

TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNY



Aktualitások az útépitésben hasznosítható másodlagos nyersanyagok területén

Udvardi Bella¹, Géber Róbert¹, Kocserha István¹

¹ Kerámia- és Polimermérnöki Intézet

e-mail: ubella07@gmail.com; robert.geber@uni-miskolc.hu; istvan.kocserha@uni-miskolc.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.04

Kivonat Az útépitési technológiában a legelterjedtebben használt anyag az aszfaltbeton, amelynek előállításához nélkülözhetetlen alapanyagok a primer kőzetek. A folyamatos építőipari célú felhasználásnak köszönhetően a természetes ásványi anyagok mennyisége világszerte kimerülőben van. Magyarország természetföldrajzi adottságaiból fakadóan jó minőségű ásványvagyonnal rendelkezik, azonban néhány évtized múlva az ásványkincsek kitermelése gondot okozhat, esetleg a készletek kimerüléséhez vezethet. Mindezen okok miatt megnőtt az igény olyan potenciális anyagok keresésére, amelyek segítségével az ásványi nyersanyagok részben vagy teljes egészében helyettesíthetők. Ilyen anyagok lehetnek a különböző ipari folyamatok során keletkező másodlagos nyersanyagok. Jelen cikk célja az aktuális trendek, kutatási eredmények összefoglaló bemutatása.

Kulcsszavak másodlagos nyersanyagok, meddő, pernye, salak, építési és bontási hulladék

Current issues in recoverability of secondary raw materials used for road construction

Abstract Asphalt concretes, essentially produced from primary rocks, are the most widespread used materials in road construction. As a result of continuous use for construction purposes, the quantity of natural raw minerals are worldwide exhausting. Hungary, due to its geographical conditions, is rich in these good quality raw materials, however the extraction of minerals may cause the exhausting of the resources after a few decades. Therefore, the demand for searching potential materials to substitute mineral resources was grown. Secondary raw materials from different industrial processes may be a kind of these materials. The aim of this study is to present a summary of current research trends and results.

Keywords secondary raw materials, tailings, fly ash, slag, construction and demolition

Udvardi Bella

Miskolci Egyetem, Kerámia- és Polimermérnöki Intézet, PhD-hallgató. Okleveles anyagmérnök. Kutatási terület: építőanyagok

Dr. Géber Róbert

Miskolci Egyetem, Kerámia- és Polimermérnöki Intézet, egyetemi adjunktus. Okleveles anyagmérnök. Kutatási terület: építőanyagok, reológia

Dr. Kocserha István

Miskolci Egyetem, Kerámia- és Polimermérnöki Intézet, intézetigazgató, egyetemi docens. Okleveles gépészmérnök. Kutatási terület: hagyományos- és műszaki kerámiák, építőanyagok

1. Bevezetés

A fogyasztói társadalom és a szükségletek folyamatos kielégítése következtében nagy mennyiségű hulladék termelődik a gazdaság különböző ágazataiban. Az ipari gyártási folyamatok során keletkező maradványok elhelyezése jellemzően hulladéklerakóban történik, azonban a deponálás – ezen anyagok nagy mennyiségben történő folyamatos termelődése miatt – nem jelent végleges megoldást, valamint gazdasági és környezetvédelmi szempontból sem előnyös.

Az útépitési technológia megfelelő potenciállal rendelkezik ahhoz, hogy az ipari különböző melléktermékek hasznosíthatók legyenek. Az utóbbi években a fenntarthatóság fontos szerepet tölt be a társadalmi életben, ezáltal az útpályaszerkezetek építése során is a környezetbarát gyártási folyamatokra törekednek. Sok esetben központi szerepet tulajdonítanak a magas újrahasznosítási aránynak, ezzel ügyelve a karbon lábnyom minimalizálására. Ennek következtében számos kutatás [1-4] foglalkozik különböző melléktermékek útépitésben történő újrahasznosíthatóságával. Magyar szakemberek közreműködésével a 2000-es évek első felében egy hiánypótló mű is elkészült az útépitésben hasznosítható másodlagos nyersanyagokkal kapcsolatosan [5]. Az azóta eltelt 14 évben a technológiai fejlődésnek köszönhetően új kutatási eredmények születtek a különböző másodlagos nyersanyagok, illetve hulladékok útépitésben történő alkalmazásának témakörében. Éppen ezért a téma aktualitása miatt a Szerzők célszerűnek látják összefoglalni, ismertetni a legújabb kutatási eredményeket, ismereteket.

Közismert, hogy az aszfaltkeverék két fő összetevője a kőváz és az a kötőanyag, amely biztosítja a közetszemcsék teljes egészében történő bevonását, illetve a felületükhöz történő tapadást. Az aszfaltkeverékek készítéséhez szükséges primer közetek helyettesítése lehetséges különböző újrahasznosított anyagokkal. Ugyanakkor további kutatások kérdése az, hogy ezeket az alternatív anyagokat hogyan és milyen arányban lehetne kombinálni

egymással úgy, hogy képesek legyenek biztosítani az elvárt minőségi követelményeket.

Ahhoz, hogy a keletkezett hulladékok felhasználhatók legyenek útépitési területen, a belőlük készített aszfaltoknak hasonló, esetleg jobb minőségi tulajdonságokkal kell bírniuk a hagyományos utaknál. Néhány fontos elvárás, amelynek eleget kellene tenniük:

- elegendő mennyiségű anyag rendelkezésre állása;
- megfelelő hulladékkezelési és hasznosítási eljárás létrehozása;
- hasonló vagy jobb teljesítményű pályaszerkezet építése a hagyományos utaknál.

Fontos megjegyezni, hogy azon ipari melléktermékek hasznosítása gazdaságos, amely nem vagy alig igényel előkészítési eljárást. Mindemellett az újrahasznosítani kívánt anyagoknak szabványos minőségi követelményeknek és környezetvédelmi előírásoknak is eleget kell tenniük. A következő fejezetekben bemutatásra kerülő tudományos eredmények megerősítik, hogy a számos hulladék anyag alkalmazása jó, illetve sok esetben még jobb eredményeket produkál a természetes ásványi anyagoknál.

2. Másodlagos nyersanyagok az útépitésben

Ebben a fejezetben a másodlagos anyagok négy nagy csoportját mutatjuk be (*bányászati meddő, erőműi pernye, kohászati salak, építési-és bontási anyagok*). Ezek közül a leginkább ismert az erőműi pernye, amellyel a szakirodalom már széles körben foglalkozott. Az 1. táblázat definíció szerint ismerteti az egyes típusokat.

A 2. táblázat a rendelkezésre álló szakirodalmi források ismereteit összegyűjtve mutatja be a különböző másodlagos nyersanyagok útépitési célra történő alkalmazásainak aktuális eredményeit. Megfigyelhető, hogy az erőműi pernyét az útépitő ipar számos területén alkalmazták már. Ezen kívül elterjedten alkalmazott a melléktermékként keletkező kohászati salak is (3. táblázat).

1. táblázat Másodlagos nyersanyagok fajtái definíció szerint [5-9]

Bányászati meddők	Erőműi pernye	Kohászati salakok	Építési és bontási hulladékok
Az ásványi nyersanyagok bányászata és előkészítése során nagy mennyiségű meddő, illetve maradék anyag keletkezik, melyek nem vagy csak minimális mennyiségben tartalmazzák az elsődleges termelési célként megjelölt anyagot.	Az erőműi pernye a szén elégetésekor keletkező heterogén, por-szerű, túlnyomó részt amorf (üveges) maradék anyag.	A kohászati salakok (ipari közet) a fém olvasztása során az érc meddő alkotórészeinek, illetve a fémolvadékból eltávolítandó nemkívánatos olyan vegyületek, melyek folyékony állapotban keletkeznek, majd lehűlve megdermednek.	Az építési hulladék körébe tartozik az épületek és az építmények létesítése, felújítása, illetve bontása folyamán keletkező szilárd hulladékok összessége. Ide sorolják a kitermelt földet, az épületek és építmények bontási törmelékét, ide tartozik az útbontási törmelék, valamint az építési munkahelyi hulladék (fa, papír, műanyagok, fémek stb.) is.

2. táblázat. Útépitésben újrahasznosított anyagok

Újrahasznosított anyagfajta		Földműalap			Földmű		Útpályaszerkezeti réteg			
		Tömörített altalaj	Földmű- alapozási réteg	Szivárgó réteg	Töltéstest	Földmű felsőrész	Burkolat- alap réteg	Aszfalt alapréteg	Aszfalt kötőréteg	Aszfalt kopóréteg
Bányászati meddő	Rézbányászati meddő	–	–	–	–	–	[10]	[10]	–	–
	Magnetit	–	–	–	–	–	[11]	–	–	[12]
	Olajfúrásból származó tisztí- tott meddő	–	–	–	–	–	–	–	[13]	–
Erőműi pernye		[14]	[14, 15]	[16]	[14, 17, 18]	–	[19–23]	–	[24, 25]	–
Kohászati salakok	Elektroacélműi salak	–	–	–	–	–	[10, 26]	[10, 33]	–	[27]
	Alumínium salak	–	–	–	[28]	–	–	–	–	[29]
Építési, bontási hulladék	Téglaőrlemény	[30]	[15]	–	–	–	–	[31]	–	[32]
	Bontott beton	–	–	–	–	–	–	[33]	[34]	–
	Visszanyert martszifalt	–	–	–	–	–	–	–	[35]	[36, 37]
	Üveg	[38]	–	–	–	–	–	[39]	–	[40]

2.1. Erőműi pernye alkalmazása útépitési területen

A pernye puccolános tulajdonságokkal rendelkező, általában a cementnél finomabb szemcséket tartalmazó anyag. A pernyét vízzel keverve önmagában nem, viszont a kalcium-hidroxid jelenlétében hidraulikusan megszilárdul, azaz megköt. A pernyék puccolános tulajdonságait (aktivitását) a kémiai és fizikai sajátosságai határozzák meg, amelyek a következők:

- a pernyeszemcsék morfológiája,
- fajlagos felülete,
- szemcseméret-eloszlása, illetve
- a fázisösszetétele.

A puccolános aktivitása szerint (reakcióképesség szempontjából) a pernyében lévő SiO_2 és Al_2O_3 mennyisége a mérvadó, de ez nem azonos a teljes SiO_2 - Al_2O_3 tartalommal. A pernye puccolános aktivitása nő, ha minél több reakcióképes SiO_2 - Al_2O_3 tartalommal rendelkezik az adott anyag. Morfológiai szempontból nagyrészt gömbölyű szemcsékkel rendelkezik. A szakirodalom alapján megkülönböztetnek savanyú (F-típusú) és bázikus pernyét (C-típusú) [1, 25]. A savanyú pernye 45–60% SiO_2 -ot, míg kevesebb, mint 15% CaO -ot tartalmaz, melyből az aktív mésztartalom nem haladhatja meg a 10%-ot. A bázikus pernyék mindössze 20–25% SiO_2 -tartalommal bírnak, emellett 30–40% CaO -dal rendelkeznek, melyből az aktív mésztartalom több lehet 10%-nál [8, 41, 42].

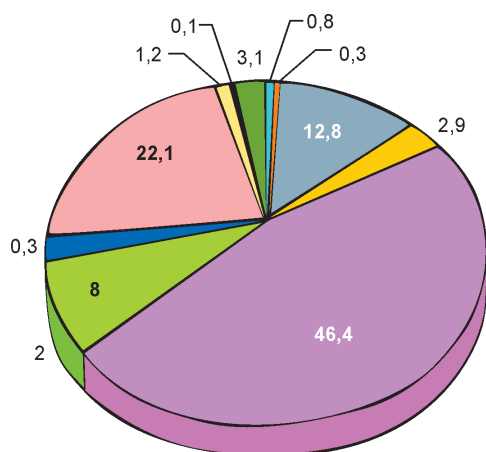
Az erőműi pernyének számos potenciális felhasználási területei léteznek. Alkalmazásának lehetséges területeit négy fő kategóriába sorolják:

- építőanyagok (*cement, beton, kerámia, üveg*),
- geotechnikai alkalmazások (*útburkolatok, töltések*),
- „mezőgazdasági” terület (*talajstabilizáció*),
- egyéb (*szorbens, iszapkezelés*) [30].

Ahogy az *1. ábra* is szemlélteti, a pernyét útépitési anyagként már számos célra alkalmazták. Megfigyelhető, hogy a pernye alkalmazási területeinek több, mint 50%-át az útépitő ipar fedi le. Szakirodalmi adatok szerint a pernyét már alkalmazták az útépitőiparban töltésstabilizáló anyagként, alapréteg alapanyagaként, töltőanyagként, illetve bitumenes burkolatok anyagaként egyaránt. Az útpályaszerkezetek alkalmazásánál az esőzések során a pernye belsejébe a víz nem tud behatolni, ezáltal a nehéz fémek kioldódása nem okoz problémát. A pernye útépitési anyagként történő alkalmazása esetében az útburkolatok költségeit jelentős mértékben lehetne csökkenteni [44]. *Mohammadinia* munkatársaival [15] a pernyét különböző arányban használták zúzott téglával és visszanyert aszfalttal együtt újrahasznosított aszfaltburkolat stabilizálásához alsó teherhordó burkolat alapjaként. A próbatesteken nyomószilárdságot és rugalmassági modulust határoztak meg (*7 napos korban*). Az eredmények alapján a pernyével stabilizált zúzott téglából és visszanyert aszfaltból

3. táblázat. Másodlagos anyagok alkalmazása útépitési anyagként

Szerzők	Felhasznált anyag	Szemcseméret	Elért eredmény
Wu et al.	nikkelsalak	$d < 80 \mu\text{m}$	3 napos korban: $R_{m,\min} = 6,9 \text{ MPa}$, $R_{m,\max} = 21,9 \text{ MPa}$; 28 napos korban: $R_{m,\min} = 14,5 \text{ MPa}$ $R_{m,\max} = 52,4 \text{ MPa}$
Mohammadinia et al.	pernye	$d_{50} < 30 \mu\text{m}$	A szilárdsági tulajdonságok legfeljebb 15 m/m%-ban hozzáadott pernyével növelhetők (>15 m/m% szilárdságcsökkenést eredményez)
	zúzott téglá	$d_{50} < 600 \mu\text{m}$	
	visszanyert aszfalt	$d_{50} < 400 \mu\text{m}$	
Sobolev et al.	pernye (F típusú)	$d < 74 \mu\text{m}$	Keverék teljesítménye ↑. A pernyeszemcsék a dinamikus terhelések hatására kialakuló repedéseket elzárták.
Xu et al.	erőműi pernye	$d = 0,76\text{--}61,61 \mu\text{m}$	A pernyével készített aszfaltkeverék Marshall-stabilitása és nyomvályúsodással szembeni ellenállása ↓
	mészkeőliszt	$d = 4,71\text{--}179,7 \mu\text{m}$	
Likitlersuang et al.	cement	$d_{50} < 11 \mu\text{m}$	A keverék merevségi modulusa ↑
	lignittüzelésből származó pernye (C típusú)	$d_{50} < 19 \mu\text{m}$	
Gómez-Meijide et al.	építési és bontási hulladék	12/24 mm	A keveréknek magasabb a hézagterfoga. Bitumenigény ↑
		6/12 mm	
Arabani et al.	dácit	$d = 0,074\text{--}19 \text{ mm}$	Mechanikai tulajdonságok ↓, Marshall-stabilitás ↑
	acélgyártási salak		
	visszanyert beton (Recycled concrete aggregate, RCA)		
Tao et al.	acélgyártási salak	$d < 75 \mu\text{m}$	A salak, mint aszfalt töltőanyag növeli a habarcs nyírási modulus értékét. Kombinálva a salakot és mészkeőlisztet minimálisra csökkenthető az aszfalt alacsony hőmérsékletű repedési ellenállása.
Pesetto et al.	acélgyártási salak (két különböző összetétel)	0/5, 5/10, 10/15 mm	Az acélgyártási salakkal készült keverék rendkívül pozitív hatással rendelkezik, mind a merevség és a fázastási vizsgálat tekintetében
	homok		
	mészkeőliszt		


1. ábra. A pernye alkalmazásának aránya [43]

lárdságuk és tartósságuk alapján életképesek útburkolati anyagként. A szilárdsági tulajdonságok legfeljebb 15 m/m%-ban hozzáadott pernyével növelhetők (>15 m/m% szilárdsági romlást eredményez).

Sobolev és munkatársai [45] savanyú és bázikus pernye hatását vizsgálták a bitumenes anyagok reológiai tulajdonságaira. Eredményeik alapján megállapították, hogy a bitumenes anyagban célszerű alkalmazni a pernyét, ugyanis javítja a keverék teljesítményét. A szerzők mikroszerkezeti vizsgálattal kimutatták, hogy a bitumenes mátrixban egyenletesen eloszlott pernyeszemcsék a dinamikus terhelések hatására kialakuló repedéseket elzárták.

Xu és munkatársai [46] szén-erőműből származó pernye aszfalthabarcs keverékekben történő vizsgálatával foglalkoztak. Az eredmények alapján a pernye kisebb sűrűséggel rendelkezik a mészkeőlisztnél (referencia

anyag). A szénerőműi hulladék lúgosabb kémhatású, valamint finomabb szemeloszlással bír. A pernyét tartalmazó keverék alacsonyabb Marshall-stabilitást és nyomvályúsodással szembeni ellenállást mutat. Gazdasági szempontból kivitelezhető a szénerőműi hulladék alkalmazása aszfaltkeverékben.

Likitlersuang és kollégái [23] cement és lignit tüzelelésből származó (C típusú) pernye felhasználásával készítettek aszfaltbeton keverékeket, majd a keverék teljesítményének laboratóriumi vizsgálatával foglalkoztak. Eredményeik alapján megállapították, hogy a keverékek merevségi modulusa nőtt a cement és pernye töltőanyagként történő hasznosításával.

Churchill és munkatársai [19] a közúti építés során felhasznált természeti erőforrások csökkentésének érdekében széntüzelelésből származó pernye aszfaltbeton töltőanyagának helyettesítésével foglalkoztak. Kutatásaik során az aszfaltbeton próbatetek mechanikai tulajdonságait vizsgálták. Az eredményeik azt mutatták, hogy a töltőanyag frakció széntüzelelésből származó pernyével történő részleges helyettesítése mérsékelten káros hatást gyakorolt a próbatetek szilárdságára. Ezzel szemben számos pernye/mész keverék eleget tett a minimális szilárdsági követelményeknek.

Mistry és társa [20] kutatómunkájukban azt vizsgálták, hogy az aszfaltkeverékben felhasznált pernye milyen hatással van a mészhidrát töltőanyag helyettesítésére. A kísérleti eredményeik szerint a mészhidrát pernyére történő cseréje nem csak a szabványban foglalt előírásoknak tesz eleget, hanem jobb szilárdságot biztosít a hagyományos töltőanyaghoz képest.

További kutatások [21] során szilánnal kezelt pernyét vizsgáltak, valamint azok felhasználásával készítettek aszfaltkeverékeket, amelyeken a nedveség hatására bekövetkező tönkremeneteli jelenségeket tanulmányozták. Az eredményekből megállapították, hogy a modifikált pernye javította a vízérzékenységet, növelte a húzószilárdságot, a merevségi modulusot, a fáradási ellenállást és a maradó alakváltozást is.

Ali és munkatársai [22] széntüzelelésből származó pernyét használtak töltőanyagként aszfaltbeton keverékben. A mérési eredmények alapján megállapították, hogy a pernye alkalmazása célszerű, mivel javítja az aszfaltbeton szilárdsági tulajdonságait.

2.2. Bányászati meddő alkalmazása útépitési területen

Oluwasola és társai [10] elektroacél-gyártási salakot és rézbányászati meddőt alkalmaztak hagyományos ásványi anyagok helyett autópályák anya-

gáknak. Az általuk készített keverékeken Marshall-stabilitást, vízérzékenységet mértek, illetve a keverék laboratóriumi értékeléséhez meghatározták a reziliens modulust, majd dinamikus kúszási vizsgálatot is végrehajtottak. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottak, hogy javul az aszfaltkeverék teljesítménye, ha a gránitot, mint természetes adalékanyagot rézbányászati meddővel és salakkal helyettesítik. Az eredmények kiértékelését követően megállapították, hogy a bányászati melléktermék, illetve a kohászati hulladék anyag adalékanyagként alkalmazhatók az útépitésben.

Giustozzi és munkatársai [11] mészkőliszt helyett két különböző helyről származó magnetit ásványi anyagot vizsgáltak töltőanyagként aszfaltkeverékekben. A magnetit olyan ásványi anyag, amely számos magmás kőzetben, valamint folyami és tengeri környezetben is nagy mennyiségben megtalálható. Kísérleteik során a magnetit és a mészkőlisztet bitumenhez adagolták. Megvizsgálták a keverék reológiai tulajdonságainak hatását a magnetit, mint potenciális töltőanyag aszfaltkeverékben történő alkalmazási lehetőségeire. Továbbá szemcseméret-eloszlással, morfológiai elemzéssel (SEM, Cryo-SEM), és energiadiszperzív röntgenspektroszkópiával jellemezték a keveréket. Elért eredményeik alapján megállapították, hogy a magnetit alapú ferromágneses töltőanyag (amely számos országban nagy mennyiségében áll rendelkezésre) újrahasonosításának megfelelő módja az anyag aszfaltkeverékbe történő felhasználása. A hőmérséklet növelésével a keverék merevsége és rugalmas viselkedése javult, ezáltal potenciálisan növekszik a burkolat állandó deformációval szembeni ellenállása.

Wang és társai [12] magnetit meddőt használtak mészkőliszt helyettesítő adalékanyagként. A vizsgálati eredményeik alapján megállapították, hogy a magnetit meddő nem tartalmaz nehézfémeket és nincs jele a toxikus szennyezés veszélyeinek sem. A mészhidrát a magnetittel javítja az aszfalt adalékanyag tapadását és az aszfaltkeverékek vízérzékenységét. Eredményeik alapján kijelenthető, hogy a magnetit meddőt tartalmazó aszfaltkeverékek kiváló tulajdonságokkal rendelkeznek, ezáltal a természetes adalékanyagok aszfaltban történő helyettesítésére alkalmasak.

Dhir és munkatársai [13] olajfűrészből származó, tisztított meddőt vizsgáltak, melyet aszfalt töltőanyagként kívántak hasznosítani. Az anyagok geometriai, fizikai és kémiai tulajdonságainak vizsgálata mellett általános aszfalttechnológiai tesztek is elvégeztek. Kutatásaik során referenciaanyagként mészkőlisztet használtak. Az eredmények kiértékelését követően megállapították, hogy az olajfűrészből származó meddő anyag egyik lehetséges felhasználási területe lehet az útépités.

2.3. Kohászati salakok alkalmazása útépitési területen

A kohászati salakok elhelyezése világszerte növekvő problémát jelent. A World Steel Association 2016-os adatai alapján Kína (49,5%) és Európa (10,2%) áll a nyersacél termelés élén [2].

Az utóbbi évtizedben Magyarországon is nagy mennyiségben megnövekedett az alumínium ötvözetek felhasználása, melynek következtében jelentős mennyiségű alumínium öntészeti salak keletkezik. A 3. táblázatban megfigyelhető Magyarország alumíniumöntvény termelésének alakulása 2007 és 2014 közötti időszakban. A táblázat adatai szerint 2010-től folyamatosan nőtt az alumíniumtermékek előállítás.

Irodalmi adatok [48] támasztják alá azt a tényt, hogy a kohászati folyamatokból nyert salakok kiváló eredményeket mutatnak az aszfaltkeverékekben felhasznált szerepük alapján. A kohósalak javítja az útburkolat járművek okozta deformációjával szembeni ellenállását és kifáradását. A salakok alkalmazásával javíthatók a járművek és az útburkolatok közötti súrlódási tulajdonságok (kopás), valamint az útburkolati hibák (pl. nyomvályósodás, repedés) kialakulása is csökkenthető.

Wu és társai [49] kutatómunkájukban nikkelsalakot használtak útépitési nyersanyagként portlandcement előállításához. A klinkerásványok és a hidratációs termékek morfológiáját metallográfiai és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgálták. Az eredményeik azt mutatták, hogy a nikkelsalak hozzáadásával csökkent a klinker CaO-tartalma és javult a nyersliszt égethetősége. Emellett a nikkelsalak növelte a cementpép hidratációs fokát és hajlítószilárdságát. A szerzők megállapították, hogy a nikkelsalak alkalmas cement előállításra. A nyomószilárdsági eredmények 3 napos korban 6,9 MPa – 21,9 MPa, míg 28 napos korban 14,5 MPa – 52,4 MPa között változott.

Pasetto és társa [50] aszfaltbeton keverékeken végeztek laboratóriumi vizsgálatokat, melyeket három különböző kötőanyaggal és négyféle adalékanyaggal készítettek el. Munkájuk során kétféle összetétellel rendelkező acélgyártási salakot, homokot és mészkölsztet használtak fel. Kísérleti eredményeik alapján megállapították, hogy a fizi-

kai és mechanikai jellemzők szerint az acélgyártási salakok megegyeznek a közlekedési infrastruktúrában leggyakrabban használt természetes kőanyagok jellemzőivel. A salakkal készült keverék rendkívül pozitív hatással bír, mind a merevség, mind a fásztási vizsgálatok tekintetében.

Tao és társai [51] szintén acélgyártási salakot használtak aszfaltkeverékek töltőanyagaként, melyek reológiai tulajdonságainak hatását vizsgálták. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálataik eredménye szerint az acélgyártási salak őrlemény felületén számos pórus található (0,5–5 µm), míg a mészkölszt felülete sima. Oxidos összetételvizsgálattal kimutatták, hogy mindkét anyag fő alkotója a CaO és a SiO₂, de bizonyos mennyiségben tartalmaznak Fe₂O₃ és egyéb más oxidokat is. A salak, mint aszfalt töltőanyag növeli a habarcs nyírási modulusának értékét. Kombinálva a salakot és mészkölsztet minimálisra csökkenthető az aszfalt alacsony hőmérsékletű repedési ellenállása.

Mailar és társai [52] kutatási eredményei azt igazolták, hogy a megfelelő mennyiségben újrahasznosított alumínium salak a beton készítéséhez szükséges cement részleges cseréjére, kiváltására alkalmas. A cement salakkal történő megfelelő arányú cseréje javítja a beton pórusszerkezetét, szilárdságát, a sókkal szembeni ellenállóképességét, illetve szulfátállóságát.

Li és munkatársai [53] kísérleteik során finomszemcsés acélgyártási salak hatását vizsgálták aszfalthabarcsokon. Kontrollvizsgálatokat is elvégeztek mészkölszttel készített keverékeken. Megfigyelték, hogy alacsony hőmérsékleten az acélgyártási salak felhasználásával készített aszfalthabarcsok – magasabb CaO-tartalmuk és nagyobb fajlagos felületük következtében – több aszfaltént képesek lekötni, ezáltal nagyobb repedéssel szembeni ellenállóképességet biztosítanak az aszfalthabarcsnak alacsony hőmérsékleten. Emellett a finomabb salakszemcsék növelik a szakadással szembeni ellenállást is. Ennek okát a húzás során kialakuló feszültségkoncentrációk különbözőségében látták.

Masoudi és társai [54] kutatómunkájuk során az elektroacélműi salak hasznosíthatóságát vizsgálták a meleg aszfaltkeverékek hosszú távú teljesítményére. A természetes ásványi anyagokat a salak-

3. táblázat. Magyarország alumíniumöntvény termelése 2007 és 2014 között [47]

Megnevezés	Öntvénytermelés (tonna)			
	2007	2010	2011	2014
Alumínium kokillaöntvény	53 919	46 323	43 721	49 604
Alumínium nyomásos öntvény	43 011	42 898	55 448	51 658
Alumínium homoköntvény	343	202	243	161
Összes alumíniumöntvény	97 276	88 921	99 412	101 423

kal, mint másodlagos nyersanyaggal kívánták kiváltani. Kutatómunkájuk eredményeként megállapították, hogy az acélgyártási salakot tartalmazó keverék kevésbé öregedett, mint a referenciaanyagot (mészkeverék) tartalmazó keverék.

2.4 Építési hulladékok alkalmazása útépitési területen

Az építési-bontási hulladékok (Construction and Demolition Waste, CDW) újrahasznosítását három szempont szerint határozzák meg:

- műszaki minőség,
- környezettel való összeegyeztethetőség, illetve
- az elsődleges ásványi anyagokkal való versenyképesség.

Az építési másodlagos anyagok felhasználása történhet közvetlenül, valamint közvetetten. A közvetlen újrahasznosítást elsősorban a kitermelt talajok esetén alkalmazzák, míg a közvetett hasznosítást valamilyen előkészítési folyamat előzi meg.

Számos kutatásban foglalkoztak már a tégláörleménnyel, mint újrahasznosított aszfalt töltőanyaggal [32, 54-57]. *Chen és munkatársai* [32] összehasonlító elemzéseket végeztek, amelyben a primer kőzetként alkalmazott mészkőlisztet és az alternatív anyagként használt tégláörleményt vizsgálták. A töltőanyagokon elvégzett anyagszerkezeti vizsgálatokat követően aszfaltkeverékeket készítettek. Kísérleti eredményeik alapján arra jutottak, hogy a tégláörleménnyel készített aszfaltkeverékek javítják a burkolat nyomvályúsodással szembeni ellenállását, a vízáteresztőképességet, valamint a fáradási tulajdonságokat.

Gómez-Meijide és kollégái [58] építési és bontási hulladékból készítettek hideg aszfaltkeveréket, amelyen merevségi tulajdonságokat vizsgáltak. Kutatómunkájuk során azt tapasztalták, hogy az aszfaltkeverék magasabb szabad hézaggal rendelkezett, ami előnyös lehet porózus aszfalt készítése szempontjából. Ugyanakkor az építési és bontási hulladékból készült keverék több bitument igényelt a keverékkészítés során. A szerzők vizsgálataik alapján megállapították, hogy az építési és bontási hulladék anyagból készített hideg aszfaltkeverék jól alkalmazható gyengébb forgalmú utakhoz.

Több tanulmány is foglalkozik újrahasznosított betonörlemény útépitési anyagként történő alkalmazásával [31, 59]. Ezek a kutatások jellemzően az újrahasznosított betonörlemény aszfaltkeverékben történő alkalmazását vizsgálták. A vizsgálati eredmények szerint a referenciaanyaghoz (mészkeverékhez) képest javulást figyeltek meg az aszfaltkeverékek vízáteresztőképessége és a fáradási ellenállása során.

Arabani és munkatársai [33] tanulmányának célja a visszanyert beton (Recycled concrete aggregate, RCA) és az acélgyártási salak adalékanyagként történő hatásainak vizsgálata melegaszfaltban. Az aszfaltkeverékben dácit kőzetet RCA-ra cserélve nagymértékben romlottak a keverék mechanikai tulajdonságai. Az RCA finom adalékanyagként, illetve az acélgyártási salak finom, vagy durva adalékként történő alkalmazása esetén nőtt a keverék Marshall-stabilitása. Az optimális aszfaltbeton keverékük töltőanyagként dácitot, finom adalékként RCA-t és durva adalékanyagként acélgyártási salakot tartalmazott.

3. Összegzés

Jelen cikk a másodlagos nyersanyagok, illetve más típusú hulladékok útépitési anyagként történő hasznosítási lehetőségeivel foglalkozó irodalmi ismereteket kívánta bemutatni, ismertette a legújabb kutatási eredményeket. Nem szabad elmenni amellett a tény mellett, hogy a különböző gyártási technológiák eredményeként keletkező hulladékok is az emberi igények kielégítésének hatására folyamatosan termelődnek, mennyiségük rohamosan nő. A hulladéklerakókban történő tárolásuk nem jelent végleges megoldást, hiszen ez sem gazdaságilag, sem pedig környezetvédelmi szempontból nem előnyös. Emiatt újrahasznosításuk nélkülözhetetlen, melynek egyik potenciális területe az útépités.

Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatómunka az Európai Szociális alap és Magyarország Kormányának társfinanszírozásával valósul meg a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című EFOP-3.6.2-16-2017-00010 azonosító számú projekt keretén belül.

Felhasznált irodalom

- [1] Anupam K, Kumar P, Ransinchung G. Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction. *Procedia-Social and Behavioral Science*. 2013 December; 104:264-273. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.119>
- [2] Guo J, Bao Y, Wang M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*. 2018 August, 79: 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.045>
- [3] Wang G) 14 - Case studies on slag utilization. *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*. 2016; 339-370. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00014-8>
- [4] Wang G. 8 - Unbound slag aggregate use in construction. *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure*

- Construction. 2016; 155-184.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00008-2>
- [5] Bornemissza T, Bóhm J, Csőke B, Erős Gy, Gáspár L, Horváth A, Karoliny M, Lengyel A, Molnár J, Ruppert L, Vámos Gy, Záray Gy. Másodlagos nyersanyagok az útépitésben. IHU Kht. Kiadó, 2005; 255.
- [6] Építési és bontási hulladék.
http://www.kvvm.hu/szakmai/hulladeggzald/hulladeggzaldokodas/hulladektipusok_epit_bont.htm
 Megtekintés ideje: 2018. 11. 20.
- [7] Csőke B. Ipari hulladékok előkészítése és hasznosítása.
<http://hulladekonline.hu/files/178/>
- [8] Mucsi G: Erőműi pernye komplex hasznosítása.
[http://kritikuselemek.uni-miskolc.hu/files/files/monografia_6\(1\).pdf](http://kritikuselemek.uni-miskolc.hu/files/files/monografia_6(1).pdf)
 Megtekintés ideje: 2019. 01. 07.
- [9] http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm
 Megtekintés ideje: 2018. 11. 20.
- [10] Oluwasola E, Hainin M, Aziz MMR. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*. 2015 March; 2:47-55.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
- [11] Giustozzi F, Mansour K, Patti F, et al. Shear rheology and microstructure of mining material-bitumen composites as filler replacement in asphalt mastics. *Construction and Building Materials*. 2018 May; 171:726-735.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.190>
- [12] Wang Z, Xu C, Wang S, et al. Utilization of magnetite tailings as aggregates in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2016 July; 114:392-399.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.139>
- [13] Dhir R, Csetenyi L, Dyer T, et al. Cleaned oil-drill cuttings for use as filler in bituminous mixtures. *Construction and Building Materials*. 2010, March; 24:322-325.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.022>
- [14] Ahmed I, Lovell CW. *Use of Waste Materials Used in Highway Construction* 1st Edition. Imprint William Andrew, 1993; 125. eBook ISBN9780815519461
- [15] Mohammadinia A. (2017) Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications. *Journal of Hazardous Material*. 2017 January; 321(5):547-556.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.039>
- [16] Dwivedi A, Jain M. Fly ash-waste management and overview: A review. *Recent Research in Science and Technology*. 2014 August; 6:30-35.
- [17] Miloš Š, Nebojša R, Nikolay V. Construction of Road Embankment with Waste Materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2015 January; 725-726:596-601.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.596>
- [18] <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fach06.cfm>
 Megtekintés ideje: 2019. 01. 31.
- [19] Churchill EV, Amirghanian SN. Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1999 November; 11(1s.4):295-301.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:4\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:4(295))
- [20] Mistry R, Roy T. Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt. *Perspectives in Science*. 2016 September; 8:307-309.
<http://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.061>
- [21] Xie SW, J, Pang, L, Lin, J, Zhu, Z. Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials*. 2012 May; 30:340-346.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.022>
- [22] Ali N, Chen J, Simms S, et al. Mechanistic evaluation fly ash asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1996 February; 8(1s.1):19-25.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1996\)8:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1996)8:1(19))
- [23] Likitlersuang S, Chompoorat T. Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2016 September; 9(1s.5):337-344.
<http://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.002>
- [24] Sobolev K, Vivian IF, Saha R, et al. The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials. *Fuel*. 2014 January; 116:471-477.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.123>
- [25] Saritha N. A Study on use of Carbon Black Powder in Bituminous Road Construction. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2015 June; 4:76-83, ISSN2278-0181.
<https://doi.org/10.17577/ijertv4is060220>
- [26] Mohd RH, Maniruzzaman A, Zulfiqar A, Ramadhansyah PJ, Moetaz MS, Haryati Y. Steel Slag as A Road Construction Material. *Journal Teknologi (Sciences and Engineering)*. 2015 January; 73(4):33-38.
 eISSN2180-3722
- [27] Pasetto M, Baldo N. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of Hazardous Materials*. 2010 September; 181:938-948.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.104>
- [28] Busari AA, Akinwumi I, Awoyera PO, Olofinnade OM, Tenebe TI, Nwanchukwu JC. Stabilization Effect of Aluminum Dross on Tropical Lateritic Soil. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018 November; 39:86-96.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.39.86>
- [29] Soós Z, Géber R, Tóth Cs, Igazvölgyi Zs, Udvardi B. Utilization of aluminium dross as asphalt filler. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2017 March; 69(3):89-93.
<https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2017.15>
- [30] Saravanan S, Venkatasubramanian C, Muthu D, Ramakrishnan K. Construction of Rural Roads using C&D Waste Materials. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016 July; 9(27):1-5.
<http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i27/97634>
- [31] Chen, M, Lin, J, Wu, S. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2011 October 2011; 25(10):3909-3914.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>
- [32] Chen M, Lin J, Wu S, Liu C. Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2011 April; 25(4): 1532-1536.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005>
- [33] Arabani M, Azarhoosh AR. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*.

- 2012 October; 35:1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036>
- [34] Hou Y, Ji X, Li J, Li X. Adhesion between Asphalt and Recycled Concrete Aggregate and Its Impact on the Properties of Asphalt Mixture. *Materials*. 2018 December; 11(12):1-15. <https://doi.org/10.3390/ma11122528>
- [35] Rodríguez-Fernández I, Lastra-González P, Indacochea-Vega I, Castro-Fresno D. Recyclability potential of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement and industrial by-products. *Construction and Building Materials*. 2018 November; 195:148-155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.069>
- [36] Fernandes SRM, Silva H, Oliveira J. Recycled stone mastic asphalt mixtures incorporating high rates of waste materials. *Construction and Building Materials*. 2018 October; 187:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.157>
- [37] Mhlongo SM, Abiola OS, Ndambuki JM, Kupolati WK. Use of Recycled Asphalt Materials for Sustainable Construction and Rehabilitation of Roads. *International Conference on Biological, Civil and Environmental Engineering*. 2014; 91-94. <http://dx.doi.org/10.15242/IICBE.C0314157>
- [38] Disfani MM, Arulrajah A, Bo MW, Hankour R. Recycled crushed glass in road work applications. *Waste Management*. 2011 November; 31(11):2341-2351. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.003>
- [39] Pasetto M, Baldo N. Resistance to Permanent Deformation of Road and Airport High Performance Asphalt Concrete Base Courses. *Advanced Materials Research*. 2013 August; 73:494-502. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.494>
- [40] Lou J, Liu H, Pang A, Sun H, Yang S, Yang T. The High Temperature Stability of Asphalt Composite Reinforced by Basalt Glass Powder and Basalt Fiber. *Advanced Materials Research*. 2012 December; 627:813-815. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.627.813>
- [41] Szilágyi K, Gömze AL, Polacsek G. A pernye bekeverési arányainak vizsgálata, meghatározása a gyártott cement mechanikai tulajdonságainak optimalizálása céljából. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2008 August; 60:44-49. <http://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2008.9>
- [42] Opocky L. A pernyék szilikátkémiai tulajdonságai. <http://hulladekonline.hu/files/166/> Megtekintés ideje: 2019. 01. 07.
- [43] <https://www.slideshare.net/JyotiKumari70/flyash-disposal-and-utilization-69528633> Megtekintés ideje: 2019. 02. 14.
- [44] Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009 December; 36:327-363
- [45] Sobolev K, Vivian IF, Sah R et al. The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials. *Fuel*. 2014 January; 116:471-477. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.123>
- [46] Xu P, Shi, Chen Z, Cai J, Pei J, Gao J, Zhang J, Zhang J. The effect of retreated coal wastes as filler on the performance of asphalt mastics and mixtures. *Construction and Building Materials*. 2019 January; 203:9-17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.088>
- [47] http://www.innoteka.hu/cikk/egy_alig_ismert_sikeragazat_onteszet.1228.html Megtekintés: 2019. 03. 19.
- [48] Yi H, Xu G, Cheng H, Wang J, Wan Y, Chen H. An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*. 2012; 16:791-801. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>
- [49] Wu Q, Wu, Y, Tong W, Ma H. Utilization of nickel slag as raw material in the production of Portland cement for road construction. *Construction and Building Materials*. 2018 December; 193:426-434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.109>
- [50] Pasetto M, Baldo N. Resistance to Permanent Deformation of Road and Airport High Performance Asphalt Concrete Base Courses. *Advanced Materials Research*. 2013 August; 723:494-502. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.494>
- [51] Tao G, Xiao Y, Yang L, Cui P, Kong D, Xue Y. Characteristics of steel slag filler and its influence on rheological properties of asphalt mortar. *Construction and Building Materials*. 2019 March; 2019, 201:439-446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.174>
- [52] Mailar G, Raghavendra SN, Sreedhara BM, Manu DS, Hiremath P, Jayakesh K. Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions. *Resource-Efficient Technologies*. 2016 June; 2:68-80. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.06.006>
- [53] Li Q, Qiu Y, Rahman A, et al. Application of Steel Slag Powder to Enhance the Low-temperature Fracture Properties of Asphalt Mastic and its Corresponding Mechanism. *Journal of Cleaner Production*. 2018 May; 184:21-31. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.245>
- [54] Masoudi S, Abtahi S, Goli A. Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Construction and Building Materials*. 2017 March; 135:260-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>
- [55.] Wu S, Zhu J, Zhong J. et al. Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder. *Construction and Building Materials*. 2011 June; 25:2883-2887. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.040>
- [56] Aliabdo A, Hassan H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. 2014 March; 53:151-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>
- [57] Bilgin, N, Yeprem, H, Arslan, S. et al. (2012) Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*. 2012 April; 29:449-457. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011>
- [58] Gómez-Meijide B, Pérez I, Airey G, Thom N. Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*. 2015 February; 77:168-178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.045>
- [59] Bhusal S, Li X, Wen H. Evaluation of Effects of Recycled Concrete Aggregate on Volumetrics of Hot-Mix Asphalt. *Journal of the Transportation Research Board*. 2011; 2205:36-39. <http://doi.org/10.3141/2205-05>