



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Út és Vasútépítési Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia

Közlekedésépítőmérnöki szekció

**Aszfaltburkolatok hőenergiájának vizsgálata és hasznosítása
nemzetközi tanulmányok alapján**

Készítette: Szvoboda Krisztián

Budapest

2016

Aszfaltburkolatok hőenergiájának vizsgálata és hasznosítása nemzetközi tanulmányok alapján

A megújuló energiák felhasználása manapság kétségtelenül az egyik leggyorsabban fejlődő iparág. Forrásuk tiszta és kimeríthetetlen, és használatuk összhangban van a fenntartható fejlődés elemeivel, hiszen kisebb mértékben környezetszennyező, mint a fosszilis tüzelőanyagok égetése, ugyanakkor nem fogja vissza az emberiség fejlődési lehetőségeit. Az egyik legnagyobb energiahordozó, a Nap, amely sugarai folyamatosan éri a Földet, mégis felhasználása még kezdeti stádiumban van.

A városok felületének nagy részét útburkolat alkotja, amely folyamatosan ki van téve a napsugárzásnak. Sötét színéből, és termofizikai tulajdonságából adódóan nyári napokon nagy mennyiségű hő gyűlik fel benne, amely hatására a felszín hőmérséklete eléri a 60-70°C. Ez gyengíti a merevségi tulajdonságait, ami szerkezeti károsodáshoz vezet. Továbbá nő a városi környezet hőmérséklete, amelynek egészségügyi és gazdasági hatásai lehetnek. A burkolat hőmérsékletének csökkentése így tehát fontos feladatává válik az útéptermékeknek, különösen a klímaváltozásból eredő növekvő hőmérsékletek miatt. Továbbá ezt a felhalmozott hőenergiát érdemes lenne felhasználni, és így meleg vizet, vagy elektromos áramot előállítani.

Ez a tanulmány a burkolatokban fellépő hőmérsékleti viszonyok feltérképezéséről és csökkentéséről, valamint a hőenergia lehetséges felhasználásairól nyújt átfogó képet nemzetközi tanulmányok alapján. Továbbá a cél, hogy a külföldi tapasztalatok alapján feltárássra kerüljenek azok az elemek, amelyeket érdemes további kutatásokon keresztül vizsgálni.

Kulcsszavak: megújuló energia, napenergia, aszfaltburkolat, hőmérséklet, energiahasznosítás

Konzulens: Dr. Kisgyörgy Lajos egyetemi docens, Út és Vasútépítési Tanszék

Study of the thermal energy utilization of asphalt roads based on international researches

The usage of renewable energy has undoubtedly become one of the most developing industries. Their sources are pure and inexhaustible, and are adjusted to the idea of the sustainable development, mainly because they are more environment friendly than the ignition of fossil fuels. One of the biggest source is the Sun, from where the heat radiations streak the ground permanently.

The surface of cities are greatly covered by roadpavement, which is exposed to the radiation. Due to its dark colour, and the thermophysical properties during hot summer days the surface temperature can reach 60-70°C. It can attenuate the mechanical features of the asphalt, and rise the temperature of the urban area, which may have economical and health sideeffects. Therefore it is important to reduce the temperature of the pavement, especially because the average temperature is getting higher caused by the climate change. Furthermore this excessive thermal energy could be harvested, and thus warm water or electricity can be obtained.

The object of this review is to introduce some studies dealing with the temperature field determination in the pavement, and the potential energy harvesting methods. This study can also provide extensive information to explore further development.

Keywords: energy harvesting, solar energy, asphalt pavement, renewables energy, temperature

Consultant: Dr. Kisgyörgy Lajos associate professor, Department of Highway and Railway Engineering

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
2. Hőmérsékleti viszonyok az aszfalt burkolatban	4
2.1 Burkolat hőmérsékletére hatással lévő elemek.....	4
2.2 Tanulmányok és eredmények	4
2.2.1 Hőmérséklet eloszlása hagyományos burkolatban	4
2.2.2 Különböző típusú, és adalékanyagú burkolatok hőmérséklete.....	6
2.2.3 Burkolatok hőmérsékletének befolyásoló tényezői	7
2.2.4 Hőmérsékleti viszonyok modellezése	13
2.3 Összefoglalás, konklúzió.....	14
3. Burkolatok hőenergiájának felhasználása aszfalt kollektoros rendszerrel	16
3.1. Aszfalt kollektoros rendszer ismertetése	16
3.2 Tanulmányok és eredmények	16
3.2.1 Napsugárzás intenzitása, burkolat által elnyelt hő, és a vezetékek által elnyelt hő.....	16
3.2.2 Hagományos és kísérleti burkolatok összehasonlítása	20
3.2.3 Hóolvasztás aszfalt kollektorral	21
3.2.4 Beépítettség hatása a kollektoros rendszer teljesítményére.....	23
3.3 Összefoglalás és konklúzió.....	27
4. Burkolat hőenergiájának felhasználása napelemekkel	29
4.1 Napelemes rendszer elterjedése.....	29
4.2 Fotovoltaikus rendszer működése	29
4.3 Napelemes burkolatú technológiák	31
4.4 Összefoglalás, konklúzió.....	33
5. Burkolat hőenergiájának hasznosítása termoelektromosság használatával.....	35
5.1 Fizikai jellemzők ismertetése	35
5.2 Peltier-elem működése	36
5.3 Elektromos energia létrehozása Peltier elemmel.....	38
5.4 Összefoglalás, konklúzió.....	38
6. Burkolatban keletkező energia kinyerése piezoelektromosság felhasználásával	39
6.1 Piezoelektromos anyagok működése.....	39
6.2 Tanulmányok és eredmények	40
6.3 Összefoglalás, konklúzió.....	43
7. Összefoglalás.....	44

Tábla-, és ábrajegyzék

1. táblázat: Vizsgálandó összefüggések, elemek	2
2. táblázat: Fizikai jellemzők.....	3
3. táblázat: Burkolat hőmérsékletét befolyásoló tényezők	4
1. ábra: Hőmérséklet alakulása a nap folyamán (forrás: Pethő L. 2008).....	5
2. ábra: Hőmérséklet alakulása a nap óráiban a mélység függvényében (forrás: Pethő L. 2008)	5
3. ábra: Hőmérséklet alakulása a burkolatban (forrás: Z. Zhou et al. 2014)	6
4. táblázat: [3] tanulmányban előállított anyagok, és elnevezésük.....	6
4. ábra: Hőmérséklet alakulása az idő függvényében a különböző felületeknél (forrás: H. Higashiyama et al. 2016).....	7
5. táblázat: Burkolati színek albedója, és hőmérséklet-csökkentő képességük	7
6. táblázat: Különböző burkolatok albedója, és hőmérséklete	7
5. ábra: Burkolat felületének hőmérséklete az albedó és az idő függvényében (forrás: J. Yang et al. 2016).....	8
6. ábra: Burkolat hőmérséklete a levegő hőmérsékletének függvényébe (forrás: S. Sreedhar et al. 2016).....	9
7. ábra: Burkolat hőmérséklete a hővezető tényező függvényében (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)	9
8. ábra: Burkolat hőmérséklete a fajlagos hő függvényében (forrás: S. Sreedhar et al. 2016).....	9
9. ábra: Burkolat hőmérséklete a relatív páratartalom függvényében (forrás: S. Sreedhar et al. 2016). 9	
10. ábra: Burkolat hőmérséklete az aszfalt sűrűségének függvényében (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)	10
7. táblázat: Hőmérséklet a burkolatban, az idő és környezeti viszonyok függvényében (forrás: R. S. Benrazavi et al. 2016).....	11
11. ábra: Hőmérséklet a burkolatban, az idő és környezeti viszonyok függvényében (forrás: R. S. Benrazavi et al. 2016).....	11
12. ábra: Burkolat hőmérséklete, az albedó és az idő függvényében, beépítetlen és beépített környezet (forrás: J. Yang et al. 2016).....	12
13. ábra: Hőmérséklet változása a szélesség függvényében (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015) . 12	
14. ábra: Hőmérséklet alakulása az idő függvényében egy aszfalt típusnál, a burkolat felszínén, és 40 mm-es mélységben (a)-(b) (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)	14
8. táblázat: Burkolat hőmérsékletét befolyásoló tényezők	14
9. táblázat: Valós idejű eredményeket mérő eszközök	17
15. ábra: Kollektoros rendszer kialakítása a 2. tanulmányban (forrás: Z. Zhou et al. 2014).....	17
16. ábra: Kollektoros rendszer kialakítása a 8. tanulmányban (forrás: Q. Gao et al. 2010).....	17
17. ábra: Hőmérséklet és napsugárzás alakulása a nap folyamán (forrás: Z. Zhou et al. 2014).....	18
18. ábra: Napsugárzás, elnyelt hő, és a rendszer hőkapacitása a nap folyamán (forrás: Z. Zhou et al. 2014).....	18

19. ábra: Napsugárzás mértéke és a levegő hőmérséklete az idő függvényében (forrás: Q. Gao et al. 2010).....	19
20. ábra: Kiáramló víz hőmérséklete (forrás: Q. Gao et al. 2010)	19
21. ábra: Beáramló víz hőmérséklete (forrás: Q. Gao et al. 2010).....	19
22. ábra: Rendszer hatásfoka (forrás: Q. Gao et al. 2010).....	20
23. ábra: Hagyományos és kollektoros burkolat hőmérséklete közötti összefüggés (forrás: Z. Zhou et al. 2014).....	20
24. ábra: Hagyományos és kollektoros burkolat hőmérséklete télen (forrás: Z. Zhou et al. 2014).....	21
25. ábra: Hó olvadásának kezdete a hővezető tényező és a kollektorok mélységének függvényében (forrás: M. Chen et al. 2011)	22
26. ábra: Hő áramlása a hagyományos és a konduktív aszfalt esetében (forrás: M. Chen et al. 2011) .	22
27. ábra: Hővezető képesség és hőkapacitás a grafit adagolás arányában (forrás: M. Chen et al. 2011)	23
28. ábra: Vezetékek elhelyezése (a) (b) (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015).....	24
29. ábra: Beépítettség hatása a burkolat hőmérsékletére (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015).....	25
30. ábra: Az egyes vezetékek feletti hőmérséklet (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015).....	25
31. ábra: Hőmérséklet alakulása a szélsébség függvényében (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015) .	26
32. ábra: Hőmérséklet alakulása az évszakok függvényében (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015).....	26
33. ábra: Napelem működése (forrás: http://nvsolar.hu/a-napelemek-mukodese)	30
10. táblázat: Napelemek típusai (forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell)	31
34. ábra: Solar Roadway (forrás: www.solarroadways.com).....	32
35. ábra: Wattway (forrás: www.wattwaybycolas.com)	33
36. ábra: Termoelektromos effektusok rendszerének ábrája (forrás: http://fizipedia.bme.hu).....	35
37. ábra: Peltier-elem felépítése (forrás: http://fizipedia.bme.hu).....	37
38. ábra: Piezoelektromos kristályok működése (forrás: http://hirmagazin.sulinet.hu/hu/tudomany/a-piezoelektromossag).....	39
39. ábra: Energia (mW)-terhelés (kPa) összefüggés az I. típusú modulnál (forrás: A.T. Papagiannakis et al. 2016).....	40
40. ábra: Energia (mW)-terhelés (kPa) összefüggés az II. típusú modulnál (forrás: A.T. Papagiannakis et al. 2016).....	40
11. táblázat: Modulok által nyerhető energia személy-, és tehergépjármű esetén.....	41
41. ábra: Terhelés (kN)-energia (mW) összefüggése különböző terhelési sebességnél, és modul típusnál (forrás: H. Roshani et al. 2016).....	41
42. ábra: Terhelés (kN)- energia (mW) összefüggés különböző hőmérsékleteknél (forrás: H. Roshani et al. 2016).....	42
43. ábra: Költségviszonyok (forrás: A. Moure et al. 2016).....	42

1. Bevezetés

A fosszilis tüzelőanyagok árának dramatikus csökkenésének ellenére a társadalom, különösen a 2015-ös évtől, megérezte a megújuló energiákban rejlő hatalmas potenciált. Ebben az évben ugyanis a világ vezető országai több olyan megállapodást hoztak, amely a fenntartható fejlődés elősegítése érdekében a megújuló energiák felhasználásának felgyorsítását kezdeményezi. Az utóbbi 10 évben a beruházások hatszorosára nőttek. 2015-ben az világ elektromos áram fogyasztásának 23,7%-át megújuló energiaforrások szolgáltatták.¹ Az országok között az energia források megoszlása igen eltérő, az Egyesült Államokban 10%, Németországban 33%, Izlandon 100% a megújuló energia használatának aránya.²

Az ilyen energiaforrások lényege, hogy folyton rendelkezésünkre állnak, forrásuk kimerülhetetlen, vagy legalábbis néhány évente újratermelődnek. Megújuló energiaforrás például a szélenergia, vízenergia, napenergia, geotermikus energia. Kihasználásuk számos formát ölt manapság, mégis a hatásfokuk sok esetben még igen alacsony, így sok tanulmány készül a teljesítményük növelése érdekében.

A napenergia felhasználása az egyik ilyen alternatív energiaforrás, amely a föld minden országában jelen van. A földfelszín, az atmoszféra, és az óceánok évente $3,85 \cdot 10^{24}$ J energiát nyelnek el, amely 2002-es adatok alapján egy napra számolva elég az emberiség egy éves energia igényének kielégítésére³. A sugárzás visszaverődése, és elnyelődése miatt a föld felszínére mindössze 1000-1200 W/m² érkezik be földrésztől függően. Ez tehát 1 kW egy négyzetméterre. Mivel az elektromos áram fogyasztását kWh-ban mérik, a nap sugárzás 1 kWh energiát közöl a föld felszínének 1 négyzetméterével 1 óra alatt. Magyarország területét (93 ezer km²) egy óra alatt 93 milliárd kWh energia éri, amely nagyjából kétszer akkora, mint az ország éves villamos energia fogyasztása.⁴ Természetesen a napenergia veszteségmentes felhasználása egyelőre nem lehetséges, mégis érezhetjük a napsugárzásban rejlő hatalmas energia mennyiséget. Ennek felhasználására egyre többször láthatunk nagy kiterjedésű felületeken, háztetőkön napelemeket, napkollektorokat, amelyek a napenergiából elektromos áramot, illetve meleg vizet állítanak elő.

Hasonló nagy kiterjedésű felület az utak burkolata. Az aszfalt jelenleg a leggyakrabban alkalmazott burkolóanyag az útépitésben. Színéből, termikus tulajdonságaiból adódóan nyári napokon rendkívül nagy napenergia képes felhalmozódni benne. Ennek köszönhetően nő az UHI (Urban Heat Island), amely jelenség azt mutatja, hogy a városi levegő hőmérséklete a kevésbé beépített területekhez képest jóval magasabb, hiszen a meleg burkolatok, és az épületek falai sugározzák magukból a hőt. Az Egyesült Államokban azt mutatták ki, hogy az UHI hatására 5-10%-al nő az elektromos áram fogyasztás a légkondicionáló gépek használata miatt, és 20%-al nő a szmog koncentrációja.⁵ Az utóbbi évtizedekben egyre növekszik az évi átlagos hőmérséklet, amely tovább erősíti ezt a jelenséget. Mindemelllett a magas hőmérséklet

¹ Frankfurt School- UNEP Centre, GLOBAL TRENDS IN RENEWABLE ENERGY INVESTMENT 2016

² RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK, RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT

³ Smil, V. 2006.

⁴ Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító ZRt. Adatpublikáció: Aktuális VER adatok: Bruttó energia – Éves 2016.

⁵ M.Santonis, Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. (2012)

szerkezeti károkat is okozhat a burkolatban, hiszen a bitumen viszkozitása nő, és nagy terhelés hatására nyomvályúk képződnek. A burkolatban rejlő termikus energia felhasználásának segítségével a közúti üzem elektromos áram fogyasztását önmaga termelné meg. Az intelligens közlekedési rendszerek, elektromos járművek töltése, téli hóolvasztó rendszer, jelzőberendezések mind részét képeznék egy nagy hálózatnak, amely energiáját a nap szolgáltatja. A burkolatban fellépő hőmérsékleti viszonyok vizsgálata, kontrolálása, és az ezekből adódó hőenergia felhasználása tehát gazdaságilag és műszakilag fontos feladata az útépítő mérnöknek.

Hatásokat, összefüggéseket, amelyeket érdemes vizsgálni az útburkolatban az *1. táblázat* tartalmazza.

Hőmérséklet	Közetek típusa, mérete, azoknak arányainak hatása a hőmérséklet eloszlásra
	Kötőanyag típusának, színének
	Szabad-hézagtartalom hatása
	Burkolat környezetének hatása (beépítettség, árnyékoltság)
	Időjárási tényezők változásának hatása
Hőmérséklet-csökkentés	Hőmérséklet csökkentésének lehetőségei
	Hőmérséklet csökkentés hatása a pályaszerkezet mechanikai tulajdonságaira, élettartamára
	Hőmérséklet csökkentés hatása a városi környezetre
Energia kinyerés	Energia kinyerésének lehetőségei
	Energia kinyerő rendszerek hatásfokát befolyásoló tényezők
	Energia tárolásának lehetőségei

1. táblázat: Vizsgálandó összefüggések, elemek

A tanulmány célja bizonyítani, hogy a burkolatban jelentős hőmennyiség keletkezik, amelynek kinyerésével érdemes foglalkozni. Ezért nemzetközi tanulmányokon keresztül kerülnek bemutatásra az aszfaltburkolatokban fellépő hőmérsékleti viszonyok, az ezt befolyásoló tényezők, valamint az ebből adódó termikus energia felhasználásának lehetőségei. Ezen kívül további lehetőségek is ismertetésre kerülnek az útburkolatban keletkező energiák kinyerésére. Az egyes témakörök végén javaslatokat olvashatunk további vizsgálatok elvégzésére.

Fizikai jellemzők ismertetése

A hőmérséklet vizsgálata során számos fizikai, jellemző szerepel az összefüggésekben, amelyeknek az ismerete nagyban hozzá járul a kutatási anyagok megértéséhez. Bevezetőként néhány ilyen fogalom kerül tisztázásra. Ezek a *2. táblázatban* láthatóak.

Napsugárzás	A Nap a rendkívül magas hőmérséklete miatt elektromágneses hullámokat bocsát ki, amelynek egy része elnyelődik a légkörben, vagy visszaverődik a világűrbe, így a földfelszín nagyjából a sugárzás 51%-a éri el. Ennek 9%-a rövid hullámhosszú ultravioleta sugárzás, 49% a közepes hullámhosszú látható fény tartomány, és 42% a hosszú hullámhosszú nem látható infravörös tartomány. A sugárzás mértéke az a hőmennyiség, amely egységnyi felületre, egységnyi idő alatt merőlegesen beérkezik. Mértékegysége W/m^2 . A földfelszínre beérkező sugárzás maximum $1000 W/m^2$ környékén van.	
Albedó	Az albedó a légkörön beérkező elektromágneses sugárzás visszaverődésének mértéke, azaz azt mutatja meg, hogy a visszavert sugárzás hány százaléka a beesőnek. Minél kisebb a felület albedója, annál nagyobb mennyiségű sugárzást nyel el. Általában 0 és 1 közötti értéket vesz fel, de szokás százalékban is kifejezni.	
Fajlagos emisszió, emisszió	Az emisszió egy anyagjellemző, a hőszállítás kibocsátásának képessége, mértékegysége W/m^2 . A fajlagos emisszió egy arányszám, a vizsgált anyag hőszállítása, és az ideális fekete anyag hőszállító képességének hányadosa, értéke tehát 0 és 1 közé esik. Szobahőmérsékleten egy fekete anyag hőszállítása nagyjából $448 W/m^2$.	
Hőközlés típusai ⁶	Hővezetés (kondukción)	A kondukción során a test egymással közvetlenül érintkező elemi részecskéi mozgásuk következtében adják egymásnak a hőt. A szilárd testekben a hő – néhány kivételtől eltekintve – általános hővezetés útján terjed. A hővezetés tényező tehát az a hőmennyiség, amely az adott anyag egységnyi keresztmetszetén egységnyi hőmérséklet gradiens hatására időegység alatt áthalad. Mértékegysége W/mK .
	Hőáramlás (konvekcion)	A konvekcion során a hő a folyadék vagy gáz makroszkópikus részeinek áramlása, helyváltoztató mozgása következtében terjed. Megkülönböztetünk természetes, vagy szabad konvekciont - amikor a közeg mozgását a különböző hőmérsékletű helyek között kialakuló sűrűség különbség hozza létre - és kényszerkonvekciont, amikor a fluidumot külső behatással kényszerítjük mozgásra.
	Hőszállítás (radiáción)	A radiáción során a hő a sugárzó test molekuláinak vagy atomjainak hőmozgása következtében kibocsátott különböző hullámhosszú elektromágneses rezgések formájában terjed.
Hőkapacitás	Egy rendszer hőkapacitása megadja, hogy mennyi (Q) kell közölni a rendszerrel, hogy hőmérséklete (T) egy kelvinnel emelkedjék. Mértékegysége: J/K . ⁷	

2. táblázat: Fizikai jellemzők

⁶ Seppo Louhenkilpi, Felde Imre (2011)⁷ <https://hu.wikipedia.org/wiki/H%C5%91kapacit%C3%A1s> Látogatás időpontja: 2016. október 1.

2. Hőmérsékleti viszonyok az aszfalt burkolatban

2.1 Burkolat hőmérsékletére hatással lévő elemek

Ez a fejezet azt a tényt hivatott igazolni, hogy a burkolatokban fellépő hőmérsékleti viszonyokat számos tényező befolyásolja. Ezek a 3. táblázatban kerültek feltüntetésre.

Burkolat	Hővezető tényező
	Albedó: felület színe és érdessége
	Hőkapacitás
	Emissziós tényező
	Ásványi váz szemeloszlása
	Fajlagos hő
Időjárás	Napsugárzás intenzitása
	Levegő hőmérséklete
	Szélesebesség
	Relatív páratartalom
Környezet	Beépítettség
	Árnyékoltság

3. táblázat: Burkolat hőmérsékletét befolyásoló tényezők

A vizsgálatokból láthatóvá válik, hogy az ember által befolyásolható tényezők alakításával milyen mértékben csökkenthető a pályaszerkezet hőmérséklete. Ez ugyanis fontos szerepet játszik a burkolat élettartamában, és a városi levegő csökkentésében.

2.2 Tanulmányok és eredmények

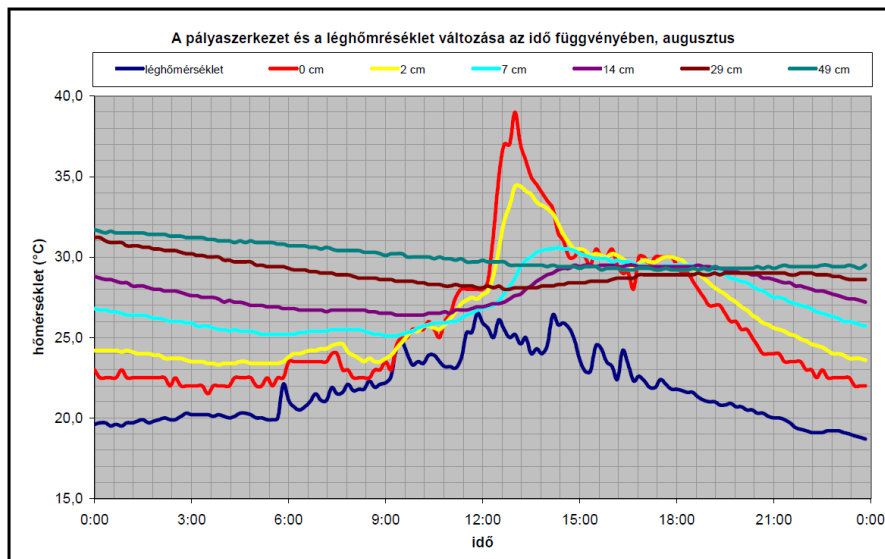
2.2.1 Hőmérséklet eloszlása hagyományos burkolatban

Az [1] tanulmány egy doktori értekezés egy magyar mérnöktől, Dr. Pethő Lászlótól. Kutatási témája a hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfalt burkolatú útpályaszerkezetben, és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek fáradási méretezésére, technológiai tervezésére. A vizsgálatok során a pályaszerkezet különböző rétegein mérték a hőmérsékleti viszonyokat a nap 24 órájában. Látható az 1. ábrán, hogy a maximális léghőmérséklet 26°C volt, ennek hatására a burkolat felszínén a hőmérséklet 39°C -ig emelkedett. Azt tapasztalhatjuk, hogy az alsóbb rétegeknél, 7 cm-nél mélyebben, a hőmérséklet-ingadozás csökken. A napsugárzás a felső rétegeket éri, amelyek a hővezetés hatására átadják a hőt az alsóbb rétegeknek, ahol a hőtárolás mértéke nagyobb, így éjszakánként nem csökken a hőmérsékletük. Míg a felső rétegek hamar felmelegednek a déli órákban, reggelente, és az esti órákban hőmérsékletük jóval az alsó rétegek hőmérséklete alá csökken. Ezt talán jobban szemlélteti a 2. ábra. A mélység mentén a hőmérséklet egyre állandósul, a felső 5-10 centiméteren 20°C -ot is változhat a hőmérséklet a nap folyamán. Láthatjuk, hogy a 13:00-kor mért hőmérsékleti állapotoknál a felső 5 cm majdnem eléri a 40°C -ot, majd ez rohamosan csökken.

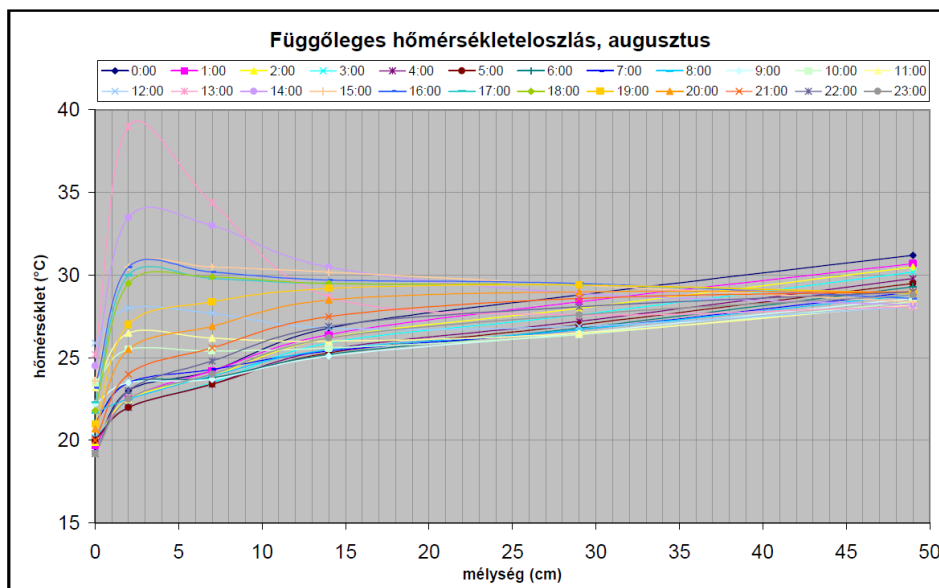
Ehhez hasonló eredményeket kaptak a [2] tanulmányban, ahol egy kísérleti próbaszakaszt építettek a kollektoros és a hagyományos burkolat hőmérsékletének vizsgálatra. A kollektoros rendszert a következő fejezetben tárgyaljuk. A levegő maximális hőmérséklete 36°C volt,

ennek hatására a felszín maximális hőmérséklete 58°C . Látható a 3. ábrán, hogy a hőmérséklet csökken a mélység növekedésével. A legalsó réteg hőmérsékleti csúcsa a hővezetés időszükséglete miatt, nagyjából 2 órával el van csúszva. Az is látszik, hogy az esti órákban az alsó rétegek lesznek melegebbek, hiszen ott a hő jobban tárolódik.

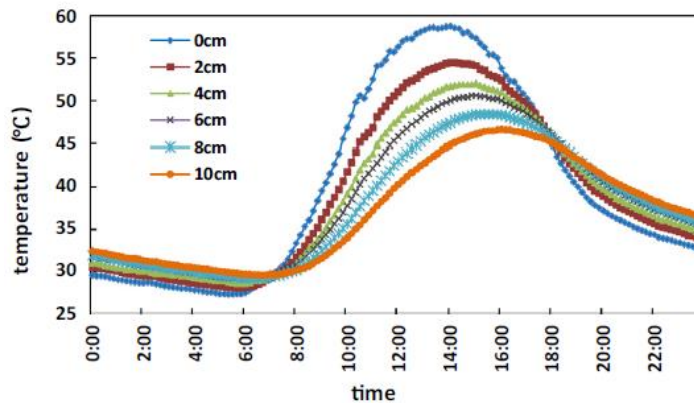
A mind a két tanulmányban a burkolat felső 7-10 centiméterének hőmérséklete növekszik jelentősen meg a déli órákban, a [2] tanulmányban a harang alakú görbék „szélesebbek”, azaz a burkolat hőmérséklete hosszabb ideig volt kiemelkedően magas. Ennek oka feltehetőleg a léghőmérséklet, ugyanis az [1] tanulmányban csak 26°C volt a napi maximum, míg a [2] esetében 36°C . Lehetséges továbbá, hogy az [1] tanulmányban beépített volt a környezet, és a napsugarak csak a déli órákban érték teljes mértékben a burkolatot.



1. ábra: Hőmérséklet alakulása a nap folyamán (forrás: Pethő L. 2008)



2. ábra: Hőmérséklet alakulása a nap óráiban a mélység függvényében (forrás: Pethő L. 2008)



3. ábra: Hőmérséklet alakulása a burkolatban (forrás: Z. Zhou et al. 2014)

2.2.2 Különböző típusú, és adalékanyagú burkolatok hőmérséklete

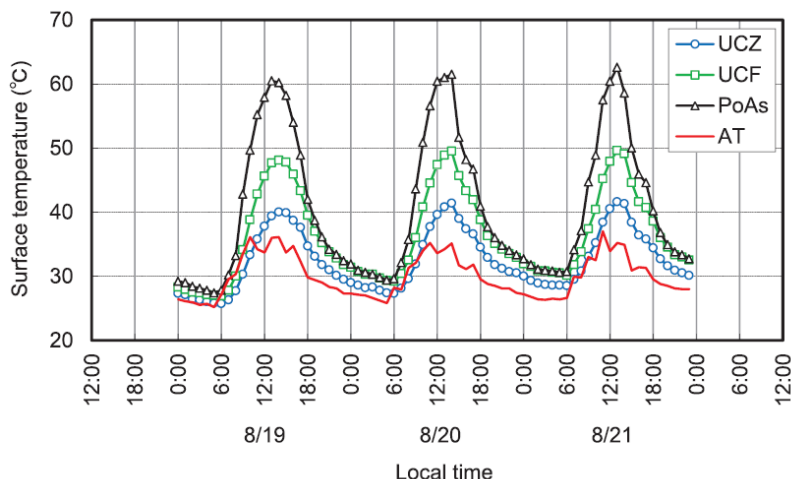
A [3] tanulmányban cement alapú anyagok hőmérsékletét vizsgálták három nyári napon át. A vizsgálati anyagokat a 4. táblázatban feltüntetett nevekkel látták el.

NCZ	portland cement, kerámia hulladék por, természetes zeolit
NCF	portland cement, kerámia hulladék por, pernye
UCZ	ultra gyorsan kötő cement, kerámia hulladék por, természetes zeolit
UCF	ultra gyorsan kötő cement, kerámia hulladék por, pernye

4. táblázat: [3] tanulmányban előállított anyagok, és elnevezésük

Az így keletkezett habarcsokat egy porózus aszfalt felületre öntötték, és simították el rajta. A hőmérsékletet a felület felett 1,5 méterrel, és a felület alatt 5 mm mélységben beágyazott termoelemmel mérték.

Azt tapasztalhatjuk, hogy az amúgy 60°C-os aszfalt felületet az UCZ 20,6°C-al az UCF 12,8°C-al csökkenti. Ennek oka, hogy az UCZ-ben használt természetes zeolit krémes színű, így albedója magasabb, míg az UCF-ben használt pernye szürkés. Hasonlóak tapasztalhatóak a normál portlandcementel készült habarcsoknál is. A NCZ 16,4°C-al, a NCF 10,0°C-al csökkentette a felületi hőmérsékletet. A két cementtípus közül a normál portlandcementel készített felületeknek volt alacsonyabb a hőmérséklete. A 4. ábrán láthatjuk az eredményeket. Piros vonallal a levegő hőmérsékletének alakulását ábrázolták. Látható, hogy a hagyományos aszfalt felület és a levegő maximális hőmérséklete között nagyjából 25°C különbség van. Az [1] és [2] tanulmányban ez a különbség 13 és 23°C volt.



4. ábra: Hőmérséklet alakulása az idő függvényében a különböző felületeknél (forrás: H. Higashiyama et al. 2016)

2.2.3 Burkolatok hőmérsékletének befolyásoló tényezői

Szín/albedó

A [4] kutatásban megállapították, hogy az anyagok visszaverő képessége függ az anyag színétől, és érdességétől. A világos felületek nagyobb részét nyelik el a napsugárzás látható tartományának, de az infravörös tartomány elnyelése a színtől független. Az alábbi táblázatban láthatjuk a különböző színű aszfaltburkolatok albedóját és a hőmérséklet különbségét a fekete burkolatokhoz képest.

Szín	Albedó	Hőmérséklet különbség [°C]
Fehér	0,45	-12
Krém/drapp	0,31	-9
Sárga	0,26	-7
Zöld	0,11	-5
Piros	0,10	-4
Fekete	0,03	-

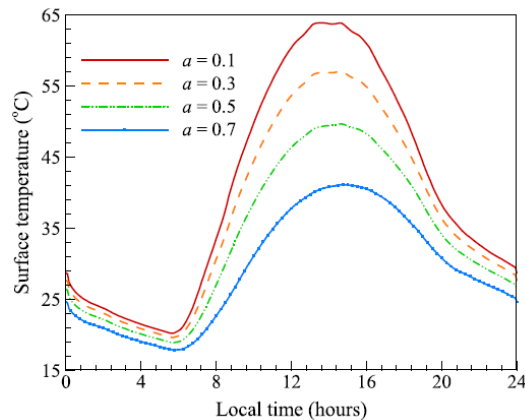
5. táblázat: Burkolati színek albedója, és hőmérséklet-csökkentő képességük

Néhány további összefüggés az albedó és a hőmérséklet között különböző burkolatoknál:

Keverék	Albedó	Hőmérséklet
Szemkihagyásos szerkezetű gumibitumennel modifikált aszfalt	0,12	67,8
Vastag gumiaszfalt	0,13	66,7
Vastag gumiaszfalt fehér színezéssel	0,26	51,1
Beton burkolat	0,48	51,8

6. táblázat: Különböző burkolatok albedója, és hőmérséklete

Az [5] tanulmány modellje alapján az albedó – burkolati hőmérséklet kapcsolatát az 5. ábrán láthatjuk. A vízszintes tengelyen az idő látható, az albedó értékét 0,1 0,3 0,5 0,7-nek vették fel.



5. ábra: Burkolat felületének hőmérséklete az albedó és az idő függvényében (forrás: J. Yang et al. 2016)

Azt tapasztalhatjuk, hogy az albedót 0,2-vel növelve a burkolat maximális hőmérséklete 7-9°C-al csökkenhet.

Látható, hogy minél nagyobb az albedó, annál alacsonyabb a hőmérséklet. Az 5. táblázatban 0,42-vel növelve az albedót 12°C-os csökkenés, míg a 6. táblázatnál az albedó mindössze 0,14-gyel való csökkentése 16,7°C-os különbséget okoz. Az 5. ábra alapján 0,2-es növekedés az albedóban 7-9°C csökkenést eredményez a burkolat hőmérsékletében. A különböző eredmények oka lehet az eltérő hőmérsékleti viszonyok, és az aszfalt egyéb termikus tulajdonságainak különbsége.

Levegő hőmérséklete

A [6] tanulmányban kapott eredményt a 6. ábrán láthatjuk. Azt tapasztalhatjuk, hogy ha levegő hőmérséklete 25°C-ról 35°C-ra nő, a burkolat hőmérséklete 17°C-al nő. Párhuzamot e között, és a [1,2,3] tanulmányban tapasztalt hőmérséklet-növekedés között nem lehet, hiszen a nap folyamán a reggeli órák alacsonyabb hőmérséklete mellett a nap sugárzása is laposabb szögben éri a felületet. A 4. ábra alapján 10°C léghőmérséklet növekedés 33°C növekedést okozott a burkolatban.

Hővezetés

A hővezető képesség fontos termikus tulajdonsága az aszfaltnak, amelyet növelve a hőmérséklet áramlása gyorsabb lesz a burkolatból a talaj felé napközben, míg éjszaka fordított az áramlás. Továbbá a magasabb hővezető képességű anyagoknak alacsonyabb az átlagos maximális hőmérsékletük, és magasabb az átlagos minimális hőmérsékletük. A [4] kutatásban kimutatták, hogy ha a hővezetés 0,6-ről 2,6 W/mK-re nő, az átlagos maximális hőmérséklet 7°K-nel csökken, míg az átlagos minimális hőmérséklet 4,5°K-nel nő. A [3] tanulmányban a hővezető tényező 1,2 W/mK-ről 3,0 W/mK-re való növelése 7°C-os csökkenést okozott napközben, míg éjszaka 2,4°C-ot növelt a felszín hőmérséklete.

A [6] tanulmány alapján (7. ábra) a hővezető képességet 0,6 W/mK-ről 1,4 W/mK-re növelve 20°C-al csökken a burkolat hőmérséklete, ami lényegesen nagyobb, mint a [4] és a [3]

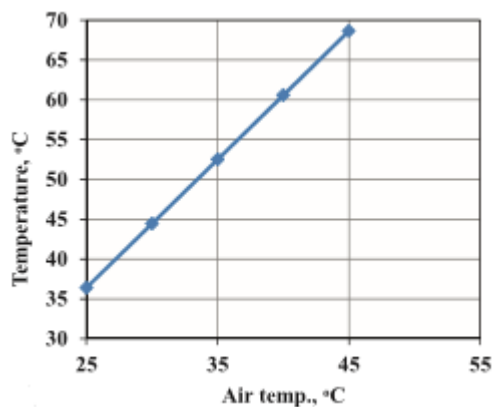
tanulmányban mért csökkenés. Utóbbi kettő között nagy az összhang, ezért valószínű, hogy a [6] tanulmány eredménye hibás.

Fajlagos hő

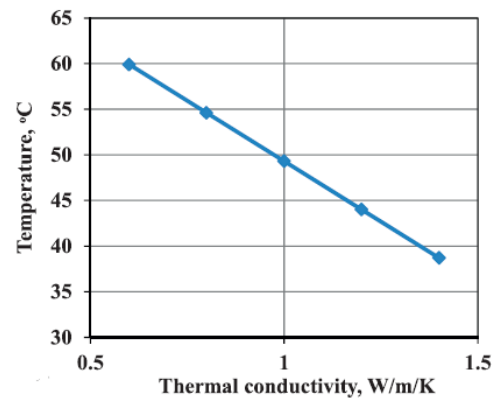
Az [6] tanulmányban tapasztaltakat a 8. ábrán láthatjuk. Vízszintes tengelyen a fajlagos hő, függőleges tengelyen a hőmérséklet látható. Az fajlagos hőt 500 J/kg/°C-ról 1500 J/kg/°C-ra növelve a burkolat hőmérséklete nagyjából 15°C-al nő.

Relatív páratartalom

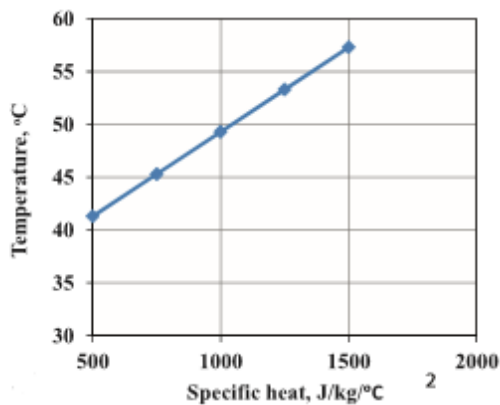
A [6] tanulmány alapján (9. ábra) a relatív páratartalom 40%-os növekedésével 5°C-ot csökken a burkolat hőmérséklete.



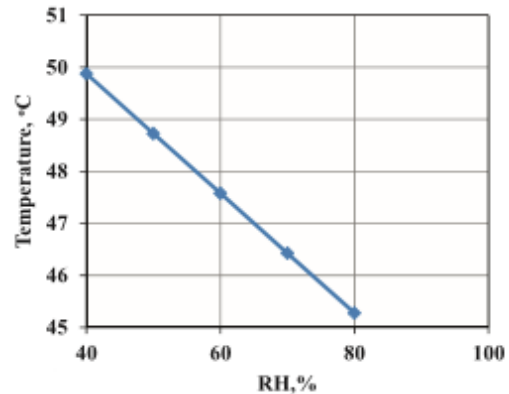
6. ábra: Burkolat hőmérséklete a levegő hőmérsékletének függvényébe (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)



7. ábra: Burkolat hőmérséklete a hővezető tényező függvényében (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)



8. ábra: Burkolat hőmérséklete a fajlagos hő függvényében (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)

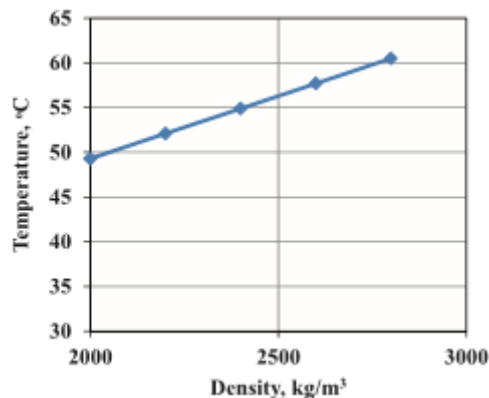


9. ábra: Burkolat hőmérséklete a relatív páratartalom függvényében (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)

Aszfalt sűrűsége

A [6] tanulmány alapján a sűrűség-hőmérséklet kapcsolat a 10. ábrán látható. A sűrűséget 500 kg/m³-rel növelve a burkolat hőmérséklete 6°C-al növekszik. Ez azzal magyarázható, hogy minél nagyobb a burkolat sűrűsége, annál kisebb mértékű tud lenni az abszorpció az anyagon belül, így nagyobb lesz a hőmérséklet.

Fontos megemlíteni, hogy a [6] tanulmány ábráin jelzett linearitás feltehetőleg csak az adott intervallumra érvényes.



10. ábra: Burkolat hőmérséklete az aszfalt sűrűségének függvényében (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)

Fajlagos emisszió

Az emisszió vizsgálatok kimutatták [4], hogy a magas hőmérsékleten a legnagyobb emissziós sugárzás 550 W/m^2 . Továbbá arra a megállapításra jutottak, hogy az emisszióknak éjszaka van szerepe, ugyanis egy magas fajlagos emissziójú anyagnak (0,93) 5°C -al nagyobb mértékben csökken a hőmérséklete éjjel, mint az alacsonyabb (0,35) fajlagos emisszióval rendelkezőnek. Kimutatták azt is, hogy ha egy anyag fajlagos emissziója 0,7-ről 1,0-ra nő a maximum hőmérséklet 5°C -al, a minimum hőmérséklet $8,5^\circ\text{C}$ -al csökken.

Hőáramlás

Hőáramlás a burkolat és a levegő hőmérsékletének különbségéből adódó transzportfolyamat, nagysága függ a hőmérsékletkülönbségtől, és a levegő mozgásának sebességétől. Kimutatták [4], hogy az aszfaltburkolat legnagyobb hőáramlása meleg napokon 350 W/m^2 körül van, míg a beton burkolaté 200 W/m^2 .

Vízáteresztő képesség

Vízáteresztő burkolatokkal kapcsolatban az a tapasztalat, hogy eső esetén a víz átáramolva a burkolaton nagyobb mértékben csökkenti a hőmérsékletet, mint a vízzáró burkolatoknál. Ez leginkább csapadékos területeken mérvadó, amúgy nagy jelentősége nincs.

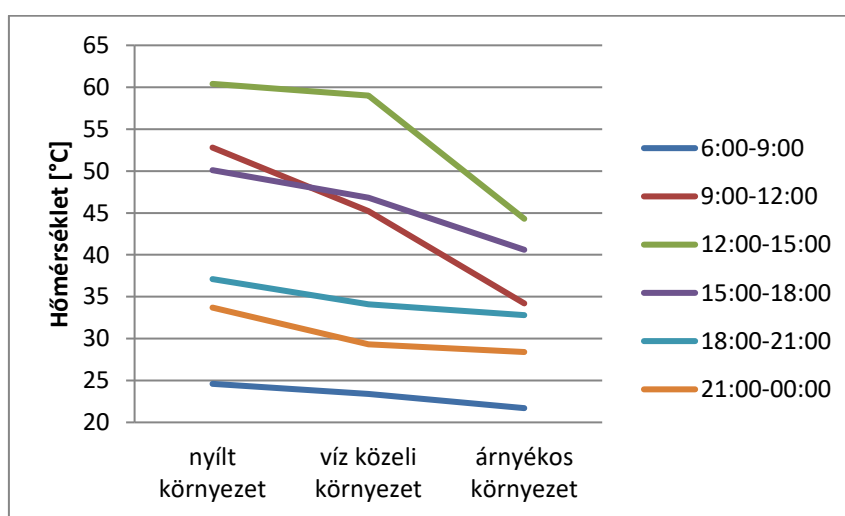
Környezet

Az [5] tanulmányban különböző burkolatok hőmérsékletének alakulását vizsgálták nyitott környezetben, víz (tó, folyó) közelében, és árnyékos környezetben. Aszfalt mellett gránit burkolatokat is vizsgáltak, ugyanakkor ez az útépítésben ritkán alkalmazott anyag, így az ezeknél kapott eredményeket nem mutatom be.

Az alábbi ábrán és táblázatban láthatjuk a napszak és a környezeti viszonyok függvényében a hőmérséklet alakulását.

	Hőmérséklet [°C]		
	nyílt környezet	víz közeli környezet	árnyékos környezet
6:00-9:00	24,6	23,4	21,7
9:00-12:00	52,8	45,2	34,2
12:00-15:00	60,4	59	44,3
15:00-18:00	50,1	46,8	40,6
18:00-21:00	37,1	34,1	32,8
21:00-00:00	33,7	29,3	28,4

7. táblázat: Hőmérséklet a burkolatban, az idő és környezeti viszonyok függvényében (forrás: R. S. Benrazavi et al. 2016)

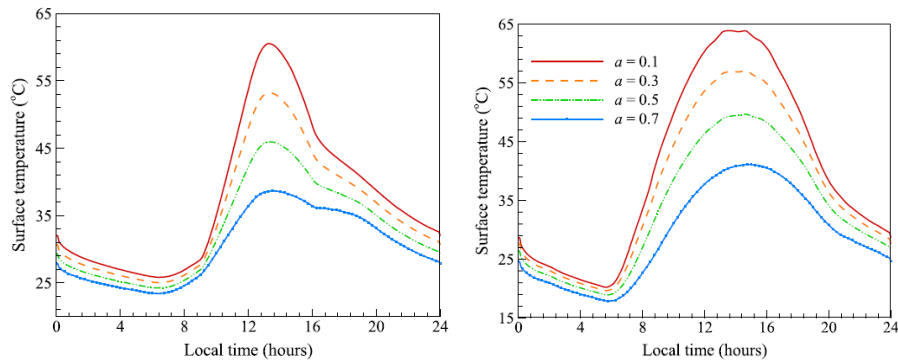


11. ábra: Hőmérséklet a burkolatban, az idő és környezeti viszonyok függvényében (forrás: R. S. Benrazavi et al. 2016)

Látható, hogy akár 16°C-al is csökkenthető a burkolat hőmérséklete, ha árnyékos környezetben van. 6 óra alatt 36°C-os növekedés tapasztalható napos környezetben. A levegő hőmérsékletéhez viszonyítva az aszfalt hőmérséklete mindig nagyobb, a legmagasabb különbség 28,3°C nyílt környezetben 12:00 és 15:00 között. Árnyékos területen ez csak 12,2°C.

Beépítettség

Az [5] tanulmányban a beépítettség hatását vizsgálták számítógépes modell felhasználásával. A beépítettség nélküli, és a sűrűn beépített terület burkolat-hőmérsékletének változása a 12. ábrán látható.



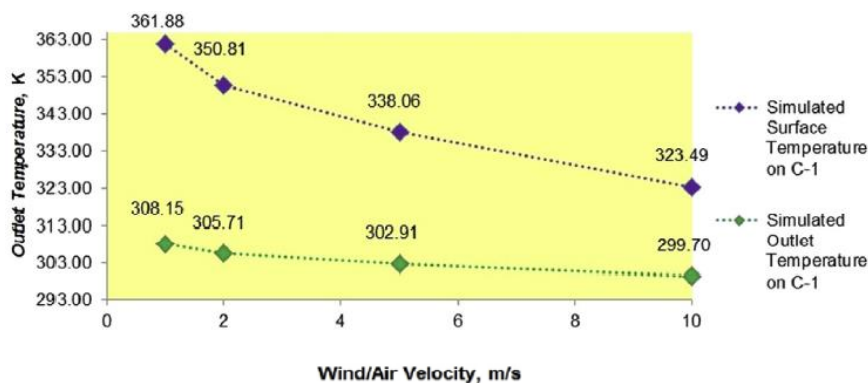
12. ábra: Burkolat hőmérséklete, az albedó és az idő függvényében, beépítetlen és beépített környezet (forrás: J. Yang et al. 2016)

Azt tapasztalhatjuk, hogy a magas épületek korlátozták a napsugarak eljutását a burkolatig, és csak szűkebb időtartamba emelkedik meg a hőmérséklet. A beépített környezetben a 0,7-es albedójú burkolatok 11 órán át több mint 10°C -al csökkentették a burkolat hőmérsékletét, míg ez az érték beépítetlen környezetben 5 óra volt. Éjszaka a legmagasabb albedóval rendelkező burkolat hőmérséklete 3°C -al alacsonyabb volt, mint a 0,1-es albedójú burkolaté. A felület hőmérséklete a beépített esetben nagyobb volt éjszaka, mint a beépítetlen környezetben, ugyanis az épületek a burkolatból kisugárzó hőhullámokat felfogták, és visszaverték, így a hőenergia bennmaradt az rendszerben. Az tapasztalták továbbá, hogy alacsonyabb épületek esetén ($h/w=0,5$) a magas visszaverő képességű burkolatok 27°C -al csökkentik a burkolat felszínének hőmérsékletét, míg magas épületeknél ($h/w=4$) ez az érték csak 14°C . Utóbbi esetben a napsugárzás csak a déli órákban éri a burkolatot, így a nagy albedóval rendelkező burkolatok hőmérséklet-csökkentő hatása mérséklődik.

Az épületek falainak hőmérsékletére a burkolat albedójának változtatása elhanyagolható mértékben volt hatással, maximum 2°C különbség adódott.

Szél sebessége

A [10] tanulmányban tapasztaltakat a 13. ábrán láthatjuk.



13. ábra: Hőmérséklet változása a szélesebbég függvényében (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015)

Azt tapasztalhatjuk, hogy ebben az esetben a szélesebbesség 1 m/s-ról 2 m/s-ra való növekedése 10°C-os csökkenést okoz, míg az 5-10 m/s-os tartomány között a szélesebbesség egységnyi csökkentése 3°C-os hőmérséklet csökkenéssel jár. 9 m/s-os szélesebbesség növekedés esetén 9°C-al csökken a levegő hőmérséklete.

2.2.4 Hőmérsékleti viszonyok modellezése

A [6] kutatásban 6 különböző burkolattípus hőmérséklet alakulását tanulmányozták a burkolat felszínén, és 40 mm-es mélységben. A hőmérséklet vizsgálatára modellt állítottak, amelyben felhasználták a keverék termikus tulajdonságait, valamint a környezeti tényezőket: a levegő hőmérsékletét, szél sebességét, és a relatív páratartalmat. A modell a legkisebb négyzetek elvén alapszik, amely a mért és a szimulált értékek közötti hiba négyzetét minimalizálja. A hat különböző keverékből készítették hengeres próbatestet, amelyből a fajlagos hőkapacitást (C_p) és a hővezető képességet (k) határozták meg, valamint táblás próbatestet, amelyből az albedót (α) és a hőmérsékletet (T_p) számolták.

Az alábbi modellt állították fel a burkolat felszínének hőmérsékletére:

$$T_{\text{surface}} = -29.117 + 0.016C_p - 26.505k + 4.301W_s - 0.115RH + 1.612T_{\text{air}} + 0.014\rho$$

A felszíntől 40 mm-re lévő hőmérséklet modellezésére az alábbi képletet állították fel:

$$T_{40} = -6.757 + 0.019C_p - 26.508k + 0.784T_{\text{air}} + 0.015\rho + 3.024W_s - 0.208RH$$

Ahol,

C_p fajlagos hőkapacitás J/kg/°C

k hővezető képesség W/mK

W_s szélesebbesség m/s

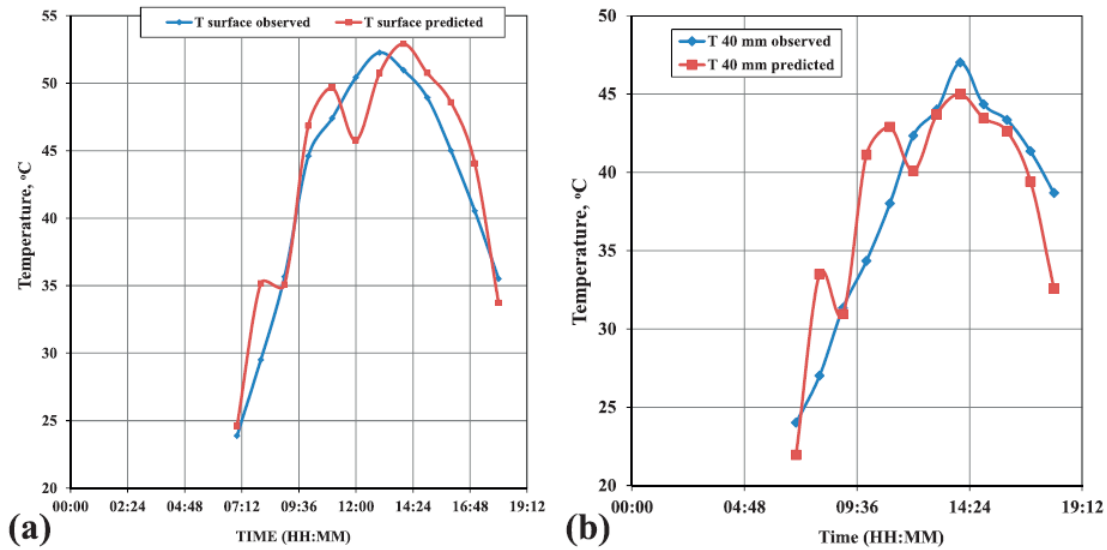
RH relatív páratartalom %

T_{air} a levegő hőmérséklete

ρ testsűrűség kg/m³

A képletben szereplő előjelekből látható, hogy a fajlagos hőkapacitás, szélesebbesség, levegő hőmérséklet, és a sűrűség növekedésével nő a felület hőmérséklete, míg a hővezető képesség és a páratartalom fordítottan arányos a burkolat hőmérsékletével. A modell hiányossága, hogy nem számol a nedvességgel, és nem általánosítható minden transzportfolyamatra. Meg kell jegyezni, hogy ugyan az albedó fontos tulajdonsága az aszfaltnak, egyik modellben sem szerepel, hiszen ez csak a felület érdességétől és textúrájától függ. Összehasonlítva az [7] tanulmányban felállított modellel, itt nem vizsgálják a beépítettség hatását.

A valóságban mért és a modellel számított eredmények egy keverék típusnál a 14. ábrán látható.



14. ábra: Hőmérséklet alakulása az idő függvényében egy aszfalt típusnál, a burkolat felszínén, és 40 mm-es mélységben (a)-(b) (forrás: S. Sreedhar et al. 2016)

Azt tapasztalhatjuk, hogy a modell jó megközelítést ad. Érdeemes megjegyezni, hogy néhány esetben a hőmérsékleti csúcs közelében egy süllyedés tapasztalható a görbékben. Ez rendre 9:36 előtt, és 12:00-kor tapasztalható, lehetséges, hogy a modell lefutása nem volt tökéletes, ugyanakkor erre nem adtak magyarázatot.

2.3 Összefoglalás, konklúzió

Bebizonyosodott, hogy az aszfalt burkolatokban nyáron jelentős hőmennyiség lép fel, amelyet érdemes lehet kitermelni. Déli órákban az aszfalt felülete akár 65°C-os is lehet nyári hónapokban. A hőmérsékletet befolyásoló tényezőket a 8. táblázatban láthatjuk.

Tényezők, amely növelésével csökken a burkolat hőmérséklete	Albedó
	Árnyékoltság
	Fajlagos emisszió
	Hővezetés
	Szél sebessége
	Relatív páratartalom
	Vízáteresztő képesség
Tényezők, amelyek növelésével nő a burkolat hőmérséklete	Aszfalt sűrűsége
	Levegő hőmérséklete
	Fajlagos hő

8. táblázat: Burkolat hőmérsékletét befolyásoló tényezők

A magas hőmérséklet szerkezeti károsodáshoz vezethet, továbbá jelentősen megnöveli a városi környezet hőmérsékletét, aminek egészségügyi, és gazdasági következményei is vannak. Ez okot adhat elsősorban a burkolatok hőmérsékletének csökkentésével foglalkozni, amely a fenn említett paraméterek változtatásával lehetséges. Továbbá a megújuló energiaforrások felhasználásának egyre nagyobb mértékben való elterjedése miatt érdemes az aszfaltok termikus energiájának kinyerésének lehetőségét vizsgálni.

Javasolt a hazai kőzetek termikus tulajdonságainak elemzése, esetleg speciális ásványi vázú aszfaltkeverékek hőmérséklet eloszlásának vizsgálata, mint például a porózus aszfalt. Érdeemes vizsgálni a keverék mechanikai tulajdonságait a hőmérséklet függvényében, annak érdekében, hogy a burkolat viselkedését megfelelően lehessen modellezni, és méretezéskor figyelembe lehessen venni a hőmérséklet hatásait. Javasolt továbbá egy burkolat élettartama során a visszaverő képesség változásának vizsgálata. Ugyanis az aszfalt a beépítés után a bitumen színéből adódóan mindig fekete, de a mészkő alapú kővázak fehér színe idő után dominánssá válik a felület kopása miatt.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Pető L. 2008: A hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfalt burkolatú útpályaszerkezetben, és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek fáradási méretezésére, technológiai tervezésére. – Doktori (PhD) értekezés
- [2] Z. Zhou; X. Wang; X. Zhang; G. Chen; J. Zuo; S. Pullen 2014: Effectiveness of pavement-solar energy system: An experimental study
- [3] H. Higashiyama; M. Sano; F. Nakanishi; O. Takahashi; S. Tsukuma 2016: Field measurements of road surface temperature of several asphalt pavements with temperature rise reducing function
- [4] M. Santamouris 2013: Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat
- [5] J. Yang; Z. Wang; K. E. Kaloush; H. Dylla 2016: Effect of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix
- [6] S. Sreedhar; K. P. Biligiri 2016: Development of pavement temperature predictive models using thermophysical properties to assess urban climates in the built environment
- [7] R. S. Benrazavi; K. B. Dola; N. Ujang; N. S. Benrazavi 2016: Effect of pavement materials on surface temperatures in tropical environment
- [10] D. S.N.M. Nasir; B. R. Hughes; J. K. Calautit 2015: A study of the impact of the building geometry on the thermal performance of road pavement solar collectors

3. Burkolatok hőenergiájának felhasználása aszfalt kollektoros rendszerrel

3.1. Aszfalt kollektoros rendszer ismertetése

Az aszfaltburkolatban, ahogyan azt a második fejezetben láthattuk, rendkívül nagy hőenergia gyűlik össze nyári hónapokban. Ennek értékét $40 \text{ MJ/m}^2/\text{nap}$ -ra becsülik, amely nagyjából megfelel 1 liter gázolaj, vagy 1 m^3 földgázból kinyerhető energiának.⁸ Az útburkolatok termikus energiájának felhasználására egyre több kísérlet folyik laboratóriumokban. Egyik ilyen lehetőség az aszfalt kollektoros megoldás, amely hasonlóan a hagyományos napkollektorok működéséhez, ebben az esetben is víz felmelegítésén alapul. Lényege, hogy a burkolatba jó hővezető, általában réz csöveket raknak, amelyben víz folyik. A folyadék mozgását hőpumpa szabályozza, és a víz tárolása föld alatt kialakított tározóban történik. Meleg nyári napokon az aszfalt kollektor képes csökkenteni a burkolat hőmérsékletét, azáltal, hogy a kollektorban folyó víz felveszi a hőt. Ezzel a városi levegő hőmérséklete is csökken, és a burkolat élettartama növekedhet. Téli csapadékos időjárás esetén a csővezetékekbe meleg vizet engedve a burkolatról könnyedén leolvasztható a hó, vagy a jég. Ezáltal csökkenthető a környezetre szennyező hatással lévő útszóró sók használata. A tárolt meleg víz későbbi hőelvonásra, vagy akár a környező épületek ellátására is felhasználható.

Kollektoros rendszer teljesítmény növelése lehetséges:

- a hővezető képesség növelésével,
- cső átmérőjének növelésével,
- mélység növelésével,
- elhelyezés sűrítésével.

Ezek mellett az előző fejezetben bemutatott tényezők, amelyek a hőmérsékleti viszonyokra hatással vannak, nagymértékben befolyásolják a kollektorok hatásfokát.

3.2 Tanulmányok és eredmények

3.2.1 Napsugárzás intenzitása, burkolat által elnyelt hő, és a vezetékek által elnyelt hő

A [2] tanulmányban laboratóriumi viszonyok között egy $12 \times 8 \text{ m}^2$ területű tesztszakaszt építettek aszfalt kollektoros rendszerből Kína egyik városában. A maximális hőmérséklet nyáron $36,9^\circ\text{C}$, a szél sebessége átlagosan $1,8 \text{ m/s}$. A napsugárzás $100\text{-}1166 \text{ W/m}^2$ között volt. A rendszer kialakítását a 15. ábrán láthatjuk.

A hőtározót 120 m mélyen helyezték el a talajban, ahol a hőmérséklet $13,7^\circ\text{C}$ volt. A vezetékek 80 mm mélyen a felszíntől, 200 mm egymás közötti távolsággal voltak elhelyezve. Külső átmérőjük 20 mm . A valós idejű méréseket, ahogy a 15. ábrán is látszik, több eszköz biztosította. Ezek a 9. táblázatban vannak feltüntetve.

⁸ Neil Packer 2011

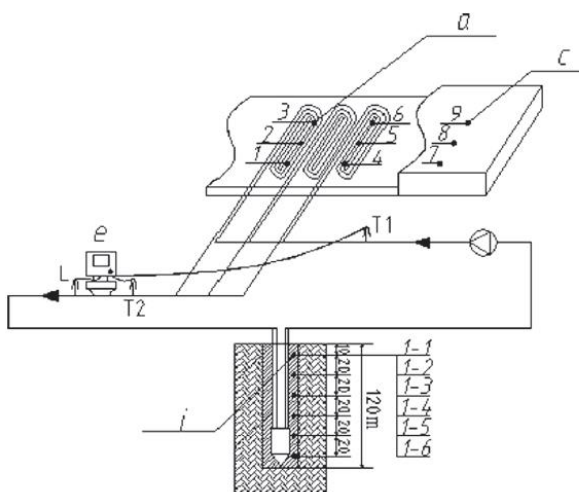
a,	aszfalt kollektoros burkolat hőmérő (1-6)
c,	hagyományos burkolat hőmérséklet mérése (7-9)
e)	kaloriméter
L)	áramlás szenzor
T1)	beáramló folyadék hőmérsékletének mérése
T2)	kiáramló folyadék hőmérsékletének mérése
i)	föld alatti hőmérséklet mérése (1-1 - 1-6)

9. táblázat: Valós idejű eredményeket mérő eszközök

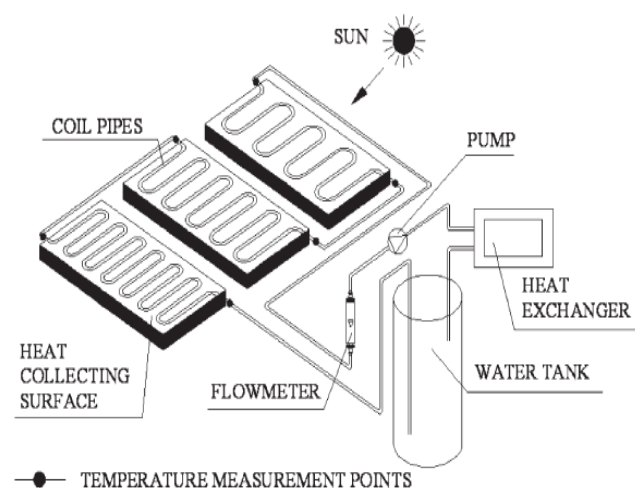
Ezen kívül mérték a levegő hőmérsékletét 1,5 méterre a föld felszínétől, és a sugárzás mértékét 3 méterre a felszíntől.

A [8] kutatásban hasonló elrendezést állítottak össze. A tanulmányban a kollektorokban áramló folyadék intenzitásának függvényében vizsgálták laboratóriumban a rendszer teljesítményét. A vizsgálatot 1,2*0,6 m² felületű beton táblákon végezték el. A rézvezetékek külső átmérője 20 mm, a fal vastagsága 4 mm volt. A burkolat 8 mm alsó, 40 mm középső, és 30 mm felső rétegből állt. A vezetékek a középső rétegre voltak ráfektetve szerpentin formában 90, 120, és 150 mm köztes távolságban a három táblán. Azaz, a csővezeték felső pontja és a burkolat felszíne között 10 mm volt, szemben a [2] tanulmányban ismertetett elhelyezéssel, ahol ez az érték 60 mm. Fontos megjegyezni, hogy így nyilván valóan magasabb lesz a hatásfoka a [8]-as rendszernek, teherbírás szempontjából ez valószínűleg nem működő kialakítás. A rendszer felépítését a 16. ábrán láthatjuk.

A [2] tanulmánytól eltérően itt a meleg víz egy hőcserélőbe folyik bele, ami lehűti, annak érdekében, hogy a tartályban a hőmérséklet állandó jelleggel alacsony maradjon. A szél hatását nem vették figyelembe, ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy ahogy azt a [2] tanulmány bemutatásánál láthattuk (13. ábra), ennek hatása igen jelentős. Mérték a napsugárzás intenzitását, a környezeti levegő hőmérsékletét, a táblákba be-, és kiáramló víz hőmérsékletét, a felület hőmérsékletét, a tartályban lévő víz hőmérsékletét, az áramlás intenzitását stb. Az áramlás sebességét 70 80 és 100 L/h-ra vették rendre az 1. 2. és 3. napon.

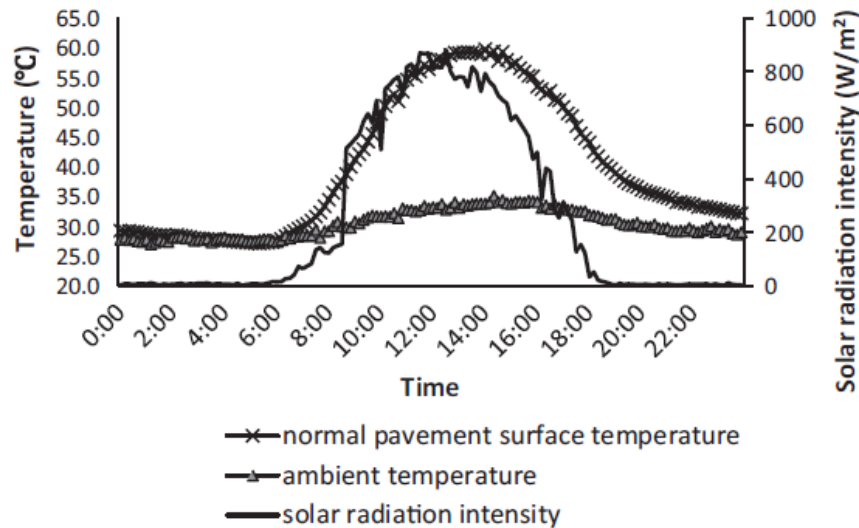


15. ábra: Kollektoros rendszer kialakítása a 2. tanulmányban (forrás: Z. Zhou et al. 2014)



16. ábra: Kollektoros rendszer kialakítása a 8. tanulmányban (forrás: Q. Gao et al. 2010)

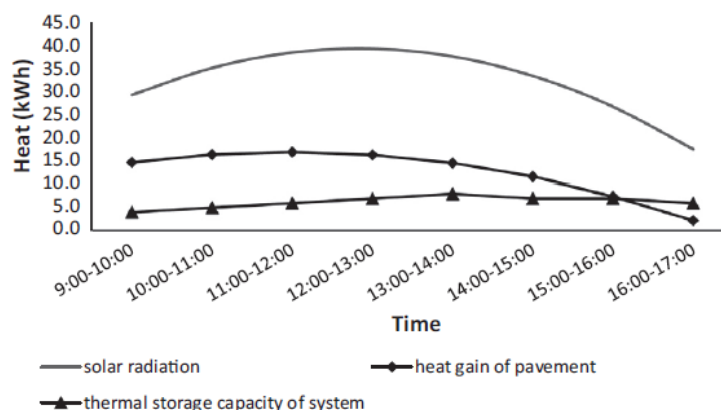
A [2] kutatás során a 69 nyári nap alatt 2821 kWh hőmennyiséget tároltak el, és ehhez 331 kWh elektromos energia volt szükséges. A környezet, és a felület hőmérséklete, valamint a napsugárzás intenzitása a 17. ábrán látható.



17. ábra: Hőmérséklet és napsugárzás alakulása a nap folyamán (forrás: Z. Zhou et al. 2014)

Függőleges tengelyen a hőmérséklet, illetve a sugárzás intenzitása, a vízszintes tengelyen a nap 24 órája látható. Azt tapasztalhatjuk, amit már a korábbi tanulmányokban is, hogy a burkolat felszínének hőmérséklete a kora reggeli órák (6-8h) és az esti órák (18-20h) között ugrik meg lényegesen, míg a levegő hőmérséklete kisebb mértékben változik. Jelen esetben a maximális hőmérséklete a levegőnek 35°C, a burkolatnak 59,8°C, amit 14 órakor ért el. A napsugárzás intenzitása 12:30 kor volt a legnagyobb, 881 W/m². A maximum elérése után a hősugárzás, és felületi hőmérséklet lefutása hasonló volt, azt leszámítva, hogy a felszín hőmérsékletének görbéjénél nagyjából 90 perces eltolódás figyelhető meg.

A burkolatot érő, és az elnyelt hősugárzás mértéke a 18. ábrán látható. Függőleges tengelyen a hőmennyiség, vízszintesen az idő látható. Szürke vonal a napsugárzást, háromszögezett vonal a rendszer hőtároló képességét, a rombuszsal jelölt vonal az elnyelt hőmennyiséget ábrázolja.

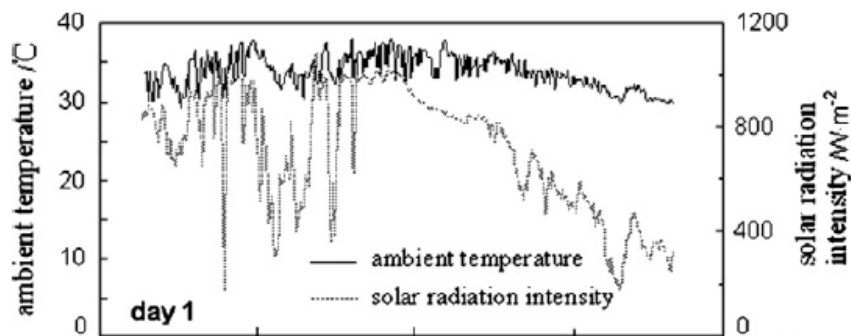


18. ábra: Napsugárzás, elnyelt hő, és a rendszer hőkapacitása a nap folyamán (forrás: Z. Zhou et al. 2014)

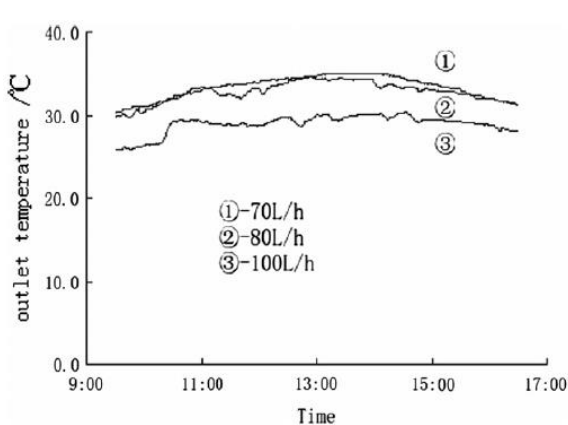
A napsugárzás értéke 21-47,2 kWh közé esett, a burkolat abszorpciós tényezője (elnyelt hő és a napsugárzás aránya) 12,5-49,9 % között volt, átlagosan 37% volt a nap folyamán. A hőtárolás hatásfoka 11,4-28,6 % között volt, átlagosan 17%.

A [8] tanulmányban az első nap alatt mért hőmérséklet és napsugárzás intenzitásának viszonyait a 19. ábrán láthatjuk. Függőleges tengelyen a hőmérséklet (folytonos vonal), és napsugárzás (szaggatott vonal), vízszintes tengelyen az idő került feltüntetésre. A mért értékek ingadozását a felhők árnyékoló hatása okozza. Azt tapasztalhatjuk, hogy a hőmérséklet kismértékű, 3-5°C-os változására a napsugárzás mértéke jelentősen, akár 500-600 W/m²-rel csökkent.

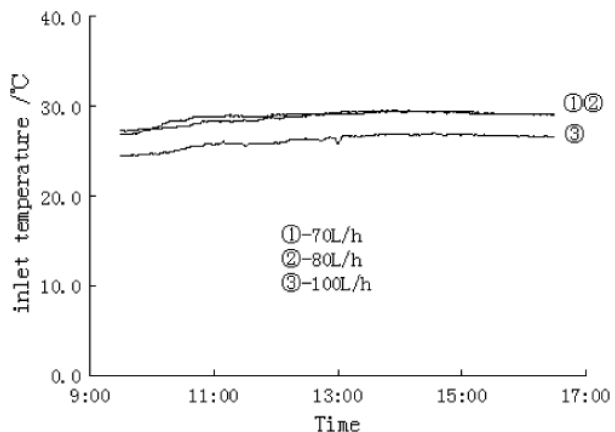
A 20. 21. ábrákon láthatjuk a beáramló és a kiáramló víz hőmérsékletét. Azt tapasztalhatjuk, hogy a folyadék hőmérséklete 1-5°C-al nőtt, a maximális kiáramló folyadék 35°C-os volt, amely nem elegendő a földalatti tárolásra. A 3. napon a levegő hőmérséklete hűvösebb volt, ez magyarázza, hogy a 3. görbe alacsonyabban van. Így a folyadék sebességének hatását nem lehet kimutatni.



19. ábra: Napsugárzás mértéke és a levegő hőmérséklete az idő függvényében (forrás: Q. Gao el al. 2010)

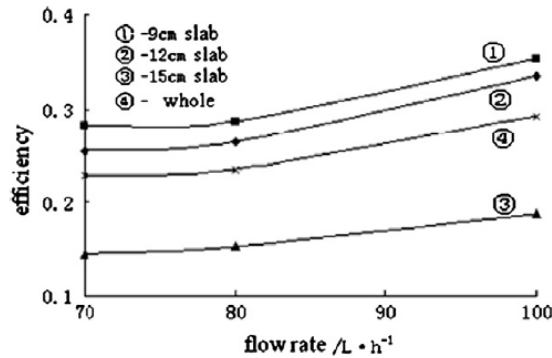


20. ábra: Kiáramló víz hőmérséklete (forrás: Q. Gao el al. 2010)



21. ábra: Beáramló víz hőmérséklete (forrás: Q. Gao el al. 2010)

A 22. ábrán láthatjuk a rendszer hatásfokát (elnyelt hő és a teljes napsugárzás hányadosa, függőleges tengely) az áramlás sebességének (vízszintes tengely) és a csövek egymás közötti távolságának függvényében.

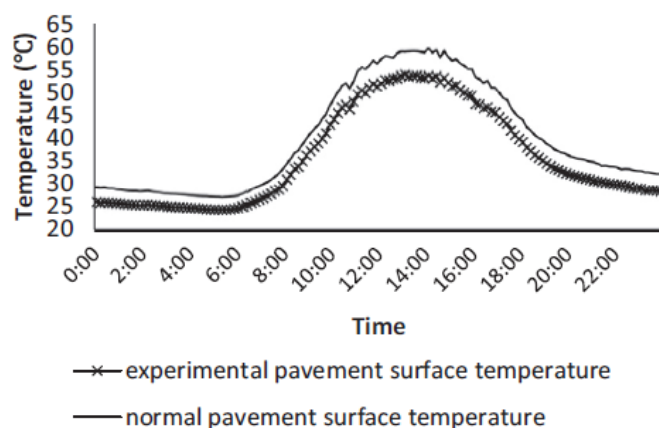


22. ábra: Rendszer hatásfoka (forrás: Q. Gao et al. 2010)

Látható, hogy minél sűrűbben vannak elhelyezve a csövek annál nagyobb a hatásfok, illetve az áramlás sebességének növelésével is hasonló hatást érünk el. Az tapasztalták továbbá, hogy a sűrűbb fektetéssel a burkolat felületének hőmérséklete akár 7°C -al is csökkenthető a ritkább fektetéshez képest. A legnagyobb elért hőenergia elnyelésének kapacitása 9 cm-es fektetéssel 258 W/m^2 , 12 cm-nél 232 W/m^2 , 15 cm-nél 154 W/m^2 . A teljes elnyelt hőmennyiségnek 41%-át a 9 cm-es fektetésű tábla, 37 %-át a 12 cm-es fektetésű tábla, 22%-át a 15 cm osztásközű tábla nyelte el. Érdeemes megismételni, hogy a vezetékek felső pontja 1 centiméterre volt csak a burkolat felszínétől, amely ugyan növeli a hatásfokot, nem alkalmazható járművek terheinek kitett útszakaszon.

3.2.2 Hagyományos és kísérleti burkolatok összehasonlítása

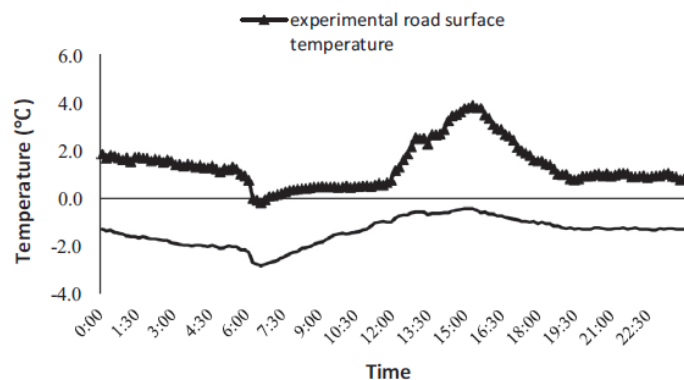
A [2] tanulmány alapján a normál és a kísérleti burkolat hőmérsékletének alakulását a 23. ábrán láthatjuk. A normál burkolat $2,6\text{-}6^{\circ}\text{C}$ -al melegebb volt a nap minden órájában. Ez a tendencia a vizsgált 7 nap alatt végig érvényes volt. A maximális hőmérséklet ez alatt az idő alatt a hagyományos burkolatnak $62,3^{\circ}\text{C}$, a kollektoros burkolatnak $57,9^{\circ}\text{C}$ volt.



23. ábra: Hagyományos és kollektoros burkolat hőmérséklete közötti összefüggés (forrás: Z. Zhou et al. 2014)

3.2.3 Hóolvasztás aszfalt kollektorral

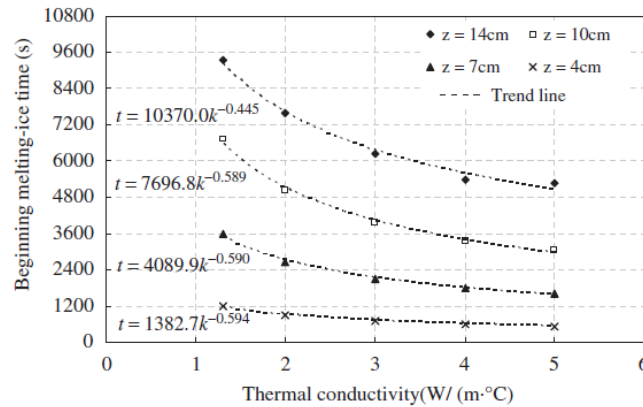
A téli vizsgálati időtartam alatt a [2] tanulmányban 104 nap alatt 4598 kWh hőt vezettek be a burkolatba, amelynek energiaigénye 499 kWh volt. A 24. ábrán látható a hagyományos (sima vonal) és a kísérleti burkolat (háromszöggel ellátott vonal) hőmérséklete között a különbség. Láthatjuk, hogy egy rövid időtartamot kivéve a kollektoros burkolat hőmérséklete fagypont fölött volt a nap folyamán, míg a hagyományos burkolat hőmérséklete 0°C alatt volt mindvégig. A levegő hőmérséklete $-2,8$ $-0,4$ $^{\circ}\text{C}$ között volt. A kollektorok hőmérséklet-növelő hatásából adódóan a burkolatra eső hó rögtön elolvadt.



24. ábra: Hagományos és kollektoros burkolat hőmérséklete télen (forrás: Z. Zhou et al. 2014)

A [9] tanulmányban a kollektoros rendszer hóolvasztó képességét modellezték. A bemeneti paraméterek alapján a jégréteg hőmérséklete -3 $^{\circ}\text{C}$, vastagsága 1 cm, a vezetékben folyó víz hőmérséklete 25°C volt. A pályaszerkezet 4 cm kopórétegből, 6 cm kötő rétegből, 8 cm alaprétegből, 20 cm alapból, 40 cm alsó alapból, és talajból állt. Adott volt továbbá az anyagok hővezető tényezője, fajlagos hője, sűrűsége. A vezeték külső átmérője 15 mm, belső átmérője 10 mm. A fektetési mélységet 4, 7, 10, 14 cm között változtatták. Az aszfalt hővezető tényezőjét $1,3$ $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ -nak vették fel alapból, de ezt grafit por hozzáadásával növeltek is egészen 5 $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ -ig.

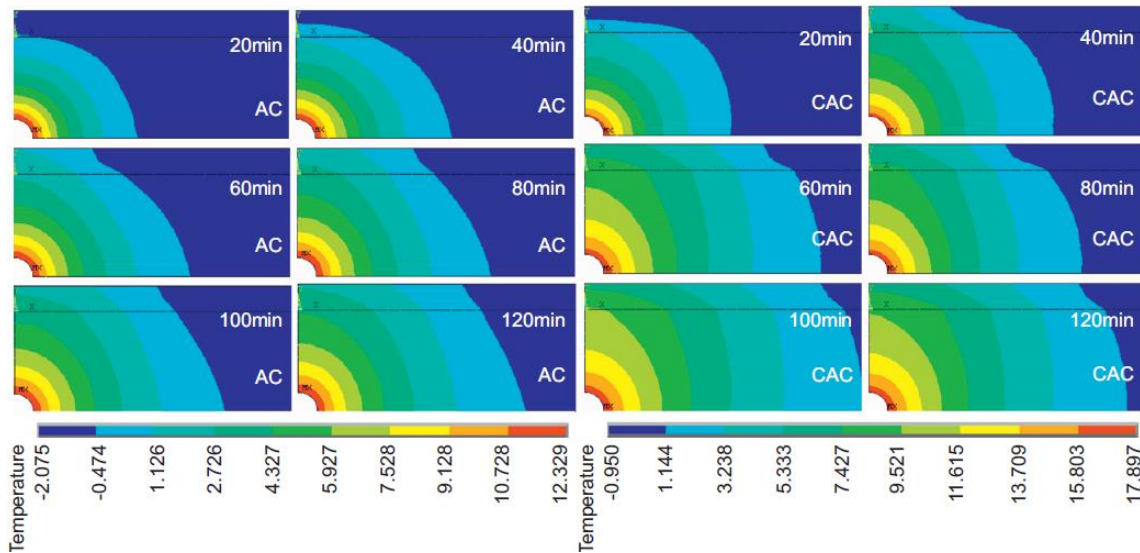
A 25. ábra hővezető tényező és a jég olvadásának kezdeti idejének összefüggését adja meg a vezeték fektetési mélységének függvényében. Látható, hogy azonos fektetési mélységnél a nagyobb hővezető tényezővel rendelkező burkolatnál hamarabb kezdődik el a jég olvadás. A fektetési mélység csökkentésével hasonló módon csökken ez az időtartam.



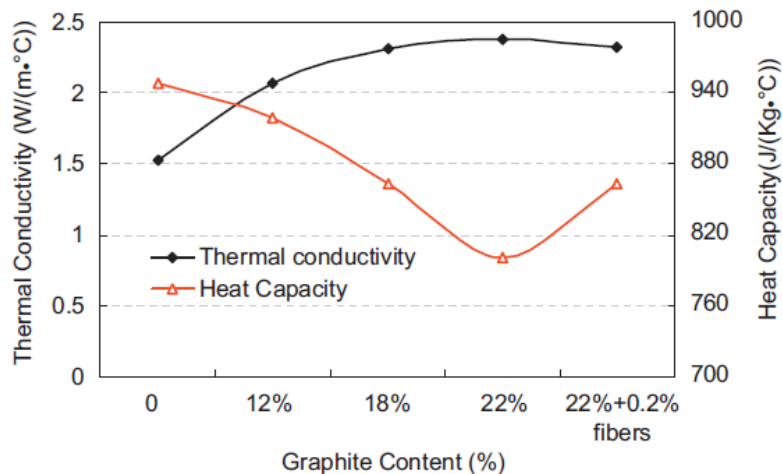
25. ábra: Hó olvadásának kezdete a hővezető tényező és a kollektorok mélységének függvényében (forrás: M. Chen et al. 2011)

A 26. ábrán látható a különbség a 1,3 W/m°C (AC) és a 3,0 W/m°C (CAC) hővezető tényezőjű aszfaltburkolatok hőmérséklet eloszlása között. Látható, hogy a jobb hővezetés hatására gyorsabban terjed a hő a burkolatban, és már 40 perc után 0°C felé emelkedik a felület egy részének hőmérséklete.

A kísérleti mintába grafitporral javították a hővezető képességet. Ahogyan a 27. ábrán láthatjuk a grafit arányának növelésével egy darabig nő a hővezető képesség, de csökken a hőkapacitás. Így 18 %-os adagolást állapítottak meg a legkedvezőbbnek. Kimutatták, hogy a hővezető képesség 1,531 W/m°C-ról 2,309 W/m°C-ra való növelése 30%-al csökkenti a hó elolvasztásához szükséges időt.



26. ábra: Hó áramlása a hagyományos és a konduktív aszfalt esetében (forrás: M. Chen et al. 2011)



27. ábra: Hővezető képesség és hőkapacitás a grafit adagolás arányában (forrás: M. Chen et al. 2011)

Továbbá vizsgálták a beáramló víz hőmérsékletének változtatásával járó hatást is. Egyik esetben 25°C, másik esetben 50°C-os vizet áramoltattak a rendszerbe. 25°C-os esetben 3,8 cm havat 382 perc alatt, 50°C-os esetben 12,2 cm vastag hórteget 309 perc alatt olvasztottak fel. Ugyanakkor a nagy energia igény miatt nem tartják fontosnak az ilyen magas hőmérsékletű folyadék használatát.

3.2.4 Beépítettség hatása a kollektoros rendszer teljesítményére

A [10] tanulmányban az aszfalt kollektoros rendszer teljesítményét vizsgálták különös tekintettel a beépítettség jellegére. A számításokat egy korábbi tanulmányban felállított modellen keresztül hajtották végre, és ehhez viszonyítva validáltak. A modell két részből állt: egy makro és egy mikro területből. Ezeket külön futtatták le, ugyanis egybe sok időt igényelt volna, míg pontos eredményt kapnak. A makro terület az épületek közötti burkolat felszínét reprezentálta. Ennek célja az atmoszféra profiljának, a kanyon légmozgás sebességprofiljának, a kanyon levegőjének és a burkolat hőmérsékleti profiljának megismerése. A mikro terület a kollektoros rendszert foglalta magába, aminek a peremfeltételeit a makro modellben kapott burkolat hőmérsékleti profiljából származtattak.

A beépített területen a burkolat szélessége 20 m, az épületek magassága 20 m, hosszuk 100 m. A geometria befolyásolja a szél áramlását, valamint a sugárzás visszareflektálódását. A modell kialakításakor ügyelni kellett, hogy az épületek teteje felett kellő magasságig tartson a modellezett tér, hogy a légmozgások megfelelően legyenek szimulálva.

Nem beépített terület esetében a különbség az, hogy nincsenek épületek, amelyek hatással lennének a burkolat hőmérsékletére.

A mikro területben 10 méter hosszú 5 mm falvastagságú, 20 mm-es átmérővel rendelkező 0,15 méter mélyen fektetett, egymás között 1 méter távolságra fekvő réz csövek alkották a kollektoros rendszert. Ezt a korábban bemutatott tanulmányokhoz képest mélyebb és ritkásabb fektetés. A modell egyszerűsítésére a burkolat felületének mindössze 10 %-ára, nagyjából 10*20 m² területre terjesztették ki a vezetékeket.

Paraméterek:

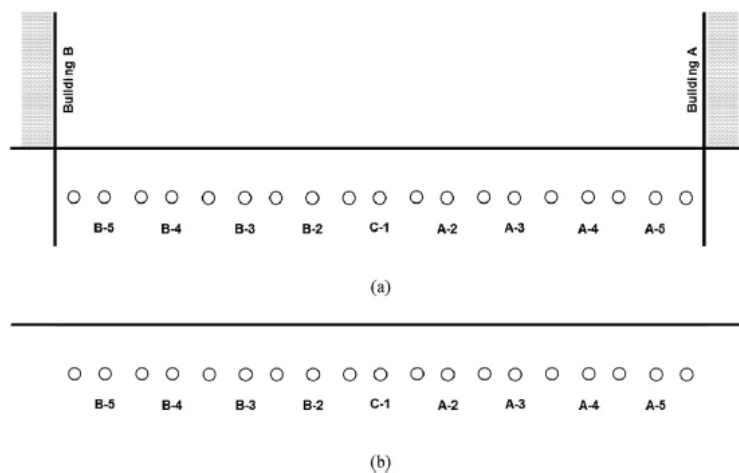
- Víz sebessége a vezetékben: 0,1 m/s
- Belépő víz hőmérséklete: 20°C
- Levegő hőmérséklete 30°C
- Szél sebessége: 1 m/s

Adottak voltak továbbá az út, talaj, fal, réz vezeték felületeinek, valamint a víznek a paraméterei (hőmérséklet, sűrűség, fajlagos hő, emissziós együttható, hővezető képesség).

A nyári hónapokon kívül vizsgálták a márciusi szeptember és decemberi hónapok átlaghőmérsékletének megfelelő viszonyokat.

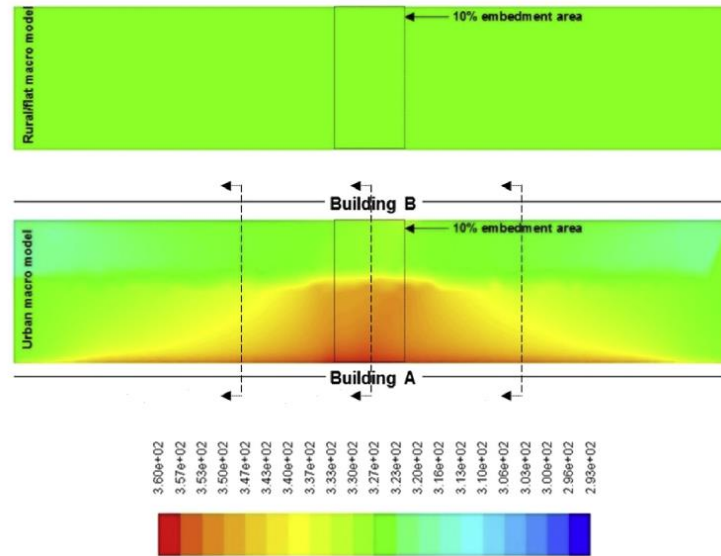
A szimuláció július 21. 13:00 időpontnak megfelelő napállást feltételez. A szél áramlása a B épület felől az A épület felé irányul.

A vezetékek az utca tengelyével párhuzamosan fekszenek, elrendezésük a 28. ábrán látható beépített (a) és beépítetlen környezet (b) esetében.

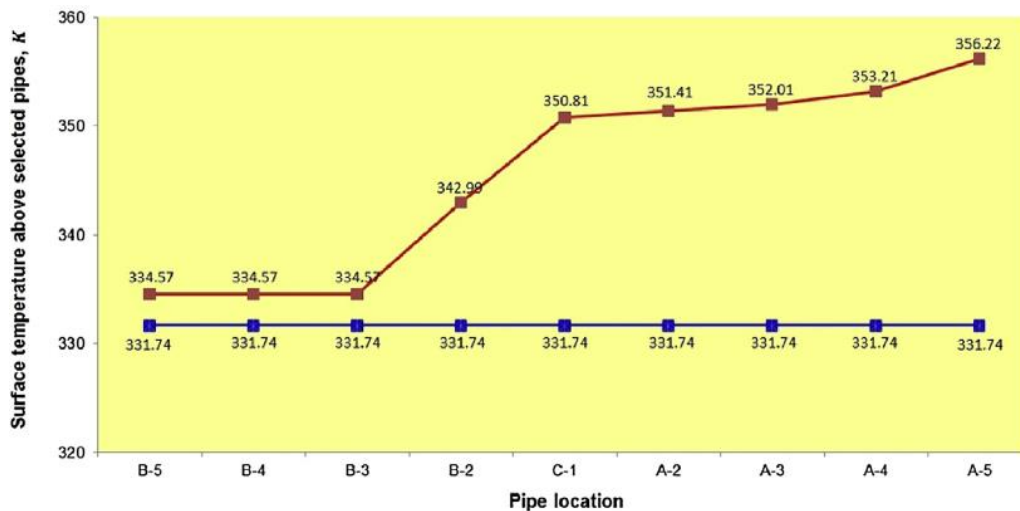


28. ábra: Vezetékek elhelyezése (a) (b) (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015)

A hőmérsékleti viszonyok egy adott időpontnak megfelelő napállás esetén a 29. ábrán látható. Az tapasztalható, hogy beépített esetben a B épületsor árnyékoló hatása miatt az A épületsor közelében lesz nagyobb a felület hőmérséklete. Továbbá a szél áramlásának is nagy szerepe van, ugyanis látható, hogy a vizsgált szakasz két szélén, ahol a levegő mozgása szabadabb, kisebb a hőmérséklet, mint a szakasz közepén. Ebből következik, hogy a nyitott környezetben is alacsonyabb a felület hőmérséklete. Az egyes vezetékek feletti hőmérsékletet a 30. ábrán láthatjuk. Ahogy azt a 29. ábrán is tapasztalhattuk, az A épület közelében magasabb a hőmérséklet (piros vonal), míg nyílt területen egyenletes a hőmérséklet eloszlása a keresztmetszetben (kék vonal). Beépített esetben a legnagyobb hőmérséklet 356,22K azaz 83,07°C volt, míg nyílt környezetben 331,74K, azaz 58,59°C volt, a különbség a két különböző beépítettség között tehát 24,5°C. Ebből következik, hogy a kollektorok hőmérséklet-csökkentő hatása az A épület környezetében magasabb.



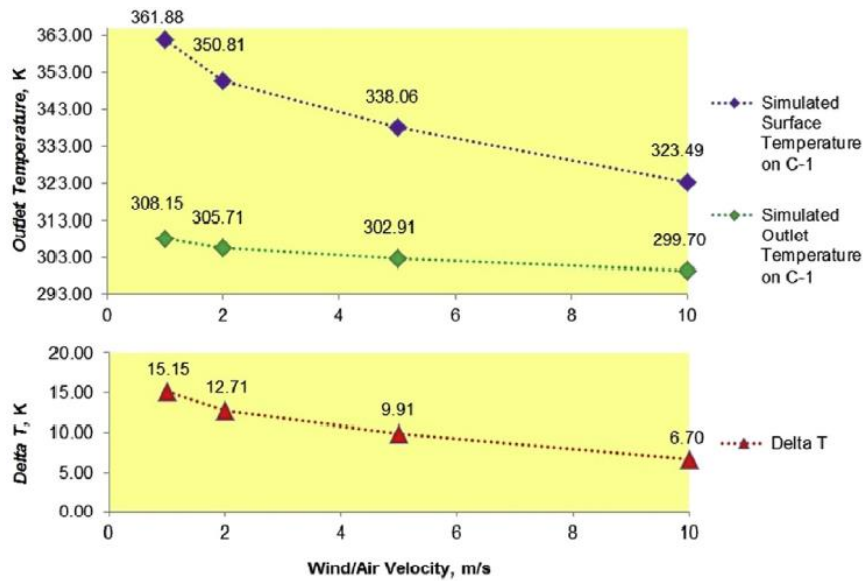
29. ábra: Beépítettség hatása a burkolat hőmérsékletére (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015)



30. ábra: Az egyes vezetékek feletti hőmérséklet (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015)

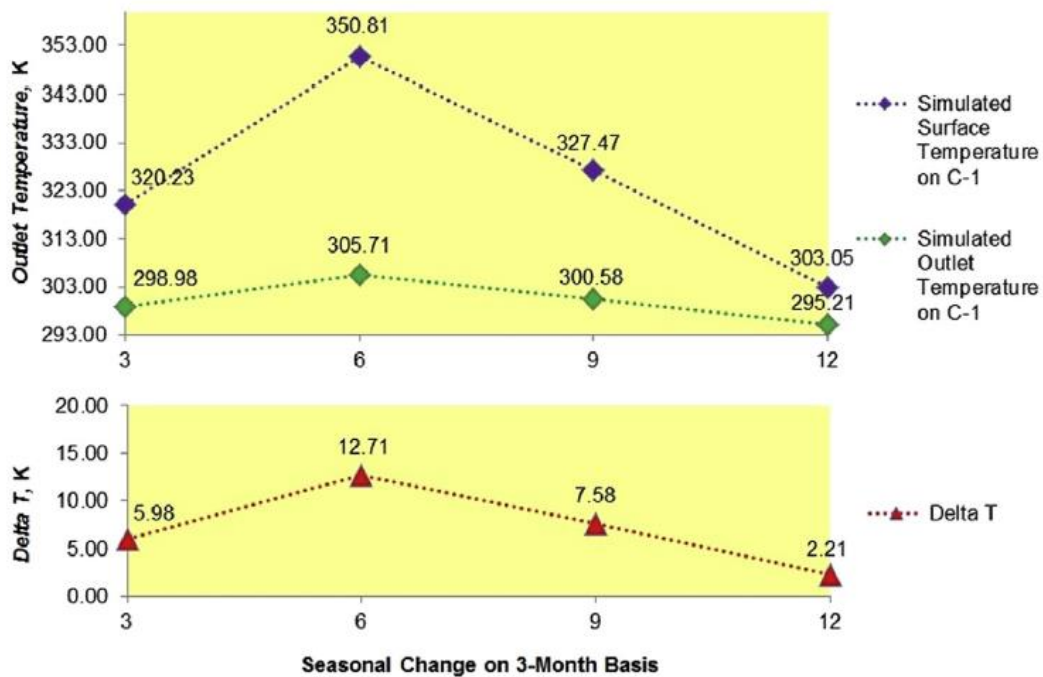
A bemenő víz hőmérséklete minden esetben 20°C volt. A legnagyobb hőmérsékletű területen, tehát az A épület közelében a kimenő víz hőmérséklete 14°C -al, legkisebb esetben 9°C -al nőtt. Átlagosan a beépített környezetben elhelyezett kollektorok 36%-al voltak hatékonyabbak, ennyivel több hőt gyűjtöttek be, mint a beépítetlen környezet. A nyílt környezetben 9%-al csökkent a felület hőmérséklete, míg a beépített esetben 9-14% között volt a csökkentő hatás.

A szélsébség hatásának vizsgálatokor a 31. ábrán látható összefüggéseket tapasztalták. Az eredmények az utcaszakasz tengelyében, a C-1-es vezetékben mért értékeket mutatják. Függetlenül a hőmérséklet, illetve hőmérséklet-változás, vízszintes tengelyen a szél sebessége került feltüntetésre. Látható, hogy a felszín hőmérséklete (lila vonal) majdnem 40°C -ot csökken, ha a szélsébség 1 m/s -ról 10 m/s -ra növekszik. A vezetékbe beáramló és kiáramló víz hőmérséklet különbsége nagyjából $8,5^{\circ}\text{C}$ -al csökken.



31. ábra: Hőmérséklet alakulása a szélesség függvényében (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015)

Az évszakokra vonatkozó mérés eredményei a 32. ábrán látható. Mindegyik esetben a hónap 21. napján mért átlagos hőmérséklettel számoltak, és a szakasz tengelyében lévő vezetéknél mért eredményeket vizsgálták. Függőleges tengelyen a hőmérséklet, valamint a hőmérsékletváltozás, vízszintes tengelyen a 3. 6. 9. 12. hónapot ábrázolták. Látható, hogy kétségtelenül a nyári viszonyokban a legnagyobb a hőmérséklet, illetve a legnagyobb a hőmérséklet változása a kiáramló és a beáramló víz között. Szeptemberi hónapra a felszín hőmérséklete 30%-al, decemberre 62%-al, márciusra 40%-al csökken.



32. ábra: Hőmérséklet alakulása az évszakok függvényében (forrás: D. S.N.M. Nasir et al. 2015)

3.3 Összefoglalás és konklúzió

Az aszfalt kollektorok használata egy alternatív lehetőség a napenergia, mint megújuló energiaforrás felhasználására. A kialakított rendszerrel nyáron a napsugárzás befogásával hőenergiát nyerhetünk meleg víz formájában, amelyet akár későbbi célra is elraktározhatunk. A [2] tanulmányban 69 nap alatt 2821 kWh energiát tároltak el a 96 m²-es tesztszakaszon, amely nagyjából megegyezik egy 2 fős háztartás éves energiafogyasztásával. A [8] tanulmányban a legnagyobb elért hőelnyelés 258 W/m² volt, ez nagyjából a legnagyobb napsugárzás negyede.

A vezetékekben folyó víz hűti a pályaszerkezetet, ami élettartam növekedést jelenthet, és így a városi levegő hőmérsékletét is mérsékli. A [2] kutatásban láthattuk, hogy a kollektoros burkolat hőmérséklete 6°C-al volt alacsonyabb a hagyományos burkolaténál.

Mindezek mellett téli csapadékos időszakban a burkolat hőmérsékletének növelése is lehetséges. A [2] tanulmány alapján 2-4°C-al is növelhető a burkolat hőmérséklete, aminek eredménye képen a hőmérséklet fagypont felett volt az egész nap. 4 cm vastag hóréteget a [9] tanulmányban nagyjából 6 óra alatt olvasztott fel a rendszer 25°C-os víz használatával. Ezzel a módszerrel tehát csökkenthető az útszázás mértéke.

Láthatjuk, hogy a kollektoros rendszernek számos felhasználási lehetősége van. Ugyanakkor azt is kimutatták a [2], és [8] tanulmányban, hogy a hőelnyelésre vonatkozó hatásfoka nem haladja meg a 27-34%-ot. Néhány paraméter változására igen érzékeny a rendszer. Felhők hatására néhány fokos lehűlés jöhet létre a levegő hőmérsékletében, és ezzel a napsugárzás 500-600 W/m² is csökkenhet a [8] tanulmány alapján. A fektetési mélységet 9 cm-ről 15 cm-re növelve az elnyelt hő mennyisége 100 W/m²-rel csökkenhet [8]. Továbbá, ahogyan a [10] tanulmányban láthattuk, a beépítettségnek is nagy szerepe van. Nyílt környezetben a szabad légmozgás miatt akár 24°C-al csökken a burkolat hőmérséklete, és így a beépített környezetben alkalmazott kollektorok 36%-al több hőt gyűjtenek össze. Továbbá kimutatták, hogy ha a szélsébség 1 m/s-ról 10 m/s-ra nő, a felület hőmérséklete akár 40°C-al is csökkenhet.

Egyik tanulmányban sem volt megemlítve a rendszer talán egyik legnagyobb hátránya. Ugyanis az útépitésben manapság modern terítőgépekkel építik az útburkolatot, amelyek működésével a beépítési helyszínen lévő lefektetett csővezetékek jelenléte igen körülményesen hozható össze. Az évek során gyakori tapasztalat a burkolat elhasználódása, kopása, kátyúk kialakulása és nyomvályúsodás. Vitathatatlan, hogy egy-egy ilyen felületi hiba jelentős károsodást okozhat a vezetékekben, amelyekben a folyamatosan folyó víz további veszélyes helyzetet generálhat. Végül, de nem utolsó sorban az aszfalt burkolatok felújítása során gépek segítségével marják fel a felsőbb rétegeket. Különösebb magyarázat nélkül megállapíthatjuk, hogy a fémvezetékekre ez nincs jó hatással.

További kutatásra ajánlott az aszfalt kollektoros rendszer gazdasági elemzése, a beruházási, fenntartási költségeinek, valamint a megtérülési idejének felmérése, vizsgálata. A városi beépítettség, a napsugarak által sokat ért felület és szélcsatornák függvényében érdemes volna olyan tanulmányt készíteni, ahol ez a rendszer hatásfoka a legmagasabb. Továbbá a számítógépes szimulációk készítése folyton szükséges tevékenység, és így az a törekvés, hogy a valósághoz minél közelebb álló modell kerüljön felállításra.

Felhasznált irodalom

- [2] Z. Zhou; X. Wang; X. Zhang; G. Chen; J. Zuo; S. Pullen 2014: Effectiveness of pavement-solar energy system: An experimental study
- [8] Q. Gao; Y. Huang; M. Li; Y. Liu; Y.Y. Yan 2010: Experimental study of slab solar collection on the hydronic system of road
- [9] M. Chen; S. Wu; H. Wang; J. Zhang 2011: Study of ice and snow melting process on conductive asphalt solar collector
- [10] D. S.N.M. Nasir; B. R. Hughes; J. K. Calautit 2015: A study of the impact of the building geometry on the thermal performance of road pavement solar collectors

4. Burkolat hőenergiájának felhasználása napelemekkel

4.1 Napelemes rendszer elterjedése

A napelemek egyre nagyobb mértékben használatban lévő mód a napsugárzás hasznosítására. Míg 2005-ben a napelemek globális szinten 5 gigawatt energiát állítottak elő, 2015-re ez az érték elérte a 230 gigawattot⁹, amely nagyjából 115 Paksi Atomerőmű teljesítményével ér fel. Jelenleg a napelemek 20-25%-át képes a napenergiának hasznosítani. 1 m² felületű napelem tehát legjobb esetben 200 W teljesítménnyel tud energiát termelni, azaz ez egy óra alatt 200 Wh, tíz négyzetméter 2,0 kWh, egy év alatt ez 17 500 kWh, amely nagyjából négyszer akkora, mint egy átlagos magyar 4 fős háztartás éves fogyasztása. Laboratóriumi keretek között a legnagyobb elért hatásfok 46% volt. Németországban a 2015-ös évben az elektromos áram fogyasztás 7%-át a napelemek szolgáltatták. Áruk az utolsó 5-6 évben kezdett nagymértékben csökkenni, míg 2008-ban 3 \$/watt felett volt az ára 2015-re ez majdnem hatodára, 0,57 \$/watt-ra csökkent.¹⁰

Miért is érdemes foglalkozni a napelemekkel? A manapság használt fosszilis tüzelőanyagok elége felelős az üvegházhatású gázok 50%-áért. A napenergia felhasználásának térnyerése így tehát a felére csökkentené az üvegházhatást, ami a globális felmelegedésért felelős. Az elektromos autók elterjedése megállíthatatlan folyamatnak tűnik az utóbbi évek tendenciájából kiindulva. A napelemek használatával kinyert elektromosság környezetbarátabb feltöltési módszer lehetne a járműveknek, amik 2015-ös adatok alapján csak az Egyesült Államokban naponta 1,453 milliárd liter üzemanyagot fogyasztottak.¹¹ A hagyományos járművek üvegházhatású gázok kibocsájtása további 25%, így összességében a napelemes burkolatok az elektromos járművekkel 75%-al csökkentené a káros gázok kibocsájtását.

Útburkolatokon való alkalmazása, leginkább a megfelelő mechanikai, és teherbírási követelmények hiánya miatt kezdeti stádiumban van. Kevesebb tanulmány is vizsgálja az alkalmazását, mint az eddig tárgyaltaknál, ugyanis a napelem drága, és főleg nagyobb cégek engedhetik meg, hogy a kutatói részlegük foglalkozzanak a fotovoltaiikus anyagokkal.

4.2 Fotovoltaiikus rendszer működése

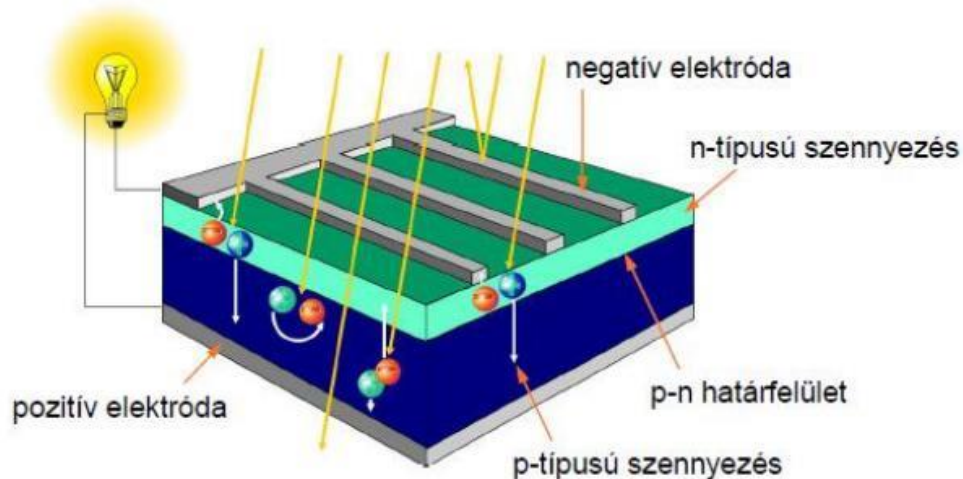
A napelem cella két különböző, egymással összekapcsolt, vékony rétegű félvezető anyagot tartalmaz. Az egyik félvezető a p-típusú (pozitív) szennyezést, a másik az n-típusú (negatív) szennyezést kap. Ezek a félvezetők általában szilíciumból készülnek, de készülhetnek más anyagokból is. A szilícium - stabilitásából adódóan - elméletileg korlátlan ideig változatlan marad, így igen alkalmas ilyen célokra történő alkalmazása. Az n-típusú félvezetők kristályos szilíciumból készülnek, amelyet igen kis mennyiségű foszforral szennyeznek. A szennyezési eljárás által az anyag a rácskötésekben nem résztvevő szabad elektronokkal fog rendelkezni, és éppen ezért lesz ez a negatív félvezető. A p-típusú félvezetők is kristályos szilíciumból készülnek, melyet kis mennyiségű bórral szennyeznek, és ezáltal elektronhiány lép fel benne,

⁹ Frankfurt School- UNEP Centre, GLOBAL TRENDS IN RENEWABLE ENERGY INVESTMENT 2016

¹⁰ The IHS Technology Solar Team, Top Solar Power Industry Trends for 2015

¹¹ <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=23&t=10> Látogatás ideje: 2016. október 27.

és ezen elektronhiányok („lyukak”) miatt lesz a pozitív félvezető. A két ellentétes szennyezésű réteg összeillesztésénél a lyukak és az elektronok semlegesítődnek („rekombinálódnak”) s ekkor közöttük feszültség jön létre.



33. ábra: Napelem működése (forrás: <http://nvsolar.hu/a-napelemek-mukodese>)

A napelemre eső napfény energiával rendelkező részecskékből, fotonokból áll. Amikor a megfelelő hullámhosszúságú fény a napelemre esik a pozitív, és a negatív tartomány közötti semlegesített zónába nyelődik el, akkor a fény fotonjai energiájukat átadják az anyagban az elektronoknak, amelyek szabaddá válnak, és vándorlásuk által vezetik az áramot. Az elektronok helyén az anyagban „lyukak” keletkeznek, amelyek szintén képesek elmozdulni. Amikor a fotonok gerjesztik az elektronokat, a kiugrott elektronok a negatív, a lyukak a pozitív oldal felé fognak áramolni, így jön létre az elektromos tér és az ebből adódó feszültség.

Ha a napelemhez külső áramkört kapcsolunk, akkor a mozgó elektronok a félvezetőn át a cella tetején lévő fém csatlakozó felé áramolnak, míg a „lyukak” ellentétes irányba, a cella alján lévő fém csatlakozó felé, ahol feltöltődnek elektronokkal a külső áramkör másik oldaláról (a cella tetejéről). Ezt a feszültséget a belső elektromos mező (amely a p-n kapcsolódás helyén jön létre) termeli.

A háztartásokban a napelemes részét képezi továbbá az inverter, amely a napelem által generált egyenáramot váltóárammá alakítja át.

Különböző típusú napelemet különböztetünk meg alapanyaguk szerint. Ezek a 10. táblázatban láthatóak.

Kristályos napelem	Monokristályos napelem: Jelenleg legnagyobb hatásfokú (15-17%), élettartama 30 év.
	Polikristályos napelem: Hatásfoka 10-13%, élettartama 25 év körül van.
Amorf napelem	Olcsó előállítási költség, 4-6% körüli hatásfok, élettartamuk 10 év körül van
Vékonyréteg napelem	Gyorsan fejlődnek, hatásfokuk még 5-8%, olcsóbb, mint a kristályos típus.
Egyéb napelemek	biohibrid napelem, eltemetett kontaktusú napelem, kadmium-tellurid alapú napelem, koncentrált napelem, réz-indium-gallium-szelenid napelem, festékanyaggal érzékenyített napelem, gallium-arszenid és a germánium napelem, hibrid napelem, többrétegű (többátmenetes) napelem, nanokristályos napelem, organikus napelem, Perovszkit napelem, Fotelektrokémiai napelemek, plazmonikus napelem, műanyag napelem, polimer napelem, Quantum pontos napelem, wafer napelem

10. táblázat: Napelemek típusai (forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell)

4.3 Napelemes burkolatú technológiák

Solar Roadways

A Solar Roadways nevű amerikai céget két Egyesült Államokbeli házaspár alapította 2006-ban. Az ország úthálózata igen fejlett, és így a fenntartása igen költséges. Ha az összes úton napelemes burkolat lenne, háromszor annyi energiát termelnének, mint az ország elektromos áram fogyasztása. Így a cég a közlekedésért felelős minisztériumtól is kiemelt támogatásokat kap.

A cég terméke hatszög alakú 0,4 m² területű napelemes panel, amely a fotovoltikus alkotókon kívül LED lámpákat, és fűtő elemeket is tartalmaz. Ezen felül minden panelben van egy mikroszámítógép, amelyek segítségével képesek egymással, a központi irányító rendszerrel, és a járművekkel kommunikálni. Így nemcsak energiát szolgáltat, de egy intelligens útfelületet is létrehoz, amely nem igényel felfestéseket, és valós idejű jelzéseket, üzeneteket küld a járműben utazóknak. A fűtő elemekkel a hó-, és jégréteget lehet felolvasztani. A felület speciális üvegből készült, amely bírja a nehézgépjárművekből adódó terhelést is 113 tonnáig, tartós, és megfelelő az érdessége. A keménységi skálán, ahol az aszfalt 1,3-a értéket vesz fel, az acél 4,5-öt, ez az üveg 5,5-6,0-os keménységnek felel meg. Az aszfaltburkolattal ellentétben nem alakulhat ki kátyú. Cseréje egyszerű, hiszen egy elem csak 45 kg. Tervezési élettartamuk 20-30 év között van. Hatásfoka megközelítőleg 18%, 230 W/m² a teljesítménye. Figyelembe véve az Egyesült Államokban lévő útburkolatok nagyságát, és hogy egy nap nagyjából 4 órán át tart a napsugárzás csúcserőteke arra jutottak, hogy egy évben 22 966 Milliárd kWh elektromos energiát tudnának előállítani, ha az utakat napelem fedné. Ugyanakkor az utak gyakran lejtnek, így a panelek elhelyezkedése nem teljes mértékben irányul a nap felé. Emiatt egy 30%-os veszteséggel számolnak, és így nagyjából 15 000 milliárd kWh energiát tudnának előállítani csak az Egyesült Államokban. Összehasonlításként a világ elektromos áram fogyasztása 2013-ban 20 269 milliárd kWh

volt.¹² Jelenleg városi utakra, parkolófelületekre, gyalogos utakra, játszóterekre, és egyéb kis terhelésű felületekre tervezik, de a jövőben autópályákra is kiterjesztenék.



34. ábra: Solar Roadways (forrás: www.solarroadways.com)

Wattway

A Wattway a francia multinacionális cég, a Colas találmánya. Fejlesztése a 2005-ös év óta zajlik. A szerkezet hasonló módon az előbb bemutatottakhoz megfelelő teherbírással, érdességgel bíró elem, amelyből 20 m² elég egy családi ház energia szükségletének kielégítésére. Kialakítása eltérő a Solar Roadways-hez képest, ahogy a 35. ábrán is láthatjuk. Mindössze pár mm vastag, üveg nélküli, rendkívül kifinomult, fejlett technológia. 15 cm széles polikristályos blokk alkotja, amelyet egy többrétegű anyag burkol. A felület érdességét az aszfalt burkolathoz hasonlóan alakították ki. Természetesen a rendszerrel az elektromos járművek is tölthetők lesznek, és a közúti jelzésrendszer elektromos ellátása is lehetséges. Különbség az előző napelemes burkolathoz képest, hogy itt nincs beépített LED világítás. A fejlesztők még dolgoznak azon, hogy a Wattway ára csökkenjen, igyekeznek 6 Euró/watt alá vinni. 2016 óta különböző méretű, környezetű, terhelésű próbaszakaszokat hoztak létre, amelyek működését folyamatosan megfigyelik.

¹² <https://www.eia.gov/beta/international/> Látogatás ideje: 2016. október 14



35. ábra: Wattway (forrás: www.wattwaybycolas.com)

4.4 Összefoglalás, konklúzió

Az utóbbi évtizedben a napelemek használata rohamos ütemben terjed. Lényegük, hogy a napsugárzás hatására elektromos áramot termelnek. Használatuk általában épületek tetején, mezőkön jellemző. Hatásfokuk a kialakításuktól függően eltérő, maximális esetben 20-25%, de laboratóriumi keretek között 46% volt a maximális érték. Egy panel átlagosan 200-250 watt teljesítményű.

Útépítésben jelenleg két nagy technológia ismert, az Egyesült Államokban gyártott Solar Roadways, valamint a francia Wattway. Kialakításuk kis mértékben különbözik, de a napenergia átalakítása ugyanazon az elven alapszik. Számításaik alapján az utak napelemmel való burkolása megoldást jelentene a világ elektromos energia ellátására.

Bár a napelemes burkolat rendkívül hasznosnak tűnik, és nem lehet kétségbe vonni technológiai újítását és nagyszerűségét, a gyártó kevésbé objektívan bírálja a saját termékét, mint ahogyan egy tudományos kutatásban lenni szokott. Először is egy panel költsége nagyjából 7000 \$ (~2 millió Ft)¹³, így jóval több ideig tartana a megtérülése, mint egy átlagos napelemes modulé. Ebből adódik, hogy meghibásodás esetén sokkal nagyobb a javítás, vagy a csere költsége. Ezért egyelőre kisebb felületek kialakítását támogatják a cégek.

Másrésről a tartóssága, teherbírása megkérdőjelezhető. A közúti rendszerben a járművek statikus hatása mellett a dinamikus terhelés jelentősen megnöveli az igénybevételeket. A nagyobb balesetek tovább növelik a sérülés kockázatát. Egy-egy ilyen meghibásodás a napelemektől függő jelzésrendszere, az elektromos autók töltője, esetleg a hálózat többi részére is kihathat.

A félvezető anyagok alkalmazása jelenleg még kezdeti stádiumban van így azok használatát érdemes vizsgálni. Láthattuk, hogy nagy számban vannak olyan anyagok, amelyek elektromágneses hullámmal hatására áramot indukálnak. Hasznos lehet a hagyományos aszfalt burkolat és a félvezetők kapcsolatát vizsgálni.

¹³ <http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-panel-highway2.htm> Látogatás ideje: 2016. október 3.

Felhasznált irodalom:

Dr. Mizsei J. 2003: Napelemek egyetemi segédlet

<http://nvsolar.hu/a-napelemek-mukodese/> Látogatás ideje: 2016. október 22.

https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell Látogatás ideje: 2016. október 22.

Solar Roadways: www.solarroadways.com Látogatás ideje: 2016. október 27.

Wattway: <http://www.wattwaybycolas.com/en/> Látogatás ideje: 2016. október 27.

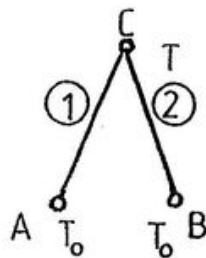
5. Burkolat hőenergiájának hasznosítása termoelektromosság használatával

Az útburkolatban fellépő hőenergia hasznosítására egy alternatív lehetőség lehet a termoelektromos jelenségek alkalmazása. A termoelektromosság, vagy hőelektromosság lényege, hogy hőmérséklet különbség hatására elektromos feszültség jön létre. A jelenséget elsőként Thomas Seebeck fedezte fel 1821-ben, amely kapcsán négy hatást szoktak elkülöníteni.

5.1 Fizikai jellemzők ismertetése

Seebeck-hatás

Ha az A és B pont T_0 hőmérsékleten van és C pont hőmérséklete T , ($T \neq T_0$) az A és B pont között U feszültséget mérhetünk, mindaddig, amíg a hőmérséklet különbség fennáll. Azt a feszültséget, amely 1 K hőmérsékletkülönbség hatására így létrejön (V/K), termoerőnek nevezik, amelynek nagysága függ két anyagtól, és a hőmérséklet különbségtől. A 36. ábrán láthatjuk a Seebeck-hatás elméletének rajzát.



36. ábra: Termoelektromos effektusok rendszerének ábrája (forrás: <http://fizipedia.bme.hu>)

A hőmérséklet különbség hatására létrejövő termofeszültség:

$$U = \alpha \cdot (T - T_0)$$

Ahol α az érintkező vezetők tulajdonságaitól függ, úgynevezett Seebeck együttható.

A két anyag célszerűen félvezető, ugyanis ezek vezetőképessége gyengébb, így a hőmérséklet különbség fenntartható.

Peltier-effektus

Jean Charles Athanase Peltier a Seebeck-effektus fordítottját fedezte fel 1834-ben. Ha az említett áramkörbe áramot vezetünk az egyik forrasztási hely hőt ad le, a másik hőt vesz fel, azaz hőmérséklet különbség alakul ki. Az egységnyi idő alatt felszabaduló vagy elnyelt hőnek megfelelő hőtéljesítmény (P_P) arányos az I árammal:

$$P_P = \frac{dQ}{dt} = \pi I = \alpha T I$$

Ahol π a Peltier együttható, α a Seebeck együttható, T az abszolút hőmérséklet.

Thomson-effektus

Ha egy homogén vezető mentén hőmérséklet különbséget hozunk létre, és ezen a vezető elektromos áram folyik keresztül a hőmérsékleti gradiens felé, akkor az áram és a hőmérséklet gradiens irányától, valamint a vezető anyagától függően hő szabadul fel, vagy nyelődik el. Az időegység alatt a vezető egységnyi hosszúságú részében fejlődő Thomson-hő arányos az áramerősséggel és a hőmérséklet gradienssel:

$$P_T = -\tau \frac{dT}{dx} I$$

Ahol τ a vezető anyagától és a hőmérséklettől függő előjeles mennyiség, a Thomson-állandó. A Thomson-hő pozitív előjelű – azaz hő szabadul fel –, ha τ pozitív előjelű és az áram a magasabb hőmérsékletű hely felől az alacsonyabb hőmérsékletű hely felé folyik.

Joule-hő

Az árammal átjárt vezetőben hő szabadul fel: az úgynevezett Joule-hő. A Joule-törvény értelmében a teljesítmény (P_J), ha R ellenállású vezetőn I áram folyik:

$$P_J = I^2 R$$

5.2 Peltier-elem működése

A Peltier és Seebeck effektusok reprodukálására Peltier-elemet, használnak. Egy p-típusú (elektronhiányos atomokkal szennyezett) és egy n-típusú (elektron többlettel rendelkező atomokkal szennyezett) félvezetőt összekötünk, az átfolyó elektromos áram hatására az átmenetnél energiahiány keletkezik, ha az elektronáram egy alacsonyabb potenciájú félvezető oszlopból egy nagyobb potenciájúba lép át. Az így létrejövő energiahiány pedig hőfelvételhez vezet, azaz hűtőhatást eredményez. A Peltier-elem felhasználható a Peltier-effektus inverzére, a Seebeck-effektus létrejöttéhez. Azaz hőmérséklet különbség hatására a csatlakozási pontoknál feszültség jön létre. A Peltier-elem hatásfoka az előállított elektromos energia és az átáramló hőenergia hányadosaként definiálható.

A modulban az alábbi folyamatok játszódnak le:

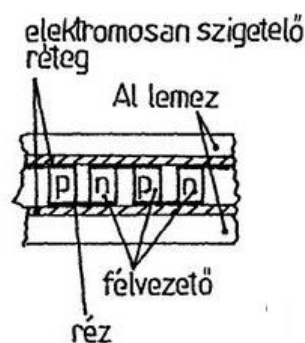
- Az áram irányától függően a Peltier-effektus miatt az egyik oldalon az átmenetnél hő nyelődik el (hideg oldal, T_0 hőmérsékleten), másik oldalon hő szabadul fel (meleg oldal, T_1 hőmérsékleten). Vagy ennek fordítottja, a Seebeck-effektus játszódik le.
- A Thomson-effektus következtében a félvezető elemek anyagától (és az áramiránytól) függően az elem belsejében hő szabadul fel vagy nyelődik el. Ez a Peltier-elem két felületén egyenlő mértékű.
- A Joule-hő következtében az elem belsejében hő fejlődik.

- A hővezetés eredménye egy a meleg oldalról a hideg oldal felé történő hőáramlás. Így tehát ez rontja a modul teljesítményét. Ennek mértéke:

$$P = \lambda * A * dT / d$$

Ahol: λ - hővezetési együttható,
 A - az elem felülete,
 d - elem vastagsága,
 dT - hőmérséklet különbség.

Az átmenetek két alumínium lemezhez csatlakoznak, jó hővezető, de elektromosan szigetelő réteggel (37. ábra). Az alumínium lemezek közül az egyik (a meleg oldal) T_1 hőmérsékleten, míg a másik (a hideg oldal) T_0 hőmérsékleten van.



37. ábra: Peltier-elem felépítése (forrás: <http://fizipedia.bme.hu>)

A rendszer teljesítményét két tényező is csökkenti. Az egyik ok, hogy a félvezető oszlopok nem hőszigetelők. Ezért hőáram folyik vissza rajtuk, amely mértékét a félvezetők mérete, és hővezetési tényezőjük befolyásol. Ez a veszteség annál nagyobb, minél nagyobb a két oldal hőmérséklet különbsége. A másik veszteséget a félvezetőkön áthaladó áram hőhatása okozza, azaz a Joule hő. A félvezetőeknek ugyanis van egy ellenállása, amelyet a méretük és a villamos vezetőképességük mértéke befolyásol. Így tehát hő keletkezik a félvezetőkből, amely hő egyik része a meleg oldalt, másik része a hideg oldalt terheli, és így szintén teljesítmény veszteség jön létre. A nagyobb hatásfok érdekében a félvezető anyagnak nagy termoerőt kell szolgáltatniuk, kis hővezető tényezőjük és nagy villamos vezető képességük kell, hogy legyen. További befolyásoló tényező a félvezetők geometriai mérete. Egy adott keresztmetszetű félvezető oszlop ellenállása, és így a rajta átfolyó áram hatására keletkezett hőveszteség annál nagyobb, minél hosszabbak az oszlopok. A két oldal közötti hőátvezetés miatt keletkező veszteségek viszont ellenkező értelemben változnak, vagyis csökkennek, ha a távolságot növeljük. Meg kell találni tehát az optimális geometriai méreteket, ahol a veszteségek összege a legkisebb.

A Peltier-elem felhasználása a számítástechnikában, a legelterjedtebb, ahol a mikroprocesszorok hűtését oldja meg a rendszer. Használják továbbá autós hűtőknél. Előnye, hogy nem tartalmaz mozgó alkatrészt, kis helyigényű, és gyakorlatilag végtelen élettartalmú. Hátránya, hogy termoelektromos generátorok jelenleg nagyjából 7% hatásfokúak, és a felhasznált fémek igen költségesek.

5.3 Elektromos energia létrehozása Peltier-elemmel

A Peltier-elemmel foglalkozó tanulmányok többségében hőmérséklet különbség előállítását, és az anyagok hővezetési és egyéb tényezőinek megállapítását vizsgálják, csak kevés foglalkozik a hőmérséklet különbségből nyerhető energiával.

A Seebeck-effektus kihasználására a Peltier-elemek hatásfoka a termelt villamos energia és a modulon áthaladó hőenergia hányadosából számítható, nagyjából 1-3% értéket vesz fel. Így használata nem terjedt el, csak laboratóriumi kísérletek folynak.

A [11] tanulmányban aszfaltba épített Peltier-elem hatékonyságát vizsgálták laboratóriumban. Az modul két oldala között 20°C-os hőmérséklet különbséget generáltak, amellyel mindössze 50 μ W teljesítményt tudtak kifejteni.

5.4 Összefoglalás, konklúzió

A termoelektromos hatás folyamán hőmérséklet különbség hatására elektromos feszültség indukálódik. Útépítésben, ahogyan a 2.2.1 *Hőmérséklet az aszfalt burkolatban c.* fejezetben láthattuk, a burkolat felső 10 centiméterében maximum 15-20°C-os hőmérséklet különbség lép fel, amely hatására nagyjából 50 μ W energiát képes a Peltier-elem előállítani. Továbbá a termoelem elhelyezése, ahogyan láthattuk körülményes, fontos a jól megválasztott elem-magasság, hőmérséklet különbség stb. Kis hatásfoka miatt egyelőre nem terjed el a használata. Érdeemes lehet azonban a termoelektromos hatásokat alaposan megvizsgálni az útburkolatban, hiszen kedvező feltételek mellett hatásosan működő rendszert kaphatunk.

Felhasznált irodalom:

[11] G. Wu, X. Yu 2012: Study on Aging Characteristics of Recycled Asphalt Binder Using the Selective Adsorption-Desorption Method

Magony A., Huszti G. 2008: Termoelektromos-effektus gyakorlati hasznosítása TDK

Fizipédia: Félvezető termoelem és Peltier-elem vizsgálata laboratóriumi segédlet

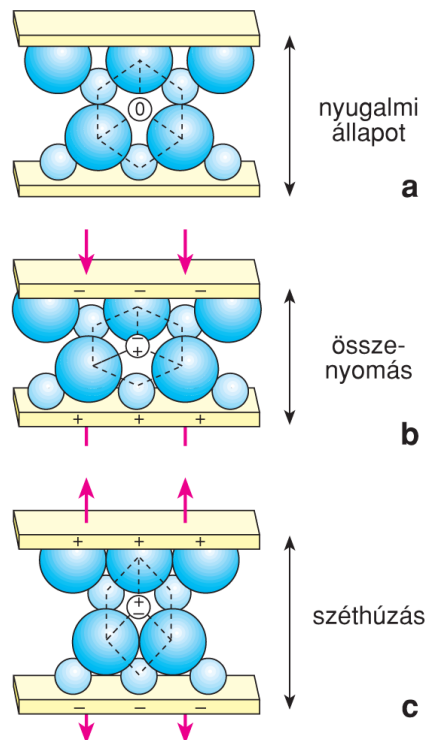
6. Burkolatban keletkező energia kinyerése piezoelektromosság felhasználásával

Az utak nemcsak a napsugárzásnak, hanem a járművek terhelésének is folyamatosan ki vannak téve. Egy-egy nehéztengely áthaladáskor rendkívül nagy feszültség keletkezik a burkolatba. A piezoelektromos anyagok ezt kihasználva nyújtanak alternatív energiaforrást.

6.1 Piezoelektromos anyagok működése

A piezoelektromos hatás lényege, hogy bizonyos anyagokon mechanikai deformáció hatására elektromos töltés keletkezik. A jelenséget 1880-ban fedezte fel Pierre Curie és Jacques Curie. Piezoelektromos tulajdonsággal rendelkezik például a kvarc, turmail, Rochelle só, amelyek meghatározott tengelye mentén alkalmazott nyomás elektromos töltések megjelenését okozza a kristály felületén, azaz a kristály polarizálódik. A jelenség fordítottja is létezik: a kristályszerkezetben elektromos feszültség hatására alakváltozás jön létre.

A 38. ábrán láthatjuk piezoelektromos anyagokban lejátszódó folyamatot nyomás, illetve húzás hatására. A kristályok deformációja során a kationok és anionok vagy a dipólusok egy kicsit aszimmetrikusan eltolódnak és dipólusok keletkeznek. Ez eredményezi a felületen már kimutatható polarizációs töltést. A kristály ionjai ugyan nem mozdulhatnak el, de a fémfóliában a megosztás révén létrejött töltések már szabadon mozoghatnak.



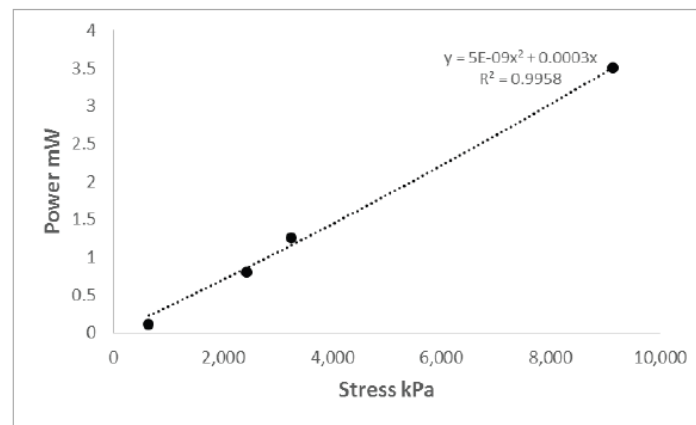
38. ábra: Piezoelektromos kristályok működése (forrás: <http://hirmagazin.sulinet.hu/hu/tudomany/a-piezoelektromossag>)

A piezoelektromos anyagok alkalmazásának területei:

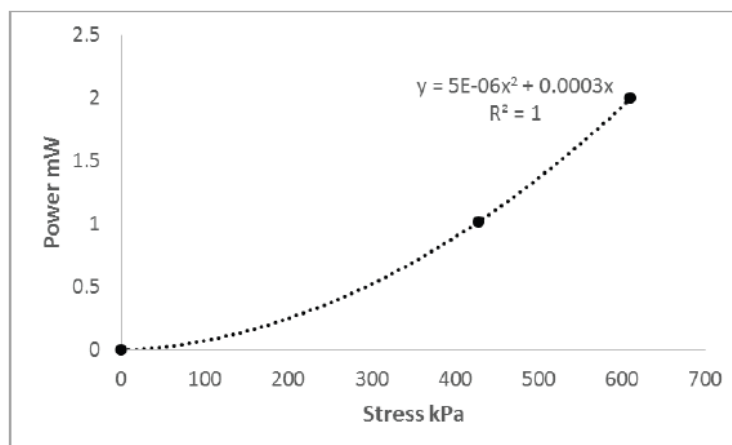
- feszültség és nyomásmérés
- mechanikai rezgések érzékelése
- ultrahangforrások
- bakelit hanglemezek hangszedője
- kristály-mikrofon
- tintasugaras nyomtatási technológia
- piezoelektromos szikragyújtók (öngyújtó, gázgyújtó)

6.2 Tanulmányok és eredmények

A [12] tanulmányban két típusú piezoelektromos modult vizsgáltak. Az I. típusúban 25 darab, másikban 6 darab piezoelektromos elemet helyeztek. A modulokat a burkolat felszíne alatt 5 cm-re helyezték el. A terhelés és az előállított energia összefüggése az alábbi ábrákon láthatóak:



39. ábra: Energia (mW)-terhelés (kPa) összefüggés az I. típusú modulnál (forrás: A.T. Papagiannakis el al. 2016)



40. ábra: Energia (mW)-terhelés (kPa) összefüggés az II. típusú modulnál (forrás: A.T. Papagiannakis el al. 2016)

Látható, hogy a II. típusú modullal kisebb terhelés hatására elérték ugyanazt a feszültséget, hiszen itt egy elemre nagyobb terhelés jutott, nagyobb volt az összenyomódása. Az első esetben lineáris, a második esetben négyzetes közelítést alkalmaztak.

A mért értékekből a 11. táblázatban feltüntetett értékeket számolták ki.

	I. típusú modul	II. típusú modul
személygépjármű kerékterhelésből (6,6kN) adódó energia (mW)	34,6	93,6
tehergépjármű kerékterheléséből (44,5 kN) adódó energia (mW)	1560	4098

11. táblázat: Modulok által nyerhető energia személy-, és tehergépjármű esetén

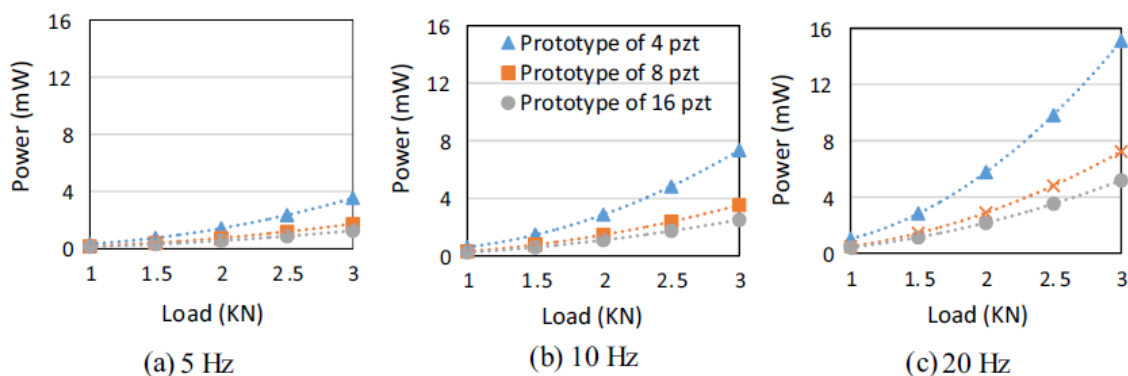
Azt tapasztalhatjuk, hogy a tehergépjárművek terheléséből adódó energia jóval nagyobb 44-45-szöröse a személygépjárművek terheléséből keletkező energiánál. A kevesebb piezoelektromos elemből álló modulnál 2-3-szor nagyobb energia keletkezett.

A [13] tanulmányban laboratóriumi keretek között 0,9 MPa kerékterhelés hatására 16 μ W energiát tudtak előállítani. Ez a nehéz tehergépjárművek terhelésének felel meg. Figyelembe véve, hogy a tehergépjárművek aránya 5 %, a személygépjárművek terhelése 0,2 MPa körül van, a nyerhető energia 4 μ W-ra esik kerékterhelésenként.

A tapasztalt értékekből számolás útján becsülték meg a piezoelektromosság által nyerhető energiát. Egy 100 méteres szakaszon a két keréknyomba elhelyezve ilyen modulokat egy kéttengelyes jármű 0,252 W energiát termelne. Egy 150 ezer jármű/nap forgalmú szakaszon ez 1,65 kWh energiát jelentene. Ezt Madrid egyik legforgalmasabb szakaszára számították, magyar viszonyokra nézve a maximum forgalom 100 ezer jármű/nap körül van (M1-M7 bevezető). Természetesen hosszabb szakaszokra kiterjesztve lényegesen meg lehet növelni ezt az energiamennyiséget, ugyanakkor ennek a gazdasági szempontok nagymértékben korlátot állítanak.

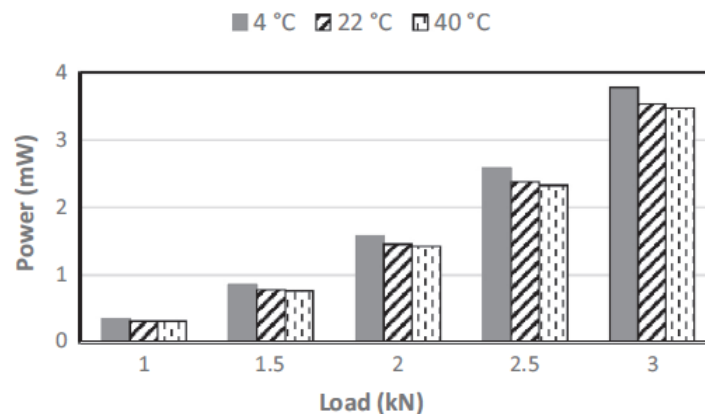
A [14] tanulmányban azt tapasztalták, hogy a terhelés nagyságának, és a ráterhelés frekvenciájának növelésével nő a termelt energia nagysága, mivel csökken a kristályok terhelési ideje (41. ábra).

A piezokristályokat három különböző struktúrában helyezték el. Az egyik modul 4 a másik 8 a harmadik 16 elemet tartalmazott. Azt figyelték meg, hogy kevesebb piezoelektromos elemet tartalmazó modul nagyobb energiát termelt, hiszen egy elemre nagyobb terhelés jutott.



41. ábra: Terhelés (kN)-energia (mW) összefüggése különböző terhelési sebességnél, és modul típusnál (forrás: H. Roshani et al. 2016)

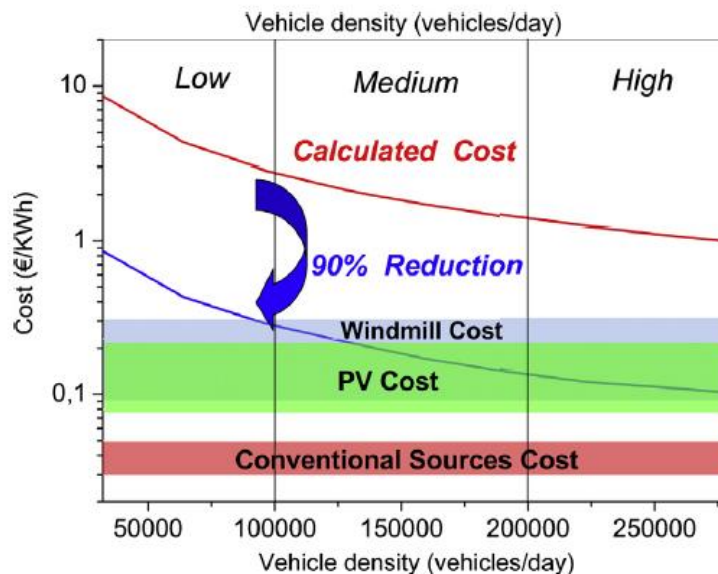
Azt figyelték meg továbbá, hogy alacsonyabb hőmérsékleten nagyobb energia nyerhető ki, de ennek mértéke nem jelentős. (42. ábra)



42. ábra: Terhelés (kN)- energia (mW) összefüggés különböző hőmérsékleteknél (forrás: H. Roshani et al. 2016)

Gazdasági szempontok

A [13] tanulmányban a 43. ábrán jellemezték a költségviszonyokat.



43. ábra: Költségviszonyok (forrás: A. Moure et al. 2016)

Függőleges tengelyen az ár euró/kWh-ban, vízszintes tengelyen a járműsűrűség látható. Szürke, zöld, és piros sávval a szélenergia, napenergia, és hagyományos energiaforrások ára lett jelölve. Piros vonallal láthatjuk a piezoelektromos modulok költségeit a terhelés intenzitásának függvényében. Látható, hogy az ára még bőven meghaladja a jelenleg működő technológiák költségeit. Ugyanakkor úgy kalkuláltak, hogy mint a napenergia is, a piezoelektromos anyagok ára is nagyságrendekkel csökkenhet egy-két évtizeden belül, így az már nagy forgalom esetén megtérülő lehet. Számolásuk alapján a piezoelektromos elemek telepítése egy négyzetméterre 1200 € körül van.

6.3 Összefoglalás, konklúzió

Az utak a termikus sugárzás mellett a mechanikai terhelésnek is jelentősen ki vannak téve. A piezoelektromos anyagokkal az így létrejövő összenyomódásokból elektromos áram állítható elő. Ezeknek mértéke a felhasznált anyagok nagy ellenállása miatt nem haladja meg a $16 \mu\text{W}$ -ot egy tehergépjármű kerékterheléséből, és a piezoelektromos kristályok ára is elég magas. Nagy előnye a korábban tárgyalt rendszerekkel szemben, hogy nem függ a napsugárzás intenzitásától, így az év bármely napján ugyanolyan hatásfokkal működhet. Érdeemes vizsgálni a rendszer működését, hiszen az így keletkezett elektromos energia alkalmas a csomópontok jelzésrendszerének energiaellátására, és az egyre inkább köztudatban lévő intelligens utak részét képezve előállítaná a rendszert működését szolgáló áramot. Látható volt továbbá, hogy a tehergépjárművek hatására fellépő energia lényegesen, 45-ször nagyobb, mint a személygépjárműveknél. Javasolt a buszmegálló, buszsávok és a nagy kamionforgalommal rendelkező útszakaszokon a piezoelektromosság hatásosságának vizsgálata, továbbá a piezoelektromos anyagok tartósságának, és amortizációjának elemzése is.

Felhasznált irodalom:

[12] A.T. Papagiannakis; S. Dessouky; A. Montoya; H. Roshani 2016: Energy Harvesting from Roadways

[13] A. Moure; M.A. Izquierdo Rodríguez; S. Hernández Rueda; A. Gonzalo; F. Rubio-Marcos; D. Urquiza Cuadros; A. Pérez-Lepe; J.F. Fernández 2016: Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting

[14] H. Roshani; S. Dessouky; A. Montoya ; A.T. Papagiannakis 2016: Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study

<http://hirmagazin.sulinet.hu/hu/tudomany/a-piezoelektromossag> Látogatás ideje: 2016. szeptember 30.)

7. Összefoglalás

Az alternatív energiaforrások felhasználásának rohamos elterjedése, és a fenntartható fejlődés irányzat egyre inkább előtérbe helyezése miatt az infrastruktúrában is teret nyer a megújuló energiák feltárása. Az utak nagy kiterjedésű felületek, amelyek a napsugárzásnak, mint kimeríthetetlen energiaforrásnak folyamatosan ki vannak téve. E tanulmány célja igazolni, hogy az aszfalt burkolatokban fellépő hőmennyiség jelentős energiaforrás, amelynek kinyerésével érdemes foglalkozni.

Bemutatásra került a burkolatokban fellépő hőmérséklet eloszlás. A felület a legnagyobb hőmérsékletet a déli órákban éri el, itt akár 60-70°C-os is lehet a felszín. A hőmérséklet alakulását számos tényező befolyásolja, legfontosabb a napsugárzás intenzitása, a levegő hőmérséklete, szél sebessége, árnyékoltság. Ezek kismértékű változása jelentős csökkenést, vagy növekedést okozhat a burkolat hőmérsékletében. A magas hőmérséklet az aszfaltban szerkezeti károsodáshoz vezethet terhelés hatására, továbbá növeli a városi levegő hőmérsékletét. Ezért a különböző befolyásoló tényező változtatásával a burkolat hőmérsékletének csökkentése is fontos feladat az útépitőmérnökök számára.

A napsugárzás hatására az útburkolatban hőenergia keletkezik, amelynek értéke 400-450 W/m² körül van. Ennek egyik felhasználási módja a burkolatba építhető kollektoros rendszer. A vezetékben folyó víz hűti a pályaszerkezetet, alkalmas meleg víz előállítására, és téli hónapokban hőleadó rendszerként is működik. Hőenergia előállítás szempontjából hatásfoka jelenleg 20 % körül van. A napelemes burkolat egy másik lehetőség a napenergia hasznosítására. Ezek a félvezető fotovoltikus anyagok felhasználásával állítanak elő elektromos áramot. Jelenleg két terméket ismerünk a piacon, amelyek működőképes rendszerek, és megfelelő burkolati felületet is képeznek. Hatásfokuk ezeknek sem lépi át a 20%-ot, és az áruk is igen magas. További lehetőség a termoelektromos jelenség alkalmazása, amely során hőmérséklet különbségből áramot állítanak elő. Ennek hatásfoka ugyanakkor nem haladja meg a 3-5 %-ot.

Az útfelületet a napsugárzás mellett a járművekből adódó terhelés is folyamatosan éri. Ennek hasznosítására piezoelektromos kristályokból álló modulokat építenek a burkolatba, amely terhelés hatására feszültséget indukál. Ennek mértéke egy tehergépjármű tengely áthaladásánál 30 μW körül van. Nagy előnye a hőenergiát hasznosító rendszerekkel szemben, hogy egy-egy útszakasz forgalom nagysága az egész évben jelentős, míg a napsugárzás intenzitása leginkább nyáron a déli órákban éri el a maximumot.

Láthatjuk, hogy számos lehetőség adódik a burkolatban keletkező energiák kinyerésére. A rendszerek többsége ugyanakkor még nem terjedt el, használatukat leginkább laboratóriumokban tesztelik. Az elmúlt évtizedben a megújuló energiáknál tapasztalt hatásfok növekedés, és költség csökkenés példáját tekintve bátran feltételezhetjük, hogy az útépitésben alkalmazható elemek ára is csökkenni fog a közeljövőben. Érdemes kitapasztalni addig a technológiák működését, amelyek az energiaszolgáltatás mellett, az intelligens utak rendszerét is képezhetik és így egy önmagát fenntartó közúti üzem létrejöttét eredményezhetik.