Muench, Steve, Tom Van Dam, Prashant Ram, és Kurt Smith. 2023. „Pavement Resilience: State of the Practice”. Final Report FHWA-HIF-23-006. United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration.
- [8]: Nickdoost, Navid, Mohammad Javad Shooshtari, Juyeong Choi, Dennis Smith, és Yassir AbdelRazig. 2024. „A Composite Index Framework for Quantitative Resilience Assessment of Road Infrastructure Systems”. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 131 (június):104180. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104180>
- [9]: Eichinger-Vill, Eva M., Robert Veit-Egerer, Theresa Reimoser, Alois Vorwagner, Christian Gasser, Alfred Weninger-Vycudil, és Johann Litzka. 2022. „REMAIN – Resilient Motorway Infrastructure: Ergebnisbericht”. Projektbericht VIF2020. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). https://projekte.ffg.at/anhang/63d0ee2370a1d_REMAIN_Ergebnisbericht.pdf
- [10]: Duque, Jose, Gilberto Martinez-Arguelles, Yelenka Nuñez, Rita Peñabaena-Niebles, és Rodrigo Polo-Mendoza. 2024. „Designing Climate Change (CC)-Resilient Asphalt Pavement Structures: A Comprehensive Literature Review on Adaptation Measures and Advanced Soil Constitutive Models”. *Results in Engineering* 24 (december):103648. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103648>
- [11]: Asres, Enyew, Tewodros Ghebrab, és Stephen Ekwaro-Osire. 2021. „Framework for Design of Sustainable Flexible Pavement”. *Infrastructures* 7 (1): 6. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7010006>
- [12]: Nivedya, M. K., Mingjiang Tao, Rajib B. Mallick, Jo Sias Daniel, és Jennifer M. Jacobs. 2020. „A Framework for the Assessment of Contribution of Base Layer Performance Towards Resilience of Flexible Pavement to Flooding”. *International Journal of Pavement Engineering* 21 (10): 1223–34. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1533637>
- [13]: Seoyoung, Cho, László Pethő, Csaba Tóth, és Éva Lakatos. 2020. „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése hőmérséklet profil alapján”. *Útügyi Lapok* 8 (14): 105–16. <https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.07>
- [14]: Tóth, Csaba, Éva Lakatos, László Pethő, és Seoyoung Cho. 2021. „Temperature Profile Modelling in Flexible Pavement Design”. *International Journal of Urban and Civil Engineering* 15 (2): 84–89.
- [15]: Cho, Seoyoung, és Éva Lakatos. 2022. „Finite Element and Fatigue Analysis of Flexible Pavements Based on Temperature Profile Modeling”. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty* 21 (2): 103–16. <https://doi.org/10.7409/rabdim.022.006>