



Nagy nehézforgalmú utak „optimális” felújítási technológiájának kiválasztása

Gáspár László, Bencze Zsolt

Kivonat: A részben Európai Unió által finanszírozott DURABROADS-projekt nagy nehézforgalmú, európai utak aszfalt kopóréteg-típusaihoz szóba jövő felújítási technológiák optimalálásához döntéstámogató modellt javasolt, és esettanulmányként, a gyakorlatban is kipróbált. Az esettanulmány során nyert eredmények a módszertan alkalmazhatóságát igazolták, a döntéshozókat támogatják abban a tekintetben, hogy komplex fenntarthatósági szempontokon alapulva, a legmegfelelőbb burkolatfelújítási technológiatípust ki tudják választani. A javasolt módszertan a döntéshozatali problémát hierarchikus fává strukturálja, és ily módon az egyes változatok teljesítménye különböző szempontok szerint jellemezhető.

Kulcsszavak: európai nagy nehézforgalmú utak, aszfalt kopóréteg-típusok, EU 7. Keretprogram által finanszírozott projekt, útburkolat-felújítási technológiák, döntéstámogató modell, matematikai-statisztikai eljárások

1. Előzmények

Az Európai Unió 7. Kutatási és Technológiafejlesztési Keretprogramjához kapcsolódva, 2013-ban egy nemzetközi konzorcium a 42 hónapos DURABROADS (Költséghatékony, tartós utak, „zöld” optimált építés és fenntartás révén) projekt részbeni finanszírozását nyerte el (DURABROADS, 2013). A partnerek egyike a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft., amely a 2. munkabizottságnak is a vezetője.

A DURABROADS projekt fő célkitűzését költséghatékony, környezetbarát és komplex módon optimált utak tervezése, fejlesztése és az eredmények demonstrálása képezi. A projekt 2. munkabizottságának célkitűzése az Európában elterjedten alkalmazott aszfaltkopórétegeknek és burkolat-felújítási módszereknek a szélsőséges környezeti és forgalmi terhelés kombinációjával szemben tanúsított ellenállás szempontjából, az élettartam-mérnöki tudomány elveinek (Gáspár, 2012) hasznosításával végrehajtott optimalása képezte. Eredményeiket

három részjelentés (DURABROADS, 2014a; DURABROADS, 2014b; DURABROADS, 2015) formájában tették közzé. Jelen cikk az európai nagy nehézforgalmú utak jellegzetes burkolatfelújítási technológiáinak komplex vizsgálatával és az eljárások ennek alapján történő sorolásával foglalkozik.

2. Jellegzetes burkolatfelújítási technológiák

A DURABROADS WP2 munkabizottságának tagjai által összeállított kérdőív célját az képezte, hogy az európai nehézforgalmú utak (TEN-T hálózat) fő forgalmi és technológiai jellemzőiről széles körű információkat gyűjtsenek (Gáspár, Bencze, ma. (1); Gáspár, Bencze, Jato-Espino, ma.; Gáspár, Bencze, ma. (2)). A kérdőívre 17 országból (BE, CRO, CZ, EST, FR, GE, HU, IT, LT, LV, NO, PT, SLO, SP, SRB, UK) érkezett válasz. Bár az Európában elterjedten alkalmazott burkolatfelújítási módszerek teljesítményét az egyes körzetekben a különböző forgalmi-környezeti terhelés érzékelhetően befolyásolja, a DURABROADS-partnerek abban

1. Táblázat. Egyes burkolatfelújítási technológiák funkcionális osztályozása

Felújítási technológiák	Tartósság	Repedésképződéssel szembeni ellenállás
Kétrétegű felületi bevonat	3	1
12-18 mm-es vastagságú mikro-aszfaltburkolat	2	1

állapodtak meg, hogy a kontinensen egységesen a következő burkolatfelújítási technológiákat „versenyeztetik”:

- helyszíni, hideg recycling + új, 50 mm-es vastagságú AC kopó réteg (CIR),
- kétrétegű, permetezéses felületi bevonat (DCS),
- teljes vastagságú recycling + új, 50 mm-es vastagságú AC kopó réteg (FDR),
- helyszíni, meleg recycling + 38 mm-es vastagságú AC kopó réteg (HIR),
- burkolatmarás + új, 50 mm-es vastagságú AC kopó réteg (MOV),
- kevert felületi bevonat (microsurfacing) (MS),
- új, 50 mm-es vastagságú AC kopóréteg (OV),
- új, vékony (pl. 30 mm-es vastagságú) AC kopóréteg (THMA).

Az egyes burkolatfelújítási technológiák közüli választáskor az útkezelők általában elsősorban a módszerrel elérhető teljesítményjavulást próbálják figyelembe venni. A DURABROADS project keretében végzett elemzés (optimálás) – az élettartammérnöki tudomány alapelveit (Gáspár, 2008) követve – ennél jóval sokrétűbb, hiszen – a műszaki (funkcionális) szempontokon túlmenően – társadalmi (humán), gazdasági (pénzügyi) és környezeti szempontokra is kitér.

3. Szakirodalmi áttekintés és kérdőíves felmérés

A 2. fejezet szerinti nyolc vizsgált aszfaltburkolatfelújítás-típusnak (CIR, DCS, FDR, HIR, MOV, MS, OV és THMA) a négy választott – műszaki (funkcionális), környezeti, gazdasági (pénzügyi) és társadalmi (humán) – szempont (Gáspár, 2008) szerinti teljesítményével kapcsolatos információkat – szakirodalmi adatok és a

2. Táblázat. Burkolatfelújítási technológiák műszaki jellegű osztályozása (szakirodalmi források)

Burkolatfelújítási technológiák	Műszaki osztályzatok	
	Bomlási ellenállás	Alakváltozási (nyomósodási) ellenállás
Kétrétegű felületi bevonat	1/2	1/2
Microsurfacing	1/2	2
Vékony aszfaltréteg	2/3	2/3
50 mm erősítés	3/4	4
Helyszíni meleg recycling	3/4	4/5
Marás + 50 mm erősítés	4	4/5
Helyszíni hideg recycling + 50 mm erősítés	5	3/4
Teljes vastagságú recycling + 50 mm erősítés	5	4

DURABROADS WP2 munkabizottság által összeállított kérdőívre 81 európai szakember által adott válaszok alapján – röviden összefoglaljuk.

3.1 Műszaki (funkcionális) szempontok

3.1.1 Szakirodalmi áttekintés

Az 1. táblázatban két jellegzetes burkolatfelújítási rétegnek angol szakemberek által adott és útmutató formájában közkinccsé tett, tartóssági és repedésképződési ellenállást jellemző osztályzatai láthatók (Hampshire City Council 2010).

A 2. táblázat szakirodalmi információk összesítése alapján a különböző aszfaltfelújítási technológiák műszaki (funkcionális) osztályzatait szemlélteti. A „bomlási ellenállás” a felületi kopással, a zúzalékkipergéssel, valamint a fáradási és a termikus repedések képződésével szembeni ellenállást összegezi.

3.1.2 Kérdőíves szakértői értékelés

A DURABROADS projekt partnerei által összeállított kérdőívre 81 európai szakember által adott válaszok (Gáspár, Bencze, Jato-Espino, ma.; Gáspár, Bencze, ma. (2) konszenzuális értékelése [MathWorks 2014 27/14] után a vizsgált burkolatfelújítási technológiákra a 3. táblázaton feltüntetett osztályzatok adódtak.

3.2 Társadalmi (humán) szempontok

3.2.1 Szakirodalmi áttekintés

3. Táblázat. Burkolatfelújítási technológiák műszaki jellegű osztályozása (szakirodalmi források)

Burkolatfelújítási technológiák	Műszaki osztályzatok		
	Bomlási ellenállás		Alakváltozási (nyomosodási) ellenállás
	Fáradási repedések	Termikus repedések	
Kétrétegű felületi bevonat	1,6 ± 1,0	1,7 ± 1,1	1,6 ± 1,2
Microsurfacing	2,2 ± 1,1	2,4 ± 1,0	1,8 ± 1,2
Vékony aszfaltréteg	2,9 ± 0,7	2,8 ± 0,8	2,7 ± 1,0
Marás + 50mm meleg-aszfalt-erősítés	3,9 ± 0,8	3,9 ± 0,8	4,0 ± 0,7
Helyszíni hideg recycling + 50 mm erősítés	3,3 ± 0,9	3,6 ± 0,9	4,5 ± 0,9
Helyszíni meleg recycling	4,0 ± 1,1	4,0 ± 1,1	4,0 ± 1,1

a) Forgalmi torlódások és időveszteségek

A forgalmi torlódásokkal és az utazási időveszteségekkel kapcsolatos információkat a 4. táblázat szemlélteti.

b) Forgalombiztonság

Szakirodalmi információk összesítése alapján a különböző aszfaltfelújítási technológiák társadalmi (humán) osztályzatait az 5. táblázat mutatja be.

A DURABROADS projekt partnerei által összeállított kérdőívre 81 európai szakember által adott válaszok (Gáspár, Bencze, Jato-Espino, ma.; Gáspár, Bencze, ma. (2)) konszenzuális értékelése (MathWorks 2014) után a vizsgált burkolatfelújítási technológiákra a 6. táblázaton feltüntetett társadalmi osztályzatok adódtak. (A 6. táblázaton az eredeti technológialistából azért maradt ki két eljárás, mert a kihagyottaknál a kérdőíves válaszok nem voltak eléggé konzekvensek).

3.3 Gazdasági (költséghatékonysági) értékelés

A következő vizsgálat a burkolatfelújítási technológiák gazdasági (költséghatékonysági) szempontból történő összehasonlítására irányul; a kivitelezési költségeket, az egész élettartam alatti költségeket és az évszaki építési korlátozásokat vették alapul.

3.3.1 Szakirodalmi áttekintés

a) A kivitelezés időjárás-korlátai

4. Táblázat. Felújítási technológiákkal kapcsolatos időveszteségekre és forgalmi torlódásokra vonatkozó információk

Szakirodalmi hivatkozás	Felületi bevonás	Microsurfacing	Aszfaltréteg
Croteau, Linton, Davidson, Houston, 2005	Minimális forgalomzavarást okoz.		
ADEPT/RSTA 2011		Gyors szilárdulás (a forgalom akár 20 perc után rámehet).	
Jahren 2011		1 órán belül forgalomba helyezhető.	
Cuelho, Mokwa, Akin, 2006	Sebességkorlátozás kell építés után.	1 órán belül forgalomba helyezhető.	
South Dakota DOT 2010	2 órányi szilárdulás után normál sebességű forgalom rámehet.	1 órán belül forgalomba helyezhető.	
Johnson 2000a	Csak a hengerlés befejezése és az aszfalt megszilárdulása után helyezhető forgalomba.	Kb. 1 órán belül forgalomba helyezhető.	„Szőnyegezés”-nél minimális forgalomszabályozási igény.

A 7. táblázat egyes burkolatfelújítási technológiák megvalósításakor jelentkező időjárás-korlátokra vonatkozó szakirodalmi információkat foglal össze.

b) Aszfaltkeverékek élettartam-költségeinek vizsgálata

Mivel a vizsgált burkolatfenntartási technológiák gazdasági jellegű összehasonlításához (sorba rendezéséhez) a szakirodalmi áttekintés nem szolgáltatott kielégítő eredményeket, az egyes változatok egész élettartamukra kiterjedő, környezeti és gazdasági értékelésre került sor. Az egyes technológiákat nyilvánvalóan ugyanarra a vizsgálati időszakra vonatkozólag hasonlítják össze, és a 8. táblázaton feltüntetett stratégiákat („felújítási naptárakat”) veszik alapul.

Az egyes vizsgált burkolatfelújítási technológiák 1 m²-re vetített költségét a 9. táblázat összegezi. A különböző, főleg amerikai forrásokból származó adatok szórást is feltüntetettük.

5. Táblázat. Burkolatfelújítási technológiák társadalmi jellegű osztályozása (szakirodalmi források)

Burkolatfelújítási technológiák	Társadalmi osztályzat	
	Kényelem Torlódás és idővesztés	Biztonság Munkahelyi biztonság
Kétrétegű felületi bevonat	4/5	4
Microsurfacing	5	4/5
Vékony aszfaltréteg	4/5	3/4
50 mm-es vastagságú erősítés	4/5	3/4
Helyszíni meleg recycling	4	3
Marás + 50 mm-es vastagságú erősítés	4	3/4
Helyszíni hideg recycling + 50 mm-es vastagságú erősítés	4	3/4
Teljes vastagságú recycling + 50 mm-es vastagságú erősítés	4	3/4

c) A burkolatélettartam felújítással való meghosszabbítása

A különböző állapotjavító beavatkozások, köztük a felújítások az útburkolatok üzemi élettartamát meghosszabbítják. A meghosszabbodás mértékét elsősorban a felújítás technológiája és a beavatkozás időpontjában regisztrálható burkolatállapot határozza meg. A 10. táblázat a szakirodalomban található, technológiától függő, élettartam-megnövekedési élettartamokat mutatja be, szórásértékkel együtt.

d) A változatok élettartamköltségei

Az egyes felújítási stratégiák esetében az átlagos éves költségek jellemzésére az egyenértékű éves költséget (EÉK) választották (11. táblázat). 11. táblázat. Felújítási technológiák átlagos egyenértékű éves költsége (EÉK), USD/m²-év-ben (2013-as értékek).

3.4 Környezeti értékelés

A következő vizsgálat a burkolatfelújítási technológiákat környezeti szempontból hasonlítja össze. Akárcsak a költségelemzés során, minden felújítási változatnál felmérték az élettartam alatti energiafelhasználást (MJ/m²) és a kibocsátott CO₂-mennyiséget (kg/m²).

6. Táblázat. Burkolatfelújítási technológiák társadalmi jellegű osztályozása (szakértői értékelés)

Burkolatfelújítási technológiák	Társadalmi osztályzat	
	Kényelem Torlódás és idővesztés	Biztonság Munkahelyi biztonság
Kétrétegű felületi bevonat	3.5 ± 1.1	3.1 ± 1.0
Microsurfacing	3.7 ± 0.9	3.6 ± 1.0
Vékony aszfaltréteg	3.5 ± 0.9	3.6 ± 0.8
Marás + 50mm melegaszfalt erősítés	2.7 ± 1.1	2.9 ± 1.1
Helyszíni hideg recycling + 50 mm erősítés	2.5 ± 1.1	2.8 ± 0.9
Helyszíni meleg recycling	2.7 ± 1.3	2.7 ± 1.3

Minden stratégiának környezeti hatását (CO₂-kibocsátását, energiaigényét, a felhasznált meg nem újuló anyagokat) meghatározták.

a) A variánsok energiafelhasználása és CO₂-kibocsátása

Az energiaigényre és a CO₂-kibocsátásra vonatkozó becslések különböző forrásokból származnak. A 12. táblázat ezeknek a technológiánkénti átlagát és az értékek szórását szemlélteti. A 13. táblázat a vizsgált változatok élettartamuk alatti átlagos éves energiafelhasználását, kibocsátott CO₂-mennyiségét, valamint adalékanyag- és bitumenigényét szemlélteti.

A 13. táblázatból kitűnik, hogy:

- az energiafelhasználás szempontjából a legjobbnak a felületi bevonás és a microsurfacing, míg legkedvezőtlenebbnek a hideg recycling és az aszfalterősítés bizonyult;
- a CO₂-kibocsátás szempontjából a felületi bevonás és a microsurfacing a legjobb, míg az aszfalterősítés és a teljes vastagságú recycling a legkedvezőtlenebb;
- az adalékanyagigény szempontjából a legkedvezőbbnek a teljes vastagságú recycling és a hideg recycling, míg legkevésbé jónak a vékonyaszfalt és az aszfalterősítés bizonyult;
- a bitumenigény szempontjából a microsurfacing és a felületi bevonás a legjobb, míg a teljes vastagságú recycling és az aszfalterősítés mutatkozott a legkedvezőtlenebbnek.

7. Táblázat. Burkolatfelújítási munkák időjárással összefüggő korlátai

Referencia	Permetezéses felületi bevonás	Microsurfacing	Referencia
Johnson, 2000b	Napvilágnál kell dolgozni. Levegő T > 15°C. Relatív nedvességtartalma <75%. Ködös vagy esős napon kerülendő.	Hideg időben kerülendő.	A vékony aszfaltréteg építése csak T > 13°C hőmérséklet felett megengedett.
Jahren, 2011	Iowa: nem építhető szeptember 1. után. Minnesota: nem építhető augusztus 31. után. Kansas: nem építhető szeptember 15. után. Idaho: nem építhető október 31. után.	Éjszakai munka is lehetséges.	

8. Táblázat. Az egyes változatok felújítási stratégiája

Év	Kétrétegű felületi bevonat	Microsurfacing	Vékony aszfaltréteg	Aszfaltréteg	HIR vékony aszfalttal	Marás, aszfaltréteggel	CIR aszfaltréteggel	FDR + aszfaltréteggel
0	Marás és erősítés	Marás és erősítés	Marás és erősítés	Marás és erősítés	Marás és erősítés	Marás és erősítés	Marás és erősítés	Marás és erősítés
7	Felületi bevonat	Microsurfacing	Vékony aszfalt					
12				Aszfaltréteg	HIR aszfaltréteggel	Marás és erősítés	Aszfaltréteg	Aszfaltréteg
14	Aszfaltréteg	Aszfaltréteg	Aszfaltréteg					
23				Marás és erősítés			CIR aszfaltréteggel	FDR aszfaltréteggel
24					Marás és erősítés			
25						Marás és erősítés		
29	Marás és erősítés	Marás és erősítés						
30			Marás és erősítés					
35							Élettartam vége	
37				Élettartam vége				
38					Élettartam vége			
39						Élettartam vége		Élettartam vége
42		Élettartam vége						
43	Élettartam vége							
44			Élettartam vége					

Jelmagyarázat: HIR = helyszíni, meleg aszfalt-újrafelhasználás, CIR = helyszíni, hideg aszfalt-újrafelhasználás, FDR = teljes vastagságú aszfalt-újrafelhasználás.

9. Táblázat. Felújítási technológiák átlagos fajlagos költsége, USD/m²-ben (2013-as értékek)

Felújítási technológia	Átlagos fajlagos költség (USD/m ²)
Kétrétegű felületi bevonat	2,50 ± 0,76
Kevert felületi bevonat (microsurfacing)	3,90 ± 2,00
Vékony aszfaltréteg (aszfaltszőnyeg)	5,00 ± 3,70
Aszfaltréteg	9,70 ± 5,30
Helyszíni meleg recycling + aszfaltréteg	10,90 ± 4,48
Marás + aszfaltréteg	11,30 ± 3,43
Helyszíni hideg recycling + aszfaltréteg	11,30 ± 3,43
Teljes vastagságú recycling + aszfaltréteg	23,80 ± 6,50

10. Táblázat. Felújítási technológiák átlagos élettartamnövelése, évben

Felújítási technológia	Átlagos élettartamnövekedés (év)
Kétrétegű felületi bevonat	6 ± 3
Kevert felületi bevonat (microsurfacing)	5 ± 2
Vékony aszfaltréteg (aszfaltszőnyeg)	7 ± 3
Aszfaltréteg	9 ± 3
Helyszíni meleg recycling + aszfaltréteg	10 ± 3
Marás + aszfaltréteg	11 ± 4
Helyszíni hideg recycling + aszfaltréteg	12 ± 4
Teljes vastagságú recycling + aszfaltréteg	16 ± 5

4. Esettanulmány felújítási technológiák kérdőíves komplex összehasonlítására

A DURABROADS projekt művelése során a különböző burkolatfelújítási technológiák komplex összehasonlítására kialakított módszertan (DURABROADS, 2014b) bemutatására a partnerek esettanulmányt végeztek (DURABROADS, 2015; Gáspár, Bencze, Jato-Espino, ma.; Gáspár, Bencze, ma. (2)). Annak három számítási fázisában (kritériumok súlyozása, variánsok értékelése és érzékenységvizsgálat) kapott eredményeket ismertetjük.

4.1 Kritériumok súlyozása

A javasolt módszertannak a szakértők által kitöltött kérdőívekben tapasztalt ellentmondások kezelésére és minimalására való alkalmazásával a 14. táblázaton feltüntetett követelmények, kritériumok és mérőszámok konszenzuális numerikus értékeihez (Gáspár, Bencze ma. (1)) jutottak; ezeket a 15. táblázat szemlélteti. A

konszenzuális összehasonlító mátrixok minden esetben konzisztensek ($CR \leq 0.1$, ahol CR konzisztenciaarány (Gáspár, Bencze, Jato-Espino, ma.)), ami logikus is, hiszen minden összehasonlítási mátrixot a GRG (általánosított csökkentett gradiens) algoritmus (Abadie, Carpentier, 1968) segítségével – szükség esetében – konzisztenssé tettek. (A konszenzuális értékelés az értékelők eredeti véleményét a lehető legnagyobb mértékben megőrzi). A 16. táblázaton – háromszögű fuzzy számok (Gáspár, Bencze, ma. (1), Lin, 2010) alkalmazásával – az útburkolat-felújítási technológiák hierarchikus szerkezeti elemeinek súlyai láthatók.

A 16. táblázat adatainak vizsgálatából nyilvánvaló a műszaki (funkcionális) követelmények a többivel szemben megnyilvánuló határozott túlsúlya, mivel a megfelelő műszaki teljesítményt nyújtó utak általában gazdaságosak, és a társadalmi követelményeket is kielégítik. Az a tény, hogy a környezeti követelményt az értékelők általában fontosnak tekintik, az útügyi szektorban a növekvő ökológiai tudatosságot igazolja.

11. Táblázat. Felújítási technológiák átlagos egyenértékű éves költsége (EÉK), USD/m²-év-ben (2013-as értékek)

Felújítási technológia	EÉK (USD/m ² -év)
Kétrétegű felületi bevonat	1,9
Vékony (max. 38 mm-es vastagságú) aszfaltréteg	2,0
Kevert felületi bevonat (microsurfacing)	2,0
Helyszíni, hideg recycling + 50 mm-es vastagságú aszfaltréteg	2,0
Teljes vastagságú recycling + aszfaltréteg	2,0
Marás + 50 mm-es vastagságú aszfaltréteg	2,1
50 mm-es vastagságú aszfaltréteg	21
Helyszíni, meleg recycling + 38 mm-es vastagságú aszfaltréteg	21

12. Táblázat. Burkolatfelújítási eljárások energiaigénye és CO₂-kibocsátása

Felújítási technológia	Energiaigény (MJ/m ²)	CO ₂ -kibocsátás (kg/m ²)
Permetezéssel felületi bevonat	9,5 ± 4,5	0,40 ± 0,05
Microsurfacing	15,9 ± 13,0	0,8 ± 0,7
Vékony aszfaltréteg (aszfaltszőnyeg)	47 ± 10	3,7 ± 1,0
Aszfaltréteg	70 ± 7	4,6 ± 1,2
Helyszíni meleg recycling + aszfaltréteg	65 ± 14	4,4 ± 1,0
Marás + aszfaltréteg	89,5 ± 22,0	5,2 ± 1,5
Helyszíni hideg recycling + aszfaltréteg	109,7 ± 21,0	8,7 ± 4,0
Teljes vastagságú recycling + aszfaltréteg	153,3 ± 54,0	15 ± 13

13. Táblázat. A burkolatfelújítási változatok egyes átlagos élettartam-jellemzői

Felújítási technológia	Fajlagos éves energiafelhasználás (MJ/m ² -év)	Fajlagos éves CO ₂ -kibocsátás (kg/m ² -év)	Fajlagos éves adalékanyag-igény (kg/m ² -év)	Fajlagos éves bitumenigény (kg/m ² -év)
Kétrétegű felületi bevonat	9,6	0,61	13,0	0,88
Vékony (max. 38 mm-es vastagságú) aszfaltréteg	10,2	0,64	13,4	0,87
Kevert felületi bevonat (microsurfacing)	10,5	0,67	14,4	0,92
Helyszíni, hideg recycling + 50 mm-es vastagságú aszfaltréteg	11,5	0,74	15,2	0,97
Teljes vastagságú recycling + aszfaltréteg	11,0	0,72	14,5	0,93
Marás + 50 mm-es vastagságú aszfaltréteg	11,3	0,72	14,3	0,91
50 mm-es vastagságú aszfaltréteg	10,3	0,71	12,9	0,88
Helyszíni, meleg recycling + 38 mm-es vastagságú aszfaltréteg	10,4	0,78	12,1	0,94

14. Táblázat. Az aszfaltfelújítás-típusok választásához döntéshozatali fa (hierarchikus struktúra)

Követelmények, R	Kritériumok, C	Mérőszámok, I
Gazdasági, R ₁	Költségek, C _{1.1} Rugalmasság, C _{1.2}	Kezdeti beruházás, I _{1.1.1} Élettartam-költség, I _{1.1.2} Érzékenység az évszakokra, I _{1.2.1}
Környezeti, R ₂	Erőforráshatékonyság, C _{2.1} Fogyasztások, C _{2.2} Károsanyag-kibocsátás, C _{2.3}	Adalékanyagigény, I _{2.1.1} Bitumenigény, I _{2.1.2} Energiafogyasztás, I _{2.2.1} CO ₂ -kibocsátás, I _{2.3.1}
Társadalmi, R ₃	Kényelem, C _{3.1} Biztonság, C _{3.2}	Torlódás, idővesztés, I _{3.1.1} Munkahelyi biztonság, I _{3.2.1}
Műszaki (funkcionális)	Mechanikai ellenállás, C _{4.1}	Bomlási ellenállás, I _{4.1.1} Deformációs ellenállás, I _{4.1.2}

15. Táblázat. Páronkénti összehasonlítási értékek a felújítási technológiák típusválasztásakor

Szint	Hasonlítandók (l. 14.táblázat)	Érték	Konzisztenciaarány (CR)
Követelmény	R ₁ vs. R ₂	0,714	0,002
	R ₁ vs. R ₃	1,032	
	R ₁ vs. R ₄	0,613	
	R ₂ vs. R ₃	1,416	
	R ₂ vs. R ₄	0,699	
	R ₃ vs. R ₄	0,573	
Kritérium	C _{1.1} vs. C _{1.2}	1,276	0,000
	C _{2.1} vs. C _{2.2}	1,595	0,001
	C _{2.1} vs. C _{2.3}	1,462	
	C _{2.2} vs. C _{2.3}	0,852	
	C _{3.1} vs. C _{3.2}	0,221	0,000
Mérőszám	I _{1.1.1} vs. I _{1.1.2}	0,470	0,000
	I _{2.1.1} vs. I _{2.1.2}	0,497	0,000
	I _{4.1.1} vs. I _{4.1.2}	0,910	0,000

4.2 A variánsok értékelése

A 17. táblázat a különböző felújítás-variánsok esetében az egyes mérőszámokra adott értékeléseket szemlélteti. A kvantitatív mérőszámokat az általuk felvehető érték-tartománynak megfelelően jellemezték, amennyiben minimális, maximális és legvalószínűbb értéküket tüntetik fel.

A kvalitatív mérőszámok esetében – hogy azok egyszerűbben és könnyebben értékelhetők lehessenek – a háromszögű fuzzy számmal leírt változókat a fokozatos, átlagos integráló módszer alkalmazásával kanonikus alakba írták át (Chou, 2003). Mintegy 5000 szimulációt

hajtottak végre annak érdekében, hogy a kvantitatív mérőszámokhoz a háromszögű eloszlású vektorokat generálhassák.

Így az r_{ij} értékelések sorához jutottak, amelyek aztán a TOPSIS-módszer (Hwang, Yoon, 1981) inputjaként használandó döntéshozatali mátrixok felépítésére szolgáltak. Az 1. ábra a TOPSIS-algoritmus egyes lépéseinek alkalmazása után az egyes variánsoknak az ideális megoldástól való viszonylagos távolságát (R_i) mutatja meg. A kétklaszteres grafikonból egyértelmű, hogy a nyolc vizsgált technológiából öt db a többi háromnál határozottan kedvezőbb értékeket mutat.

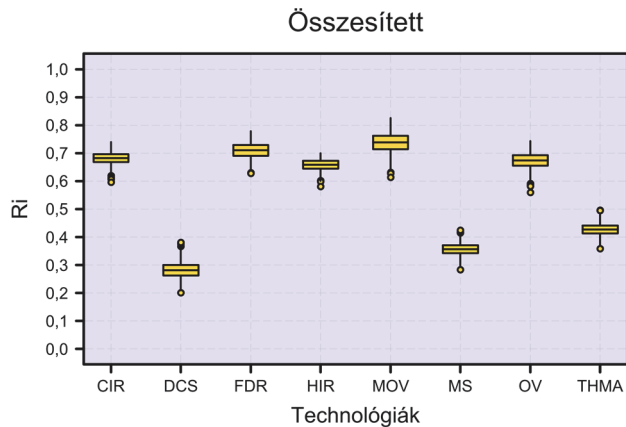
16. Táblázat. Elemsúlyok az útburkolat-felújítási technológiák kiválasztásához

Követelmények	W _R	Kritériumok	W _C	Mérőszámok	W _I
Gazdasági	0,199	Költségek	0,561	Kezdeti beruházás	0,320
				Élettartamköltség	0,680
		Rugalmasság	0,439	Érzékenység évszakra	1,000
Környezeti	0,264	Erőforrás-hatékonyság	0,432	Adalékanyagigény	0,332
				Bitumenigény	0,668
		Fogyasztás	0,265	Energiafogyasztás	1,000
		Károsanyag-kibocsátás	0,303	CO ₂ -kibocsátás	1,000
Társadalmi	0,192	Kényelem	0,181	Idővesztés & torlódás	1,000
		Biztonság	0,819	Munkahelyi biztonság	1,000
Műszaki (funkcionális)	0,345	Mechanikai ellenállás	1,000	Bomlási ellenállás	0,476
				Alakváltozási ellenállás	0,524

17. Táblázat. Elemsúlyok az útburkolat-felújítási technológiák kiválasztásához

Mérőszám	Egység	Érték	CIR	DCS	FDR	HIR	MOV	MC	OV	THMA
I1.1.1	\$/m ²	MIN	13,20	1,70	17,40	7,90	8,90	2,00	4,40	1,30
		M.L.	17,70	2,50	23,80	11,30	12,30	3,90	9,70	5,00
		MAX	22,30	3,20	30,30	14,80	15,70	5,90	15,00	8,60
I1.1.2	\$/m ² -év	MIN	1,13	1,04	1,13	1,23	1,22	1,07	1,14	1,01
		M.L.	2,01	1,88	2,01	2,08	2,06	1,98	2,08	1,95
		MAX	3,65	3,51	3,61	3,68	3,73	3,65	3,86	3,65
I1.1.3	Osztályzat	CAN	4,95	0,82	7,99	6,93	8,00	4,99	7,99	6,98
I2.1.1	kg/m ² -év	MIN	9,41	9,14	8,85	10,38	10,11	9,56	10,82	10,26
		M.L.	12,90	13,04	12,10	14,46	14,29	13,43	15,21	14,43
		MAX	19,63	21,09	18,30	23,58	22,36	20,98	24,30	22,82
I2.1.2	kg/m ² -év	MIN	0,64	0,62	0,69	0,66	0,65	0,62	0,69	0,65
		M.L.	0,88	0,88	0,94	0,93	0,91	0,87	0,97	0,92
		MAX	1,34	1,43	1,41	1,51	1,43	1,37	1,55	1,46
I2.2.1	MJ/m ² -év	MIN	4,49	4,23	4,96	4,91	4,78	4,45	5,09	4,81
		M.L.	10,28	9,61	10,43	11,00	11,33	10,16	11,53	10,52
		MAX	21,02	20,73	19,83	21,79	23,39	21,53	23,45	21,97
I2.3.1	kg/m ² -év	MIN	0,30	0,29	0,37	0,37	0,35	0,30	0,36	0,32
		M.L.	0,71	0,61	0,78	0,71	0,72	0,64	0,74	0,67
		MAX	1,68	1,50	1,78	1,65	1,76	1,56	1,74	1,61
I3.1.1	Osztályzat	CAN	6,99	7,94	6,99	7,00	6,97	8,80	7,95	7,99
I3.2.1	Osztályzat	CAN	5,92	6,99	6,00	4,90	6,99	7,95	6,99	5,99
I4.1.1	Osztályzat	CAN	8,80	2,00	8,83	5,99	7,00	1,84	5,95	3,98
I4.1.2	Osztályzat	CAN	5,92	1,87	6,95	7,99	7,94	2,94	6,98	3,99

Jelmagyarázat: CIR = helyszíni, hideg recycling; DCS = kétrétegű felületi bevonat; FDR = teljes vastagságú recycling; HIR = helyszíni, meleg recycling; MOV = marás + aszfaltréteg; MC = microsurfacing; OV = aszfaltréteg; THMA = vékonyaszfalt („szőnyegezés”); MIN = minimális; LV = legvalószínűbb; MAX = maximális; CAN = kanonikus érték



1. Ábra. A nyolc vizsgált burkolatfelújítási technológia összesített teljesítménye

Az itt kialakult sorrend: MOV > FDR > CIR > OV > HIR > THMA > MS > DCS. A 2. ábra a technológiák funkcionális, gazdasági, társadalmi és környezeti jellemzői tekintetében már jelentősebb eltéréseket mutat.

A 2. ábra szerint a szóban forgó burkolatfelújítási technológia összesített értékelését elsősorban a funkcionális (műszaki) jellemzője határozza meg. Az is figyelemre méltó, hogy az összesített értékelésben a „marás után aszfaltréteg elterítése” változat kedvezőbb gazdasági és társadalmi jellemzői következtében tudta a „teljes vastagságban végzett recycling”-ot az első helyért folyó „versenyben” megelőzni.

Ugyanakkor a kétrétegű felületi bevonásnak a társadalmi és a környezeti megítélése hiába volt kedvező, mivel a különösen gyenge mechanikai ellenállása az összesített kedvezőtlen értékelésnél döntőnek bizonyult.

5. Néhány következtetés

A DURABROADS projekt 2. munkabizottsága új, döntéstámogató modellt javasolt, és – esettanulmányként – nagy nehézforgalmú európai utak aszfaltkopóréteg-típusaihoz szóba jövő felújítási technológiák optimalálásával a gyakorlatban is kipróbált. Olyan komplex és jól működő módszertant sikerült kifejleszteni, amely az összetett problémákra vonatkozó szakértői véleményekben általánosan meglévő határozatlanságokat, bizonytalanságokat és ellentmondásokat hatékonyan tudja kezelni.

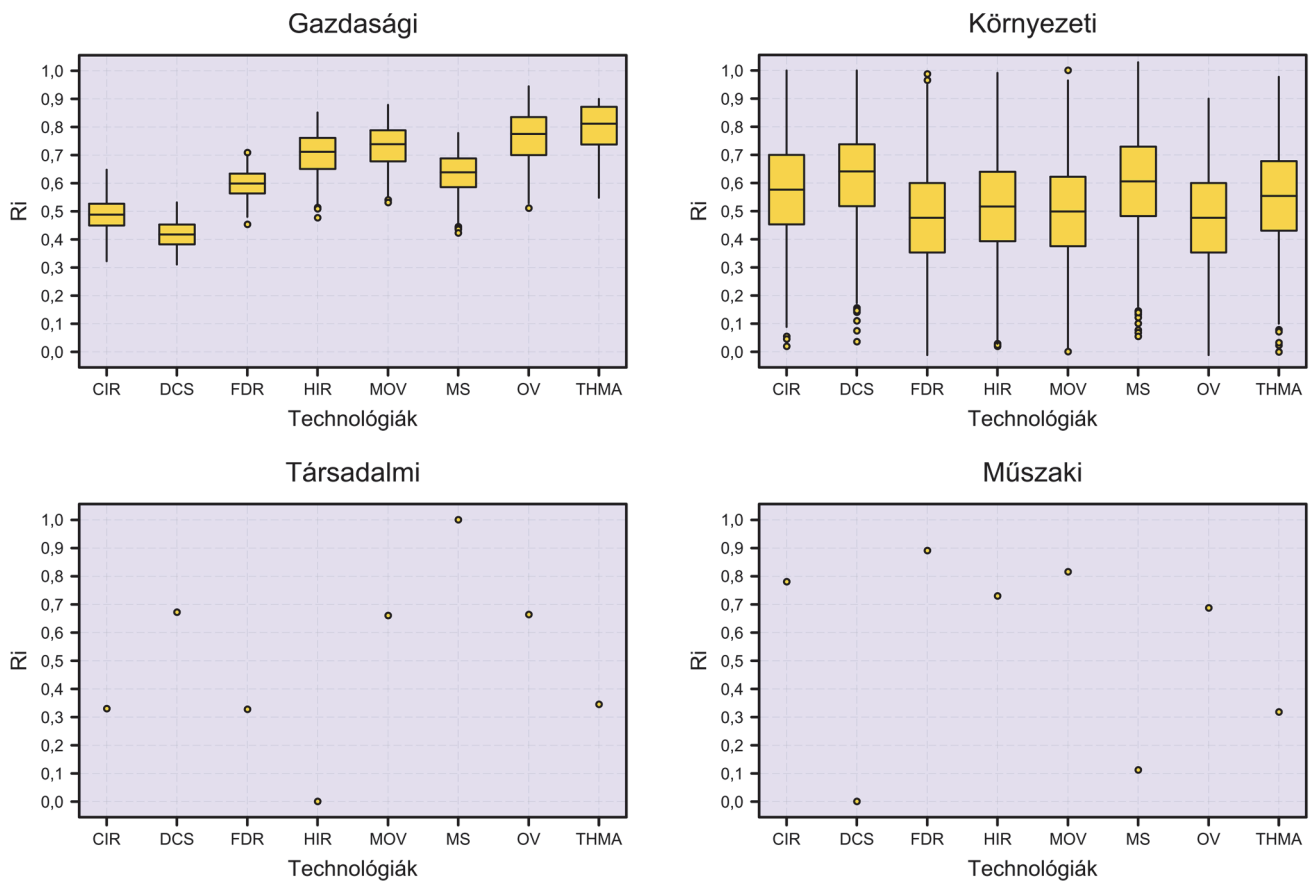
Az esettanulmány során nyert eredmények a módszer alkalmazhatóságát igazolták, a döntéshozókat támogatják abban a tekintetben, hogy a fenntarthatósági szempontokon alapulva, a legmegfelelőbb burkolatfelújításitechnológia-típust ki tudják választani. Bár az igazán hatékony útkezelés a gazdaságra, a környezetre és a társadalomra nagyon kedvező hatást gyakorol, mégis kevés olyan eljárás áll rendelkezésre, amely az útkezelési döntéseket érdemlegesen segíteni tudja. A javasolt módszertan a döntéshozatali problémát hierarchikus fává strukturálja, és ily módon az egyes változatok teljesítményéről különböző szempontok vagy tényezők szerinti következtetések levonását teszi lehetővé.

7. 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.

6. Felhasznált irodalom

- 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.
- Gáspár, L.** (2012): Lifetime engineering for roads (Keynote lecture). Proceedings of CETRA 2012 (2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure), Dubrovnik, 7-9 May, pp. 25-34.
- DURABROADS project** Deliverable D2.1 Assessment of the gaps in road-related procedures. 2014a. 99 p.
- 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. 2014b. 61 p.



2. Ábra. A felújítási technológiák összehasonlítása a négy vizsgálati szempont szerint

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. **Gáspár L., Bencze Zs.** (2016): Aszfaltburkolat-típusok optimalása. Közlekedéstudományi Szemle, 2. szám pp. 16-30.
7. **Gáspár L., Bencze Zs. Jato-Espino, D.** (2016): Döntéstámogató modell nagy nehézforgalmú utak aszfalt kopóréteg-típusának kiválasztásához. Útügyi Lapok, 7. szám. 10 p.
8. **Gáspár L., Bencze Zs.** (2016): Szakirodalmi szemle és esettanulmány nagy nehézforgalmú utak „optimális” aszfalt kopóréteg-típusának kiválasztásához. Útügyi Lapok, 8. szám 17 p.
9. **Gáspár, L.** (2008): Lifetime engineering in road asset management. CD-ROM Proceedings of 3rd

- European Pavement and Asset Management Conference, Coimbra (Portugal), 10 p.
10. **Guidance Document on Surfacing Options for Highways.** Technical Advice Group Hampshire County Council, Winchester, UK, 2010. 101 p.
11. **MathWorks.** MATLAB R2014b. Natick, Massachusetts (U.S.), 2014.
12. **Shuller, S., Schmidt, Ch., Goldbaum, J.** (2010): Life-Cycle Economic Performance for Hot Mix Asphalt Pavement Rehabilitation Strategies. International Journal of Construction Education and Research, No 6, pp. 152-162.
13. **Croteau, J.-M., Linton, P., Davidson, J. K., Houston, G.** (2015): Seal Coat Systems in Canada: performances and practice. Paper prepared for presentation at the “Soils and Materials – Investing in new materials, products and processes” session at the 2005 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Calgary, Alberta, 15 p.

14. **ADEPT/RSTA** (2011): Service Life of Surface Treatments, 25 p.
15. **Jahren, Ch.** (2011): Development of Updated Specification for Roadway Rehabilitation Techniques. Iowa State University, Final Report
16. **Cuelho, E., Mokwa, R., Akin, M.** (2006): Preventive Maintenance Treatments of Flexible Pavements: A Synthesis of Highway Practice. Report No. FHWA/MT-06-009/8117-26. Western Transportation Institute Montana State University, Bozeman, MT. 103 p.
17. **South Dakota Department of Transportation** (2010): Pavement Preservation Guidelines
18. **Johnson, A. M.** (2000): Best practices handbook on asphalt pavement maintenance. Report NM/RC-2000-04. University of Minnesota Center for Transportation Studies
19. **Abadie, J., Carpentier, J.** (1968): Generalization of the Wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints. Optimization, University of Keele, London (U.K.), pp. 37-47.
20. **Lin, H.** (2010): An application of fuzzy AHP for evaluating course website quality. Computers and Education, 54(4), pp. 877-888.
21. **Chou, C.** (2003): The canonical representation of multiplication operation on triangular fuzzy numbers. Computers and Mathematics with Applications, 45 (10-11), pp. 1601-1610.
22. **Hwang, C. L., Yoon, K.** (1981): Multiple attribute decision making: Methods and applications. New York (U.S.): Springer. 225 p.

Selection of “optimal” pavement rehabilitation techniques on heavily trafficked roads

Abstract: The DURABROADS-project partly financed by European Commission developed and tested in a case study a new decision support model for the optimization of pavement rehabilitation techniques of asphalt wearing course types on heavily trafficked European roads. The results obtained have proved the applicability of the methodology; decision makers can be supported in their selection of the most suitable pavement rehabilitation techniques based on complex sustainability aspects. The suggested methodology can transform the decision-making problem into a hierarchical tree in order to evaluate the performances of various alternatives from the view-point of given aspects.

Keywords: heavily trafficked European roads, asphalt wearing course types, project financed by EC 7th RTD framework programme, decision support model, mathematical-statistical procedures

Dr. habil. Gáspár László

Okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, az MTA doktora. A Közlekedéstudományi Intézet kutató professzora, a Széchenyi István Egyetem emeritus professzora.

Bencze Zsolt

Okl. építőmérnök, a Széchenyi István Egyetem Multidiszciplináris Műszaki Doktori Iskola PhD hallgatója és 2005 óta a Közlekedéstudományi Intézet munkatársa.