

Döntéstámogató modell nagy nehézforgalmú utak aszfalt kopóréteg-típusának kiválasztásához

Szerző(k) **Dr. habil. Gáspár László, Bencze Zsolt és Daniel Jato-Espino**

Kivonat

Előzmények Az Európai Unió 7. Kutatási és Technológiafejlesztési Keretprogramjához kapcsolódva, 2013-ban egy nemzetközi konzorcium a 42 hónapos DURABROADS (Cost-effective DURABLE ROADS by green optimized construction and maintenance; Költséghatékony, tartós utak, „zöld” optimált építés és fenntartás révén) projekt részbeni finanszírozását nyerte el [1]. A projektet a spanyol Universidad de Cantabria (UNICAN) vezeti; míg a partnerek közé tartozik [...]

1. Előzmények

Az Európai Unió 7. Kutatási és Technológiafejlesztési Keretprogramjához kapcsolódva, 2013-ban egy nemzetközi konzorcium a 42 hónapos DURABROADS (Cost-effective DURABLE ROADS by green optimized construction and maintenance; Költséghatékony, tartós utak, „zöld” optimált építés és fenntartás révén) projekt részbeni finanszírozását nyerte el [1]. A projektet a spanyol Universidad de Cantabria (UNICAN) vezeti; míg a partnerek közé tartozik – a spanyol ACCIONA, a német FRAUENHOFER, a spanyol TECNALIA, a norvég Norwegian Graphite, az angol BSRIA, a lett Inzeierbuve Sia (IB) és az European Road Federation mellett – a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. is. A magyar kutató intézet a 2. munkabizottságot is vezeti.

A DURABROADS projekt fő célkitűzése költséghatékony, környezetbarát és komplex módon optimált utak tervezése, fejlesztése és az eredmények bemutatása. Ezt a célt olyan innovatív tervezéssel kívánják elérni, amely a különlegesen nagy és nehéz forgalmi terhelés, valamint az éghajlatváltozásból származó szélsőséges klimatikus hatások együttes igénybevételének ellenálló útpályaszerkezeteket eredményez. Emellett a nanotechnológia alkalmazásával „zöldebb” útépitési anyagok előállítására is törekszenek. További célként jelölték meg az Európában általánosan alkalmazott útépitési, -fenntartási és -felújítási technológiák optimalizálását. Emellett az elterjedt aszfalt kopóréteg-típusok és burkolat-felújítási technológiák korábban említett szélsőségesen nagy terhelésekkel szembeni ellenállásának korlátait is fel kívánták tárni, valamint az útkezelők számára ebben a tárgykörben ajánlásokat szándékoztak megfogalmazni. A célkitűzések közé tartozott a legmegfelelőbb karbon nano-anyagoknak a kiválasztása is, amelyeknek felhasználásával a bitumenes kötőanyagok teljesítményét érdemlegesen javítani lehet. Az ily módon javított kötőanyagoknak a mérsékelt meleg aszfaltkeverékekben történő alkalmazási lehetőségét is részletes vizsgálatnak vetik alá. Kitérnek ezen kívül a bontott aszfaltnak és különböző ipari melléktermékeknek ezekben az „optimalizált” keverékekben való, minél nagyobb mértékű felhasználási lehetőségeire is. A különböző szélsőséges időjárási és forgalmi terhelésnek kitett útpályaszerkezetek optimált, hosszú élettartamot ígérő megtervezéséhez végeselemes módszert alkalmaznak. A projekt eredményeit demonstrációs projektek és költség/haszon-elemzések egészítik ki. Javaslatot készítenek azokra a kritériumokra, amelyeknek alapján a „DURABROADS-technológiák” a Zöld Közbeszerzésekben szerepeltethetők lehetnek, valamint a tárgyban tervezett szabványosítást is elő kívánják készíteni.

A DURABROADS projekt munkabizottságai, irányító partnereikkel a következők:

- 1. munkabizottság Projekt menedzsment (koordinációs stratégia kialakítása; Minőségbiztosítási Terv készítése; a projekt koordinálása; az EU által igényelt időszaki jelentések összeállítása), vezető: UNICAN,
- 2. munkabizottság Útépitési anyagok és eljárások vizsgálata és optimalizálása (részleteit lásd később), vezető: KTI,
- 3. munkabizottság Kötőanyagok modifikálására megfelelően bizonyuló karbon nanoanyagok kialakítása és vizsgálata (különböző karbon nanoanyagok méreteinek és minőségének vizsgálata, a kötőanyagok modifikálásához legalkalmasabb változat kiválasztása érdekében; az elterjedt modifikáló polimerek és a

karbon nanoanyagok között kialakuló kötés vizsgálata; a bitumenes kötőanyagok előállítására szóba jövő vegyületek és keverési eljárások felmérése; a választott, tulajdonságaiban módosított bitumen üzemi méretekben való előállításának előkészítése), vezető: TECNALIA,

- 4. munkabizottság Ipari mellékterméket és visszanyert aszfaltot tartalmazó, grafittal modifikált kötőanyagú, mérsékelt meleg aszfaltok technológiájának kidolgozása (az adalékok kiválasztása, valamint a szóba jövő ipari melléktermékek és visszanyert aszfaltok vizsgálata; grafittal modifikált kötőanyagú, ipari mellékterméket és/vagy visszanyert aszfaltot tartalmazó, mérsékelt meleg aszfaltkeverékek receptúrájának a kidolgozása; grafittal modifikált kötőanyagot tartalmazó BBTM – aszfaltbeton nagyon vékony rétegekhez – receptúrájának megtervezése), vezető: ACCIONA,
- 5. munkabizottság. Az éghajlatváltozásból származó terheléseknek és a szélsőségesen nagy forgalmi igénybevételeknek az eddigieknél ellenállóbb, optimált útpályaszerkezetek kifejlesztése (új pályaszerkezetek és -felújítások tervezésére szolgáló, numerikus, szimulációs szoftver alkalmazásához szükséges alapadatok előállítása; az innovatív, hosszú élettartamú és a szinergikus, szélsőségesen nagy időjárási és forgalmi igénybevételeknek ellenálló pályaszerkezetek optimált tervezése; a DURABROADS projekt során kifejlesztett, új termékek életciklus jellemzőinek a hagyományos anyagokéval történő összehasonlítása), vezető: UNICAN,
- 6. munkabizottság Demonstráció és megfelelés-igazolás (a DURABROADS-pályaszerkezet kísérleti szakaszon történő kipróbálása, kontrollszakasz mellé építésével, és teljesítményük legalább 2 éven keresztül történő figyelemmel kísérése), vezető: ACCIONA,
- 7. munkabizottság Útmutató készítése és szabvány-előkészítés (a kialakított aszfalttechnológiára vonatkozó útmutató készítése; kritériumok megállapítása a DURABROADS-projekt környezetvédelmi koncepciójának a Zöld Közbeszerzésekben való szerepeltetéséhez; a DURABROADS-termékre vonatkozó szabvány előkészítéséhez szükséges tevékenységek végrehajtása), vezető: ERF (European Road Federation, Európai Útügyi Szövetség),
- 8. munkabizottság Kapcsolattartás, valamint a projekt eredményeinek közkinccsé tétele és hasznosítása (az Eredmények Terjesztési Tervének összeállítása; kommunikációs anyagok készítése, work-shop-ok és a Zárókonferencia megszervezése; kapcsolat tartása Európán kívüli – elsősorban amerikai – intézményekkel annak érdekében, hogy az esetleges párhuzamos kutatásokat el lehessen kerülni; a DURABROADS Eredményhasznosítási Stratégiai Terv készítése), vezető: ERF.

2. A projekt 2. munkabizottsága

A DURABROADS-projekt 2. számú, „Útépítési anyagok és eljárások vizsgálata és optimalása” tárgyú munkabizottságában, a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. vezetésével (képviselői: dr. Gáspár László kutató professzor és Bencze Zsolt tudományos munkatárs), a spanyol UNICAN és ACCIONA, a lett IB és az ERF szakemberei vettek részt.

A munkabizottság fő célkitűzését az Európában elterjedten alkalmazott aszfalt kopórétegeknek és burkolatfelújítási módszereknek a szélsőséges környezeti és forgalmi terhelés kombinációjával szemben tanúsított ellenállás szempontjából végrehajtott optimalása képezte. Ezzel a közútkezelőket hozzá akarják segíteni ahhoz, hogy vagyongazdálkodási tevékenységeik a korábbiaknál költség-hatékonyabbak, biztonságosabbak és a környezetet fokozottan kímélőek legyenek.

A munkabizottság 2.1 számú munkacsoportja azokat az európai úthálózatot érő közép- és hosszú távú hatásokat számszerűsítette, amelyek az éghajlatváltozás szélsőséges időjárási eseményeinek és a közúti korridorok rendkívül nagy nehéz járműforgalmának együttes terheléséből származnak.

A munkabizottság 2.2 számú munkacsoportja – az élettartam-mérnöki tudomány [2] alapelveinek messzemenő hasznosítása mellett – tartóssági, forgalombiztonsági, költséghatékonysági, környezetvédelmi és társadalmi-gazdasági optimalási kritériumok kialakítását tekintette feladatának.

A munkabizottság 2.3 számú munkacsoportja az európai aszfalt kopóréteg-típusok és burkolat-felújítási eljárásokat elemezte és azokat komplex módon optimalta.

A 2. munkabizottság a nyert eredményeket három részjelentés (Deliverables) [3-5] formájában tette közzé. A következőkben ezek közül vázlatosan az első két részjelentés (ezek részletei magyarul a [6]-ban található), részletesebben pedig a harmadik részjelentés [5] egyes elemeit ismertetjük.

3. A projekt D 2.1 és D2.2 részjelentése

A D2.1 „Egyes közúti eljárások korlátainak feltárása” című részjelentés [3] a lett IB koordinálásában készült el. A 99 oldalas anyag az Európában elterjedten alkalmazott aszfalt kopórétegekkel, az útépitési anyagok tartósságát csökkentő hatásokkal, az aszfaltkeverékek környezetvédelmi szempontjaival, burkolat-felújítási technológiákkal, a jellegzetes európai pályaszerkezet-tervezési módszerekkel, illetve az egyes közúti eljárásokkal kapcsolatos kihívásokkal és korlátokkal foglalkozott.

A D2.2 „Az éghajlatváltozás közép- és hosszú távú következményei által az európai úthálózaton létesített, nagy nehéz forgalmú folyosókra gyakorolt hatás számszerűsítése” című részjelentés [4] elkészítését a KTI koordinálta. A 61 oldalas anyag az Európában elterjedten alkalmazott aszfalt kopórétegek kritikus tönkremeneteli formáival, az éghajlatváltozás utakra gyakorolt hatásával, a közúti korridorok (folyosók) burkolatromlásával, a szélsőséges éghajlati és mechanikai terhelés együttes hatásával, valamint az európai főutakat ért hatások számszerűsítésére szolgáló módszerre tett javaslattal foglalkozott.

4. A DURABROADS-projekt D2.3 részjelentéséről általában

A DURABROADS-projekt D2.3 „Javaslat az útkezelésben hasznosítható, gazdaságosabb, tartósabb és fenntartható, építési, fenntartási és felújítási technológiákra” tárgyú részjelentést [5] a KTI szakemberei koordinálták. A 114 oldalas anyag célját a következők képezték: Európa négy fő körzetében (Észak-, Nyugat-, Dél- és Közép-Európában) a nagy nehéz forgalmú utakra (a TEN-T úthálózatra) vonatkozóan az aszfalt kopóréteg-típusok, illetve a fenntartási-felújítási technológiák optimalálásához többtényezős – többkritériumos – módszertan kialakítása, valamint annak erre a célra történő alkalmazása. A D2.2 részjelentésben [4] a négy körzetre megállapított kopóréteg-, illetve felújítás-típusok komplex vizsgálata az élettartam-mérnöki tudomány alapelvein [7] nyugszik. A D2.3 részjelentés fő fejezetei: az összehasonlítható kopóréteg- és burkolatfelújítás-típusok; a döntéselőkészítő módszertan elemei, a kopórétegek értékelése négy különböző szempontból, a felújítástípusok négy különböző szempontból történő értékelése, érzékenységvizsgálat, az eredmények diskussziója, javaslat „optimális” aszfalt kopóréteg- és burkolatfelújítás-típusra.

5. Összehasonlítható kopóréteg- és felújítástípusok

5.1. Jellegzetes kopóréteg-típusok

A DURABROADS-projekt WP2 munkabizottsága által a tárgyban összeállított kérdőívet 17 országból (BE két önálló régióval, CRO, CZ, EST, FR, GE, HU, IT, LT, LV, NO, PT, SLO, SP, SRB, UK) 81 szakember töltötte ki. Válaszaik szerint a nagy nehéz forgalmú utakon (gyakorlatilag a TEN-T úthálózaton) Európa körzetei szerint különböző aszfalt kopóréteg-típusok terjedtek el (1. táblázat).

Európai körzet	Jellegzetes aszfalt kopóréteg-típusok
Észak-Európa	AC-SMA
Nyugat-Európa	AC-SMA-PA-HRA
Dél-Európa	AC-SMA-BBTM
Közép-Európa	AC-SMA

1. táblázat

Jellegzetes aszfalt kopóréteg-típusok az egyes európai körzetekben

ahol:

AC - aszfaltbeton

SMA - zúzalékvasas masztixaszfalt

PA - porózus aszfalt

HRA - hot rolled asphalt (az ÉHÁ-hoz hasonló összetételű keverék)

A kopórétegekkel szemben támasztott követelmények közül – a fáradási ellenállással összefüggő, minden pályaszerkezeti rétegre vonatkozó elváráson túlmenően – a következők emelhetők ki:

- csúszásellenállás (a forgalombiztonságot, a gumiabroncsok kopását és az üzemanyag-fogyasztást érdemlegesen befolyásolja),
- hossz- és keresztirányú felületi egyenletesség (elsősorban az utazáskényelemre van hatása),
- gördülőzaj (a járművön belül és azon kívül is mérik),
- az útburkolat felületének fényvisszaverő képessége (a járművek éjszaka és/vagy nedves pályán való vezetésekor válik fontossá),
- az útpálya – burkolatfelület – vízelvezetése (a vízen csúszás és a vízköd-képződés veszélyének csökkentésére szolgál).

Az aszfaltkeverék-tervezés egyik fő feladata, hogy az aszfaltréteg a felsorolt követelményeknek minél nagyobb mértékben megfeleljen. A forgalomnak való átadásakor, a kopóréteg – ideális esetben – kitűnő felületi és szerkezeti jellemzői – a jármű és a környezet együttes terhelésének hatására – fokozatosan romlani kezdenek addig, amíg az állapotparaméterek közül az egyik, az ún. kritikus paraméter a szóban forgó úttípustól függően megállapított „beavatkozási szintet” el nem éri. Ezt követően az út további üzemeltetése a kezelő számára többé már nem gazdaságos, és/vagy az úthasználóknak balesetveszélyes helyzetet teremt [8]. A pályaszerkezet-tervezőknek az a fő ambíciója, hogy ennek az említett burkolatromlásnak az időpontját minél inkább elodázzák, azaz a lehető leghosszabb ciklusidőt ériék el. Közismert, hogy az útburkolatok romlásának két fő formája ismeretes:

- bomlás (hámlás, zúzalékkipergés, repedés képződése, kátyúk kialakulása stb.),
- alakváltozás (a burkolat hossz- és keresztirányú deformációja, keréknyomvályú képződése stb.).

Európa vizsgált körzeteiben azonban az útburkolatok jellegzetes tönkremeneteli formája nem egységes:

- Észak-Európa: bomlás,
- Nyugat-Európa: bomlás,
- Dél-Európa: alakváltozás,
- Közép-Európa: bomlás és alakváltozás.

Ez persze nem jelenti az, hogy Európának ezekben a régióiban az itt nem említett romlástípus egyetlen nagy nehéz forgalmú úton sem válik soha mértékadóvá.

5.2. Burkolat-felújítási technológia típusok

Bár az Európában elterjedten alkalmazott burkolat-felújítási módszerek teljesítményét az egyes körzetekben különböző forgalmi-környezeti terhelés érzékelhetően befolyásolja, DURABROADS-partnerek abban állapodtak meg, hogy a kontinensen egységesen a következő burkolat-felújítási technológiákat „versenyeztetik”:

- hideg helyszíni recycling + új, 50 mm-es AC kopóréteg,
- kétrétegű permetezéses felületi bevonat,
- teljes vastagságú recycling + új, 50 mm-es AC kopóréteg,
- meleg helyszíni recycling + 38 mm AC kopóréteg,
- burkolatmarás + új, 50 mm-es AC kopóréteg,
- kevert felületi bevonat (microsurfacing),
- új, 50 mm-es AC kopóréteg,
- új, vékony AC kopóréteg.

Ezeken kívül még különböző, hideg burkolatfelújító technikát alkalmaznak, de nem a nagy nehéz forgalmú TEN-T úthálózaton. Hasonlóképpen a „pontoszerű”, rutin fenntartási eljárásokat is kizárták az optimálásból.

Az egyes burkolat-felújítási technológiák közötti választáskor, az útkezelők általában elsősorban a módszerrel elérhető teljesítményjavulást próbálják figyelembe venni.

6. A döntéstámogató, optimalizáló modellről általában

Az európai nagy nehéz forgalmú utak aszfalt kopóréteg- és burkolatfelújítás-típusainak komplex optimalálásához olyan döntéstámogató modellt alkalmaztak, amely az AHP (Analytical Hierarchy Process, Analitikus Hierarchikus Eljárás) és a TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, Sorrend Preferencia Ideális Megoldáshoz való Hasonlóság alapján történő Meghatározása) modellek kombinációján alapszik. Egyrészt szakirodalmi információkat, másrészt pedig azokat a válaszokat hasznosították, amelyeket 81 európai útügyi szakember az ebben a témában összeállított kérdőívre adott. Ennek megfelelően a következő lépéseket hajtották végre:

- olyan kérdőívek összeállítása és Európa-szerte az útügyi szakemberek számára történő eljuttatása, amelyek a szóban forgó döntéshozatali problémát egyszerűen és lényegre törő módon tárgyalják,
- a döntéshozatali folyamatot befolyásoló tényezőknek – követelményekből, kritériumokból és mérőszámokból álló – hierarchikus fa formájában való strukturálása,
- a döntéshozatali problémát meghatározó kritériumok (feltételek) viszonylagos jelentőségének –AHP-eljárással történő – megállapítása,
- az egyes alternatív változatoknak minden kritérium szerinti értékelése, a TOPSIS-technika alkalmazásával,
- érzékenységi vizsgálat végrehajtása annak felmérésére, hogy az egyes inputok értékének változtatása hogyan befolyásolja a döntéshozatali modell outputját.

7. Az optimumkritériumok definiálása

7.1. Az élettartam-mérnöki tudomány (lifetime engineering) alapelvei

Az élettartam-mérnöki tudomány (angol elnevezéssel: lifetime engineering) olyan innovatív gondolat, amelynek célja a hosszú élettartamú infrastruktúra elemek és azok tervezésének, kezelésének és fenntartás-tervezésének viszonylag rövid távú jellege között fennálló feszültség feloldása [7]. Fő elemei a következők:

- egész élettartamra vonatkozó beruházás-tervezés és döntéshozatal,
- egész élettartamra vonatkozó, komplex tervezés,
- egész élettartamra vonatkozó, komplex útkezelés és fenntartás-tervezés,
- korszerűsítés, újrahasználat, újrahasznosítás és deponálás,
- a környezeti hatások egész élettartamra vonatkozó, komplex felmérése és minimálása.

Az élettartam-mérnöki tudomány komplex módszertana műszaki, teljesítményi paramétereket állapít meg, és alkalmaz annak biztosítására, hogy a létesítmény az egész élettartama során a gazdasági, a környezeti, a kulturális, a társadalmi és a humán (emberekkel összefüggő, társadalmi) követelményeket teljesítse. Bár az élettartam-mérnöki tudományt az 1990-es évek első felében épületekre, ipari létesítményekre és hidakra fejlesztették ki, alapelvei az utakra is adaptálhatóak [9].

Bár az élettartam-mérnöki tudományt az útügy területén koordináltan még nem alkalmazzák, de a különböző útügyi gazdálkodási rendszerekben, illetve az azokhoz társuló gyakorlatban – Magyarországon is – a tudomány egyes elemei már polgárjogot nyertek; néhány ilyen elem a következő [10]:

- különböző, nagyobb közúti projektek előkészítési stádiumában a várható, egész élettartam alatti költségeket egyre gyakrabban becsülik előre,
- a különböző pályaszerkezet-változatok jövőben várható teljesítményének az előrebecslésére, az útburkolat-gazdálkodási rendszerhez kapcsolódóan sok területen hasznosítható hálózatviselkedési modellek készülnek,
- a különböző burkolatállapot-szintekhez tartozó úthasználói (közlekedésüzemi, idővesztés és baleseti) költségekre vonatkozó becsléseket az élettartam-költségek hálózati szintű számításakor használják fel,
- komoly erőfeszítéseket tettek olyan közúti externális hatások internalizálása érdekében, mint a légszennyezés, a közlekedési zaj- és rezgésterhelés,
- etalonszakaszok hosszú távú – több évtizedes – állapotmegfigyelése során, az útburkolatokon végzett állapotjavító beavatkozások tényleges állapotjavító hatását, valamint az azokat követő leromlási trendek jellemzőit is felmérték [11],
- az útépítő vállalatok által végzett munkák tényleges minőségének (teljesítményének) felmérésére tényadatokon alapuló eljárást dolgoztak ki, amit a szóban forgó cégek jövőbeni kivitelezői tenderekre beadott pályázatainak értékelésekor fiqyelembe lehet venni [12],

- kiterjedt kutatási munkák folytak a különböző hajlékony pályaszerkezet változatok egyes rétegeinek újrafelhasználási technológiáinak továbbfejlesztése tárgyában, elsősorban a bontott aszfaltnak – az új keverék előírt minőségét nem veszélyeztető – legnagyobb adagolási arányát kutatva,
- sok európai ország az útügyi szektornak az éghajlatváltozás kedvezőtlen időjárásai szélsőségeire való felkészítése céljából hatékony, adaptációs intézkedéseket dolgozott ki, közülük is kiemelten olyanokat, amelyeknek végrehajtásával a pályaszerkezeteknek a várható kihívásokkal szembeni ellenállását érdemlegesen növelni lehet [13].

Mindezek alapján az élettartam-mérnöki tudomány alapelvei közül a következőket lehetett az egymással versenyző aszfalt kopórétegek, illetve -felújítási technológiák komplex értékelésekor és sorba állításakor (optimalásakor) hasznosítani:

- a pályaszerkezetek „modulonkénti” vizsgálata (a szerkezet egyes elemeinek különböző anyagait, terhelését, illetve várható ciklusidejét messzemenően figyelembe véve),
- az egyes változatok részletes elemzésekor a teljes élettartam során várható események tekintetbevétele, beleértve az élettartam végi stratégiákat is, mint amilyen a bontott anyag deponálása, újrahasznosítása vagy újra történő használata,
- olyan komplex vizsgálat végzése, ami – lehetőség szerint – a funkcionális, gazdasági (pénzügyi), környezeti (ökológiai) és humán (emberekkel összefüggő, társadalmi) szempontokra kitér.

7.2. Optimumkritériumok

Az aszfalt kopóréteg-típusok élettartam-mérnöki tudomány alapelveit hasznosító optimalásakor az egyes változatokat – azok teljes élettartamára kivetítve – a következő négy szempontból elemezték.

a.) Funkcionális teljesítmény

Az értékeléshez a következő lépésekre van szükség: a szóban forgó kopóréteg-típustól elvárt funkciók összegyűjtése; a várható burkolatromlási formák megállapítása; a mértékadó (leggyorsabban, a többieket megelőzve, beavatkozási határát elérő) állapotparaméter kiválasztása; választott burkolatállapot-paraméterek viselkedési modelljének kimunkálása (a forgalmi és a környezeti igénybevételek együttes hatását véve figyelembe); az egységes vizsgálati időszak kijelölése (általában a kopóréteg jellemző ciklusidejéhez hasonló időtartamot, például, 15 évet választanak). Összehasonlítási célra célszerűen szóba jövő paraméter lehet – a kopóréteg 1 cm-es vastagságú részére vonatkoztatva – az egységterheléseknek az útburkolat tönkremenetelét kiváltó ismétlési száma, ($\dot{A}NET_{krit}/cm$). Ennek meghatározásához teljesítményi számítógépes modellekből, laboratóriumi vizsgálatokból, gyorsított terhelési vizsgálatokból (ALT) és/vagy útszakaszok hosszú távú állapotának megfigyeléséből származó információk egyaránt hasznosíthatók. Az egyes kopóréteg-variánsokra vonatkozó funkcionális teljesítményi paraméterek meghatározhatók, és egymással szembeállíthatók.

b.) Gazdasági (pénzügyi) paraméterek

Ennek során a következő lépések végrehajtása javasolható: a vizsgálathoz burkolatfelületi egység (pl. 1 m² vagy 1.000 m²) és pénzegység választása; a kopóréteg építési egységárának kalkulálása; a fenntartási-felújítási naptár (az évenkénti beavatkozási igény, technológiájával, mennyiségével és árával) meghatározása; az előrebecsült évenkénti úthasználói (közlekedésüzemi, idővesztés- és baleseti) költségek; a jelenértékek kalkulációjánál alkalmazandó diszkonttényező kiválasztása; az élettartam végi stratégia (újra történő használat, újrahasznosítás, deponálás) kijelölése; az egyes kopóréteg-típusok élettartam-költségeinek megállapítása, az évenkénti, jelenre diszkontált költségek összegezésével. Ennél az Európa egészére kiterjesztendő gazdasági vizsgálatnál az egyes országokban meglehetősen különböző építési, fenntartási, üzemeltetési, felújítási és úthasználói egységárak komoly kihívást jelentenek. Közelítő megoldásként ezek (régiókénti) átlagértékeivel számoltak. Diszkonttényezőként egységesen a 3%-os értéket választottak.

c.) Környezeti szempontok

Ezeknek a kopóréteg-változatokénti figyelembevétele a következő feladatok megoldását igényli: minden vizsgált kopóréteg-típushoz, egész élettartamára vonatkozólag (azaz keverését, szállítását, beépítését, üzemeltetését, fenntartását, felújítását és élettartam végi stratégiáját figyelembe véve), az energiaigény, a légszennyezés, a vízszennyezés, a talajszennyezés, a zaj- és a rezgésterhelés, a rádióaktivitás, az újrahasználatossági mérték, az újra való használat mértéke, a fajok sokszínűségével – a biodiverzitással –

kapcsolatos, esetleges negatív hatások felmérése; az egyes hatásoknak, lehetőség szerint, pénzértékben való kifejezése, de, legalább is a számszerűsítése; mindezek integrálásával a kopóréteg-típusonkénti, összesített környezeti hatás meghatározása. Az ún. környezeti osztályzat, némileg egyszerűsített formában, az élettartam alatti, MJ-ban kifejezett, fajlagos energia-felhasználásból és az újrahasznosíthatóság mértékéből számítható, rendre 2,0 és 0,5 súlyszámok alkalmazásával.

d.) A humán (társadalmi) szempontok

Ennek keretében minden egyes vizsgált aszfalt kopóréteg-típus esetében egyrészt a közlekedésbiztonságot (például, a baleseti költségekkel jellemezve), az utazáskényelmet (például, a pálya IRI-értékével jellemezve) és az esetleges egészségügyi kockázatokat (például, azok rákkeltő hatását vagy rádióaktivitását felmérve) célszerű figyelembe venni. Az egyszerűsített elemzés céljára, a „humán (társadalmi) osztályzat” megállapítására a közlekedésbiztonság felmérését választották, amit ugyanazon forgalmi terhelésre, az egyes kopóréteg-változatok egységnyi hosszára számítva, a teljes élettartamuk alatt felmerülő baleseti költségekkel jellemeztek.

7.3. Kérdőívek összeállítása

A többkritériumos elemzés első és talán leglényegesebb lépése olyan kérdőívek készítése, amelyekre adott válaszoknak a hasznosításával a tárgykör szakértőinek véleményét megbízhatóan meg lehet ismerni. Akkor igazán hasznosítható egy kérdőív, ha egyrészt megfelelően jellemzi a döntéshozatali problémát, másrészt pedig a szakemberek ez irányú tudását a vizsgálathoz „be tudja csatornázni”. Emellett rövidnek, érthetőnek és könnyen kitölthetőnek kell lennie. Mindezek alapján kétféle kérdőív született, amelyekre adott válaszok az egyes kritériumok súlyozásához, illetve az alternatívák értékeléséhez voltak hivatva információkat szolgáltatni.

Olyan típusú kérdésekre kellett válaszolniuk, mint „Mennyire tartja fontosnak a j_1 kritériumot, a j_2 kritériumhoz képest?” vagy „Milyenek tartja az i-edik alternatíva viselkedését, a j-edikhez képest?” a 2. táblázaton feltüntetett lehetőségek figyelembevételével.

A kérdőívet 52 európai útügyi intézmény (főhatóság, nemzetközi intézmény, egyetem, kutató intézet, tervező szervezet, beruházó vállalat, kivitelező cég, tanácsadó szerv, stb.) 81 elismert útügyi szakembere töltötte ki. TRA2016 conference proceedings and TRPRO Elsevier journal

Kritériumok súlyozása	Alternatívák értékelése
Sokkal kevésbé fontos	Rendkívül rossz
Jelentős mértékben kevésbé fontos	Nagyon rossz
Kevésbé fontos	Rossz
Kissé kevésbé fontos	Elég rossz
Egyformán fontos	Átlagos
Kissé fontosabb	Elég jó
Fontosabb	Jó
Jelentős mértékben fontosabb	Nagyon jó
Sokkal fontosabb	Rendkívül jó

2. táblázat

Szakértői vélemények verbális kifejezése

7.4. A kritériumok és az alternatívák halmazának megállapítása

Az előbbiekben szó esett már arról, hogy az élettartam-mérnöki tudomány alapelveinek megfelelően az egyes variánsok komplex vizsgálata négyféle (funkcionális-műszaki, gazdasági, környezeti és humán-társadalmi) követelményre terjedt ki. Tekintettel arra, hogy ezek a kritériumok esetenként egymásnak ellentmondóak, döntéstámogatási célú elemzésükhöz a holisztikus megközelítés tekinthető a legmegfelelőbbnek. Valamely problémának hierarchikus módon, részproblémákká történő szervezésével, lehetőség nyílik annak az egyes követelmények szerinti, külön-külön történő értékelésére; ezáltal a szóban forgó változat adott szempontból

várható teljesítményéről értékes információkhoz lehet jutni. Mindegyik követelmény egy vagy több kritériumot takar; ez utóbbiak pedig mérőszámok sorozatával jellemezhetők. A megkérdezett szakértők a mérőszámokról nyilatkoztak, azokat, a 2. táblázatban bemutatott lehetőségek közül választva, összehasonlították egymással. Ezekből az eredményekből lehetett a kritériumok és a követelmények jellemző értékeit meghatározni.

A 3. táblázat a kopórétegekre, míg a 4. táblázat a burkolatfelújítási technológiákra készített, hasonló felépítésű, hierarchikus struktúrát mutatja be. Logikus, hogy a két táblázaton feltüntetettek meglehetősen hasonlóak, mivel az újonnan épített pályaszerkezet egyes rétegeivel szemben támasztott követelmények és a további gazdaságos üzemeltetésre már nem alkalmas szintre leromlott állapotú útburkolatok felújítási technológiáival szembeni elvárások között egyértelmű az összefüggés. Egyetlen érdemleges különbségként az időjárás hatásokkal szembeni érzékenység, mint a felújítások vizsgálatakor szóba jövő mérőszám említhető. Ez a tényező az új aszfaltrétegek típusának kiválasztásakor nem tekinthető lényegesnek. Eltérés tapasztalható még a társadalmi – az embereket közvetlenül érintő – követelmények tekintetében. Amíg az újonnan elterített aszfalt kopórétegektől, kényelmi és biztonsági igények teljesülte érdekében, kedvező felületi tulajdonságokat várnak el, addig azzal kell számolni, hogy az útburkolatok felújítása mind az utakat használók, mind pedig az azokon tevékenykedő munkások számára különféle veszélyforrásokat rejtnek magukban.

Követelmények, R	Kritériumok, C	Mérőszámok, I
Gazdasági, R ₁	Költségek, C _{1.1}	Kezdeti beruházás, I _{1.1.1}
		Élettartam-költség, I _{1.1.2}
Környezeti, R ₂	Erőforráshatékonyság, C _{2.1}	Adalékanyagigény, I _{2.1.1}
		Bitumenigény, I _{2.1.2}
	Fogyasztások, C _{2.2}	Energiafogyasztás, I _{2.2.1}
	Károsanyag kibocsátás, C _{2.3}	CO ₂ -kibocsátás, I _{2.3.1}
Társadalmi, R ₃	Kényelem, C _{3.1}	Utazáskényelem, I _{3.1.1}
		Zaj, I _{3.1.2}
	Biztonság, C _{3.2}	Csúszásellenállás, I _{3.2.1}
		Vízköd, vízencsúszás I _{3.2.2}
Műszaki (funkcionális)	Mechanikai ellenállás, C _{4.1}	Bomlási ellenállás, I _{4.1.1}
		Deformációs ellenállás, I _{4.1.2}

3. táblázat

Az aszfalt kopóréteg-típusok választásához döntéshozatali fa (hierarchikus struktúra)

Követelmények, R	Kritériumok, C	Mérőszámok, I
Gazdasági, R ₁	Költségek, C _{1.1}	Kezdeti beruházás, I _{1.1.1}
		Élettartam-költség, I _{1.1.2}
	Rugalmasság, C _{1.2}	Időjárás-érzékenység, I _{1.2.1}
Környezeti, R ₂	Erőforráshatékonyság, C _{2.1}	Adalékanyagigény, I _{2.1.1}
		Bitumenigény, I _{2.1.2}
	Fogyasztások, C _{2.2}	Energiafogyasztás, I _{2.2.1}

	Károsanyag kibocsátás, C _{2,3}	CO ₂ -kibocsátás, I _{2,3,1}
Társadalmi, R ₃	Kényelem, C _{3,1}	Idővesztés, torlódások, I _{3,1,1}
	Biztonság, C _{3,2}	Útépítő munkások kockázata, I _{3,2,1}
Műszaki (funkcionális)	Mechanikai ellenállás, C _{4,1}	Bomlási ellenállás, I _{4,1,1}
		Deformációs ellenállás, I _{4,1,2}

4. táblázat

Az útfelújítási technológiák választásához döntéshozatali fa (hierarchikus struktúra)

7.5. Az egyes kritériumok súlyozása

Az elemzésnek ebben a fázisában azoknak a válaszoknak a feldolgozására került sor, amelyeket a kérdőíves felmérésben részt vett európai útügyi szakemberek az egyes kritériumok egymáshoz képest definiált fontosságáról adtak. Először azt kellett ellenőrizni, hogy a visszerkezett kérdőívekben levő válaszok teljeskörűek-e, mivel csak azokat vetették vizsgálat alá, amelyekből információk nem hiányoztak. A következő feladatként – az AHP (Analitikus Hierarchikus Eljárás) alkalmazásával – a válaszadók páronként végzett összehasonlításainak konzisztenciáját (ellentmondás-mentességét) ellenőrizték.

7.5.1. Az Analitikus Hierarchikus Eljárás (AHP)

Az Analitikus Hierarchikus Eljárás eredeti formáját [14] Saaty készítette el, és ez a döntéshozatallal kapcsolatos kritériumok súlyainak megállapításához világszerte az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer. Saaty a páronkénti összehasonlításhoz az 5. táblázaton bemutatott skálát javasolta.

Verbális kifejezések (a j ₁ -nek j ₂ -höz hasonlítása)	Numerikus értékek
Egyformán fontos	1
Kissé fontosabb - Kissé kevésbé fontos	3 - 1/3
Fontosabb - Kevésbé fontos	5 - 1/5
Jelentős mértékben fontosabb - Jelentős mértékben kevésbé fontos	7 - 1/7
Sokkal fontosabb - Sokkal kevésbé fontos	9 - 1/9

5. táblázat

Saaty összehasonlítási skálája

Ennek a skálának az alkalmazásakor az egyes kritériumok összehasonlításához ($n \times n$) az méretű $[A]$ inverz, összehasonlítási mátrixhoz jutottak, amely az $A_{j_1 j_2} x A_{j_2 j_1} = 1$ egyenlőséget kielégítő elemekből áll. A valamely szakember által végzett összehasonlítások ellentmondás mentességét (konzisztenciáját) a $[A] \lambda_{max}$ mátrix legnagyobb sajátértékének megállapításával jellemezték. Eszerint az $[A]$ akkor teljes mértékben konzisztens, ha $\lambda_{max} = n$, és a sajátérték növekedésével, a következő egyenlet szerint, egyre inkább ellentmondásossá válik:

$$C. R. = \frac{C. I.}{R. I.} < 0.1$$

ahol:

C.R. - konzisztencia-hányados

R.I. - véletlen konzisztenciaindex

C.I. - konzisztenciaindex

A matrix akkor konzisztens, ha a $C. I.$ és az $R. I.$ aránya 0.1-nél kisebb, a $C. I.$ a következőképpen számítható:

$$C. I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Az $R. I.$, a véletlen konzisztenciaindex, mint a neve is utal rá, nagyszámú, ugyanolyan módon, véletlenszerűen előállított, átlagos $C. I.$ értéket jelent. A 6. táblázat, a mátrix méretének függvényében, az 500 minta alapján kalkulált, átlagos $R. I.$ értékeket szemlélteti.

Mátrix mérete (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R.I.	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,25	1,49

6. táblázat

A mátrix méretétől függő, véletlen konzisztenciaindexek

A kérdőívre adott válaszok azon sorait, amelyeket az AHP nem talált konzisztenseknek, nem zárták ki az elemzésből, csupán azokat – a következőkben felvázolt nemlineáris optimalálás alkalmazásával – konzisztenssé tették.

7.5.2. Általánosított Csökkentett Gradiens (GRG) algoritmus nemlineáris optimaláshoz

Az egyik értékelő által szolgáltatott, a $C_j = \langle C_1, C_2, \dots, C_n \rangle$ kritériumsorra vonatkozó, nem konzisztens (ellentmondásokat tartalmazó) mátrix legyen $[A]$:

	C_1	C_2	...	C_n
C_1		x_{12}		x_{1n}
C_2	$1/x_{12}$			x_{2n}
...				
C_n	$1/x_{1n}$	$1/x_{2n}$		

Ugyanakkor legyen $[A]'$ a keresett konzisztens mátrix:

	C_1	C_2	...	C_n
C_1	...	x'_{12}	...	x'_{1n}
C_2	x'_{2n}
...
C_n

A célkitűzés abban fogalmazható meg, hogy a két mátrix jobb oldali, felső háromszögében levő, megfelelő elemek közötti különbséget minimálják, miközben a következő összefüggést is kielégítik:

$$\min \sqrt{\sum_{j=1}^n |x_{j_1 j_2} - x'_{j_1 j_2}|^2}$$

miközben

$$1/9 \leq x'_{j_1 j_2} \leq 9$$

és

$$C.R \leq 0.1$$

Mivel a nemlineáris optimalizációs problémának lineáris kényszerfeltételei vannak, az a GRG (Általánosított Csökkentett Gradiens) módszerrel oldható meg. Ennek végrehajtásához az összehasonlítási mátrixnak konzisztensnek kell lennie, mialatt a szakemberektől származó válaszokat is a lehető legnagyobb mértékben figyelembe veszi.

7.5.3. A szakértői értékelések aggregálása (összesítés utáni általánosítása)

A következő lépés a szakértői válaszok összegezése volt azzal a céllal, hogy az egész szakértői panelre vonatkozóan egységes, azt jellemző (konszenzuális) válaszokhoz jussanak. Erre a célra az euklideszi távolság elvét alkalmazták. Legyen e_k és e_l két olyan szakértő, akiknek a kritériumsor viszonylagos fontosságára vonatkozó véleményei közötti távolságot meg kívánják állapítani. A véleményeik közötti hasonlóság mértéke az álláspontjaik közötti távolsággal jellemezhető, a következőképpen:

$$s_{e_k e_l} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{j_1 j_2 e_k} - x_{j_1 j_2 e_l})^2}$$

ahol $s_{e_k e_l}$ az e_k és az e_l szakértő véleményei közötti távolság, míg $x_{j_1 j_2 e_k}$ és $x_{j_1 j_2 e_l}$ véleményeik számszerű kifejezése (lásd az 5. táblázatot), a j_1 és a j_2 kritérium viszonylagos fontossága tekintetében. Tekintettel arra, hogy az 5. táblázaton bemutatott skála reciprok értékekből áll, a szakértői értékeléseket, az (5) egyenlet alkalmazása előtt, logaritmikus skálára kell átszámítani.

Minden egyes szakértő által adott értékelésnek a többiekétől számított euklideszi távolságát meghatározva, $p \times p$ méretű szimmetrikus $[P]$ mátrixot hoztak létre, ahol p a szakértők száma. A mátrix a szakértői véleménypárokat jellemző pontok közötti távolságokat (a közelítés mértékét) szemlélteti.

	e_1	e_2	...	e_p
e_1		$s_{e_1 e_2}$		$s_{e_1 e_p}$
e_2	$s_{e_2 e_1}$			$s_{e_2 e_p}$
...				
e_p	$s_{e_p e_1}$	$s_{e_p e_2}$		

Az egyes értékelőknek olyan súlyokat tulajdonítottak, amelyek a többi szakember véleményéhez való hasonlóság mértékével függ össze. Így azon szakértők által adott értékeléseket, akiknek – az előbbieken definiáltak szerinti – távolságuk kisebb, a kritériumok végső súlyainak megállapításakor fontosabbnak tekintették.

Ennek érdekében, az értékelőknek a többiekétől való távolságait összegezik, majd annak a súlyozott inverzét határozzák meg.

$$w_{e_k} = \frac{1}{\sum_{l=1}^p s_{e_k e_l}} \cdot \frac{1}{\sum_{k=1}^p \frac{1}{\sum_{l=1}^p s_{e_k e_l}}}$$

Igazolható, hogy az egyes véleményeknek egyetlen konszenzuális (egységes, összegezett) véleményre ($x_{j_1j_2c}$) való koncentrálásához a súlyozott mértani átlag (n szám súlyozott átlaga, szorzatuk n-edik gyökével kifejezve) – és nem az elterjedten alkalmazott számtani átlag – az egyetlen reálisan szóba jövő módszer:

$$x_{j_1j_2,c} = \prod_{k=1}^p x_{j_1j_2,ek}^{w_{ek}} \frac{1}{\sum_{k=1}^p w_{ek}}$$

Így áll elő az $[A_c]$ konszenzuális összehasonlítási mátrix:

	C₁	C₂	...	C_n
C₁		$x_{e_{12},c}$		$x_{1n,c}$
C₂	$1/x_{12,c}$			$1/x_{2n,c}$
...				
C_n	$1/x_{1n,c}$	$1/x_{2n,c}$		

A kritériumok súlyainak számítása érdekében, azokat először, a következőképpen, normalizálni kell:

	C₁	C₂	...	C_n
C₁	$\frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{j1,c}^2}}$	$\frac{x_{12,c}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{j2,c}^2}}$		$\frac{x_{1n,c}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{jn,c}^2}}$
C₂	...	$\frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{j2,c}^2}}$...	$\frac{x_{2n,c}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{jn,c}^2}}$
...
C_n	$\frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{jn,c}^2}}$

A normalizált konszenzuális összehasonlítási mátrixból a $C_j = \langle C_1, C_2, \dots, C_n \rangle$ kritériumsúlyokat a (11) egyenlet szerint határozzák meg:

$$w_j = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{j1j2,c}^2}}}{\sum \sum_{j=1}^n \frac{1}{x_{j1j2,c}}}$$

(11)

7.5.4. Az alternatívák értékelése

Ennek a lépésnek célját az képezi, hogy az egyes vélemények feldolgozásából adódó változatokat, minden kritérium szempontjából, sorba rendezzék. Ennek során figyelemmel kell lenni arra is, hogy a kritériumok egyik része minőségi jellegű (kvalitatív), míg a többi számszerűsített (kvantitatív), lásd a 3. és a 4. táblázatot.

Kvalitatívok azok a változók, amelyek, jellegüknél fogva, számszerűsítésükhöz túlságosan bonyolultnak bizonyulnak. Ezekben az esetekben a változat értékelésére – az ilyen célra nagyon hasznosnak bizonyuló – verbális kifejezéseket alkalmaznak. A kvalitatív változók háromszögű fuzzy számokkal jellemezhetők, a szakirodalomból származó ismereteknek a nagyszámú szakember alkotta panel véleményével történő kombinálása útján (ez utóbbi kettő kifejezéséhez verbális terminológiát választanak).

Ugyanakkor azok tekinthetők kvantitatív változóknak, amelyek jól meghatározható számokkal modellezhetők. Azonban meglehetősen nehéz az ilyen változókat egyetlen számértékkel jellemezni, mivel a mindennapi helyzetekben a bizonytalanság és a fluktuációk előfordulása gyakori. Ezt a tényt elfogadva, a kvantitatív jellemzőket a hozzájuk tartozó értéktartományból, Monte Carlo módszer alkalmazásával meghatározottan, sztochasztikusan kezelték. (A Monte Carlo módszer alkalmazásával az ilyen jellegű becslésekből, különböző teljesítmények elérésének valószínűsége megállapítható).

Miután az egyes változatok minden kritériumra kiterjedő értékelését a korábban említett két módszer egyikével, a TOPSIS-módszerrel (lásd a 6. pontot) elvégezték, az eredmény a végleges értékelés inputjaként hasznosítható.

7.5.5. Fuzzy-halmazok a verbális értékelések modellezésére

A fuzzy-halmazokat az emberek által adott értékelések bizonytalanságainak és félreérthetőségének (homályosságának) a kezelésére Zadeh [15] vezette be. A fuzzy-logika egyik legfontosabb és leginkább intuitív felhasználási területe a fuzzy számok alkalmazása, amelyeknek definíciója a tagsági fok (tagsági függvény) elméletén nyugszik. Zadeh azt javasolta [15], hogy valamely elem meghatározott halmazhoz viszonyított tagsági számainak tartománya a $[0, 1]$ intervallumon belül változhat ahelyett, hogy a 0, 1 értékpár valamelyikére szorítkozna. Eszerint F fuzzy-halmaz esetében, valamely fuzzy szám tagsági függvénnyel jellemezhető, ami az F halmazon belül x tagsági foknak felel meg [16]. Az ebben az elemzésben alkalmazott, háromszögű fuzzy szám (TFN) $\tilde{A} = (\alpha, \beta, \gamma)$, amelynek a tagsági függvényét a következőképpen határozták meg:

$$\mu(x, \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha} & \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{\gamma-x}{\gamma-\beta} & \beta \leq x \leq \gamma \\ 0 & \text{egyebkent} \end{cases}$$

ahol α, β, γ az \tilde{A} háromszögű fuzzy szám alsó, átlagos (középső) és felső értékeit jelentik. A 7. táblázat a verbális kifejezéseket megjelenítő, háromszögű fuzzy számoknak a vizsgálatban alkalmazott skáláját szemlélteti.

Verbális kifejezések	Háromszögű fuzzy szám (TFN)
Rendkívül rossz	(1, 1, 2)
Nagyon rossz	(1, 2, 3)
Rossz	(2, 3, 4)
Elég rossz	(3, 4, 5)
Átlagos	(4, 5, 6)
Elég jó	(5, 6, 7)
Jó	(6, 7, 8)
Nagyon jó	(7, 8, 9)
Rendkívül jó	(8, 9, 10)

7. táblázat

A kvalitatív változók értékelésére szolgáló verbális kifejezések

A súlyoknál bemutatotthoz hasonlóan, a szakértői panel által ezeknek a kvalitatív változók teljesítményére adott értékeléseket is szintetizálni kell, azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben az értékelésekre szakirodalmi információk is rendelkezésre álltak.

Legyen r_{ij} az A_i variánsnak valamilyen C_j kritériumra adott értékelése. Az r_{ij} és az értékelők véleménye közötti távolságot – akik két r_{ij} verbális értékelést adtak –, az $\tilde{A} = (\alpha_A, \beta_A, \gamma_A)$ és a

$B = (\alpha_B, \beta_B, \gamma_B)$ háromszögű fuzzy számok segítségével, a vertex módszer alkalmazásával csökkenteni lehet [17].

$$s_{e_k, e_l} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(\alpha_A - \alpha_B)^2 + (\beta_A - \beta_B)^2 + (\gamma_A - \gamma_B)^2]}$$

ahol s_{e_k, e_l} az e_k és az e_l értékelők egy változóra vonatkozó véleménye közötti távolság, amit \tilde{A} és \tilde{B} háromszögű fuzzy számmal határoznak meg.

Ezután a (8) és a (9) egyenlet felhasználásával, az egyes szakértők értékeléseit és az egész panel konszenzuális értékelését számítják ki. Végül pedig az összesített értékelésbe – geometriai átlag alkalmazásával – egyes korábbi szakirodalmakban megjelent értékeléseket is "bedolgoztak":

$$\tilde{r}_{ij} = \sqrt{\tilde{r}_{ij}^E \cdot \tilde{r}_{ij}^L}$$

ahol \tilde{r}_{ij} az A_i alternatívának a C_j kritériumra vonatkozó végleges (összesített) értékelése, \tilde{r}_{ij}^E a szakember panel által adott konszenzuális értékelés és a \tilde{r}_{ij}^L tárgykörrel foglalkozó szakirodalomból származó értékelés.

Az egyszerű és könnyen kezelhető értékelés érdekében, a háromszögű fuzzy számmal leírt változókat kanonikus alakba írták át, ami a fokokba soroló átlagos integráló módszer (graded mean integration method) alkalmazásán alapszik [18]. $\tilde{A} = (\alpha, \beta, \gamma)$ háromszögű fuzzy szám esetében, annak fokokba soroló átlagos integráló formája a következő:

$$P(\tilde{A}) = \frac{1}{6} \cdot (\alpha + 4 \cdot \beta + \gamma)$$

Így a (16) egyenlet alkalmazása lehetővé teszi, hogy a (15) egyenlet szerint kapott háromszögű fuzzy számokból igen-nem típusú számokhoz jussanak; ez pedig a TOPSIS-módszer egyszerűsítésére nagyon hasznosnak bizonyul.

Monte Carlo módszerek bizonytalan, számszerűsíthető változók kezelésére

A számszerűsíthető (kvalitatív) változókat az jellemzi, hogy egyértelmű (határozott) számokkal modellezhetők. A mindennapi életben előforduló helyzeteket általában valamilyen mértékű bizonytalanság jellemzi, így aztán meglehetősen nehéz azokat egyetlen (határozott) számmal jellemezni. Ezért a kvalitatív jellemzőket ebben az esetben, a valószínű értékek tartományára vonatkoztatottan, sztochasztikus jellegűeknek tekintették; ezeknek a tartományoknak a megállapításához a Monte Carlo módszereket alkalmazták, amelyek ilyen becslési tartományban különböző teljesítmények elérésének a valószínűségét teszik meghatározhatóvá.

Ezek a technikák véletlen számok generálásán alapulnak annak érdekében, hogy analitikus eszközökkel megoldhatatlan problémákhoz közelítő megoldást találjanak [19]. Ebben az esetben arra használták a módszereket, hogy az egyes scenáriókkal kapcsolatos kockázatokat felmérjék, ha azok valamely mérőszám becslési tartományán belüli értékeket vesznek fel. Ezeket a mérőszámokat jól lehet jellemezni a következő értékhármassal: a szakértői véleményeken és/vagy az irodalmi információkon alapuló, legvalószínűbb értékkel, valamint a lehetséges, minimális és maximális értékkel [20]. Ennek érdekében olyan megosztási függvényt kell meghatározni, amely a legvalószínűbb értékek kiválasztását lehetővé teszi; ez utóbbiak segítségével lehet aztán a véletlen számokat generálni. Erre a célra a legalkalmasabbnak a korábban említett értékhármassal csúcsai által meghatározott háromszögű alak látszik. Így generálásával olyan vektor állítható elő, amely az r_{ij} értékeléséhez különböző értéket állít elő, ahol n háromszögűen eloszló véletlen számokkal végzett szimulációk száma, ahelyett, hogy egyetlen r_{ij} értékkel operálnának.

7.5.6. TOPSIS (Sorrend Preferencia Ideális Megoldáshoz való Hasonlóság alapján történő Meghatározásának technikája)

Az eredetileg Hwang és Yoon által kifejlesztett TOPSIS-módszer [21] azon az alapelven nyugszik, hogy valamely többkritériumos probléma választott változatát nem csak az jellemzi, hogy az ideális pozitív megoldástól (PIS) a legkisebb távolságra van, hanem az is, hogy az ideális negatív megoldástól (NIS) való távolsága a legnagyobb. Ennek a kettős feltételnek a megszületése egyáltalán nem triviális, mivel a PIS-hez legközelebb levő változat nincs szükségszerűen a NIS-től a legtávolabb. Az ennek a problémának a megoldására kifejlesztett TOPSIS-módszer a következő lépésekből áll.

1. A döntéshozó mátrix meghatározása. Ez a mátrix az $A_i < i = 1, 2, \dots, m >$ kvalitatív vagy kvantitatív változók $C_j < j = 1, 2, \dots, n >$ kritériumokra vonatkozó r_{ij} értékeléseit mutatja be.

	C₁	C₂	...	C_n
A₁	r_{11}	r_{12}	...	r_{1n}
A₂	r_{21}	r_{22}	...	r_{2n}
...
A_m	r_{m1}	r_{m2}	...	r_{mn}

2. A döntéshozó mátrix normalizálása. Az r_{ij} normalizált értéket a következőképpen lehet kiszámítani:

$$r_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij})^2}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

3. A normalizált súlyozott döntéshozó mátrix létrehozása. A normalizált, súlyozott v_{ij} értéket a következőképpen számították ki:

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

ahol w_j a kritérium súlya, azon feltétel teljesülése mellett, hogy $\sum_{j=1}^n w_j = 1$

4. Az ideális, pozitív megoldás (PIS) és az ideális, negatív megoldás (NIS) meghatározása.

$$A^+ = (v_1^+, \dots, v_n^+) = \left[\left(\begin{matrix} \text{max} \\ i \end{matrix} \right) v_{ij} \forall j \in J \mid \left(\begin{matrix} \text{min} \\ i \end{matrix} \right) v_{ij} \forall j \in J' \right]$$

$$A^- = (v_1^-, \dots, v_n^-) = \left[\left(\begin{matrix} \text{min} \\ i \end{matrix} \right) v_{ij} \forall j \in J \mid \left(\begin{matrix} \text{max} \\ i \end{matrix} \right) v_{ij} \forall j \in J' \right]$$

ahol J a haszonkritériummal és J' a költségkritériummal függ össze.

5. Változatokként az A^+ és az A^- -től való távolság számítása. A távolságot az n dimenziós euklideszi távolság meghatározásával jellemzik.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m$$

6. A változatok ideális megoldástól való viszonylagos közelségének számítása. Az A_i variánsnak az ideális megoldástól való viszonylagos távolságát a következőképpen lehet meghatározni:

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, i = 1, 2, \dots, m$$

Mivel mind d_i^+ , mind pedig d_i^- értéke 0 vagy annál nagyobb, ezért $0 \leq R_i \leq 1$.

8. A cikk folytatásának tartalma

Terjedelmi okok miatt, a DURABROADS projekt D2.3 részjelentésének további eredményei majd más cikkek témáját képezik. Annak főbb témái: a bemutatott módszertan érzékenységvizsgálata; a téma-művelés során végzett esettanulmány nagy nehéz forgalmú, európai utak aszfalt kopóréteg-típusai-nak optimalásához; az esettanulmány érzékenységvizsgálata; következtetések.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket nyilvánítják az Európai Uniónak, amely 7. Kutatási és Technológiafejlesztési Keretprogramjához kapcsolódóan, a jelen cikk alapját képező DURABROADS-projektet részben finanszírozta. Hasonlóképpen köszönet illeti a DURABROADS projekt 2. munkabizottságának a munkában közreműködött spanyol, lett és belga partnereit is.

Felhasznált irodalom

1. DURABROADS (Cost-effective DURABLE ROADS by green optimized construction and maintenance) project. Collaborative project financed by EU Seventh Framework Programme, Theme SST.2013.5-3 Grant agreement no. 606404 Annex I „Description of Work” 2013. 104 p.
2. Gáspár, L.: Lifetime engineering for roads (Keynote lecture). Proceedings of CETRA 2012 (2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure), Dubrovnik, 7-9 May 2012, pp. 25-34.
3. DURABROADS project Deliverable D2.1 Assessment of the gaps in road-related procedures. 2014, 99 p.
4. DURABROADS project Deliverable D2.2 Quantification of the medium and long-term influence of climate change and of the implementation of freight corridors on European road network. 2014, 61 p.
5. DURABROADS project Deliverable D2.3 Proposal of construction, maintenance and rehabilitation procedures more affordable, resilient and sustainable for the management of road asset. 2015, 109 p.
6. Dr. habil. Gáspár L., Bencze Zs.: Aszfaltburkolat-típusok optimalása. Közlekedéstudományi Szemle (Megjelenés alatt)
7. Sarja, A., Vesikari, E.: Durability Design of Concrete Structures. RILEM Report Series 14. E&FN Spon: London, 1996. 143 p.
8. Gáspár L.: Útgazdálkodás. Akadémiai Kiadó, 2003. 361 p.
9. Gáspár, L.: Lifetime engineering in road asset management. CD-ROM Proceedings of 3rd European Pavement and Asset Management Conference, Coimbra (Portugal), 2008, Session B3. 10 p.
10. Gáspár L., Horvát F., Lublói L.: Közlekedési létesítmények élettartama. UNIVERSITAS-Győr Non- profit Kft., 2011. 324 p.
11. Bakó, A.: Optimization Model for Highway Pavement Maintenance. CD-ROM Proceedings of ISAPT II, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004. 7 p.
12. Gáspár, L.: Evaluation of highway contractors based on the actual performance of their past projects. TRA Transportation Research Arena Europe, 2011, Athens. 12 p.
13. Gáspár, L., Rajcsányi, F.: Adaptation measures to the challenges of climate change in Hungarian road construction. CD-ROM Proceedings of 5th Eurobitume & Euraspalt Congress, Istanbul, Turkey, 13-15 June 2012. 8 p.
14. Saaty, T. L.: The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. New York, McGraw-Hill, 1980.
15. Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. Fuzzy Sets, Information and Control, 8(3), 1965, pp. 338-353.
16. Lin, H.: An application of fuzzy AHP for evaluating course website quality. Computers and Education, 54(4), 2010, pp. 877-888.
17. Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F. H., Izadikhah, M.: Extension of the TOPSIS method for decision making problems with fuzzy data. Applied Mathematics and Computation, 181(2), 2006, pp. 1544-1551.
18. Chou, C.: The canonical representation of multiplication operation on triangular fuzzy numbers. Computers and Mathematics with Applications, 45(10-11), 2003, pp. 1601-1610.
19. Hammersley, J. M., Handscomb, D. C.: Monte Carlo methods. London (U.K.), Methuen, 1964.
20. Vose, D.: Risk analysis: A quantitative guide. New York (U.S.), John Wiley & Sons, 1996.
21. Hwang, C. L., Yoon, K.: Multiple attribute decision making: Methods and applications. New York (U.S.), Springer, 1981.

Szerző

Dr. habil. Gáspár László

okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, az MTA doktora. A Közlekedéstudományi Intézet kutató professzora, a Széchenyi István Egyetem emeritusz professzora. 400 publikációjának és 520 szakmai előadásának zöme útépitési, -fenntartási és -gazdálkodási témákkal foglalkozik. 30+ nemzetközi téma és bizottság tagja vagy vezetője (volt).

Bencze Zsolt

okl. építőmérnök. A Széchenyi István Egyetem Multidiszciplináris Műszaki Doktori Iskola PhD hallgatója. 2005 óta a Közlekedéstudományi Intézet munkatársa. Főbb kutatási projektjei: EU-s finanszírozású SPENS, INCRIS és DIRECT-MAT projekt, az M6 salaktöltéseinek vizsgálata, az M0 Keleti szektor betonburkolatának gyártásközi ellenőrzése, az első hazai betonburkolatú körforgalom kivitelezésének ellenőrzése.

Daniel Jato-Espino

okl. építőmérnök, a spanyol GITECO Kutatási Csoport kutatója a Cantabriai Egyetemen (University of Cantabria). Szakmai területei: városi vízgazdálkodás, városi hidrológia és árvízvédelem, az éghajlatváltozás figyelembevételével, csapadék-lefolyás modellezése, fenntartható vízvezetési rendszerek, GIS-mapping, döntéstámogató eljárások, statisztikai elemzések

Témakörök

Kötőanyagok • Témakörök • Útépités • Útgazdálkodás

Kulcsszavak

Befogadva

2016. március 31.

Hozzászólás

* Név	<input type="text"/>
* Email	<input type="text"/>
Honlap	<input type="text"/>
Hozzászólás	<input type="text"/>

[Bejegyzések](#)

[Galéria](#)

[Impresszum](#)

[Interjúk](#)

[Könyvajánló](#)

[Nemzetközi szemle](#)

[Szakolvasó](#)

[Témakörök](#)

© **Copyright Útügyi Lapok** 2013 • *Minden jog fenntartva.*

