



# Villamosított utak életciklus elemzése

## Nádasdi Réka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék

E-mail: [nadasdi.reka@epito.bme.hu](mailto:nadasdi.reka@epito.bme.hu)

### KIVONAT

A már hagyományosnak mondható e-közlekedésnek – mely az elektromos autók használatán alapul – számos hátránya figyelhető meg. Ennek kiküszöbölésére előtérbe kerültek olyan meg-oldások, melyek dinamikus töltési lehetőséget biztosítanak a járművek számára.

A tanulmány életciklus elemzés vizsgálat során hasonlítja össze a három legjelentősebb rend-szert a klímaváltozást befolyásoló hatások tekintetében. Ezek az indukció elvén alapuló IPT, a vezető pálya és a pantográf megoldások.

*Kulcsszavak:* életciklus-elemzés (LCA), fenntarthatóság, IPT, pantográf, SimaPro, vezető pálya, villamosított út

### Nádasdi Réka

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Út- és Vasútépítési Tanszék Ph.D. hall-gatója.  
Kutatási területe a környezettudatosan tervezett útburkolatok és közutak.*

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban sok szó esik a fenntarthatóságról, fenntartható fejlődésről. Építőmérnöki szempontból igen fontos, hogy egy beruházás megfeleljen az elvárt normáknak, és a lehető legkisebb negatív hatást gyakorolja környezetünkre. Minthogy az úthálózat elemei hozzá tartoznak az emberek mindennapi életéhez – legyen szó munkába, iskolába járásról, bevásárlásról vagy egy másik városba történő utazásról – szükséges ezek környezeti optimalizálása.

A technológia fejlődése számos lehetőséget nyújt a környezeti hatások csökkentésére, mint például a hagyományos (HMA) aszfaltok használata helyett mérsékelt meleg aszfaltok (WMA) használatának előtérbe helyezése, vagy éppen az aszfaltburkolatok újrahasznosítása.

Az szintén köztudott, hogy a közúti közlekedés okozza az egyik legnagyobb mértékben az üvegházhatású gázok kibocsátását (European Environment Agency, 2016). Ennek csökkentésére előtérbe került az elektromos autók használata, melyek azonban, környezettudatosságuk mellett, számos hátránnyal rendelkeznek, mint a korlátozott vezetési távolság és akkumulátor-méret, valamint a töltési lehetőségektől és töltésidőtől való függés.

Azonban a fenntarthatóság nem csak a környezeti terhelések csökkentését jelenti. Intelligens Közlekedési Rendszerek (Intelligent Transport System, ITS) tekintetében az úthálózat úgy éri el a megfelelő fenntarthatóságot, hogy az általános utak funkciójához többlet tulajdonságokat adnak, mely azt biztonságosabbá, kényelmesebbé és/vagy energiahatékonyabbá teszi. Ez az extra tulajdonság, többek között, lehet a környezeti energia hasznosítása, az információk út-használóknak történő átadása, járművek közötti kölcsönhatás vagy villamosított töltési lehetőségek elektromos autók számára.

## 2. VILLAMOSÍTOTT UTAK

Az üzemanyag-használat csökkentése, így az utak villamosítása évtizedek óta nagy befolyással bír a közlekedési szektorra. Az első megoldás a felsővezetékhez olyan áramszedőkkel (pantográfokkal) kapcsolódó trolibuszok alkalmazása volt, amelyekből a mozgáshoz szükséges energiát kapja. Ennek alapján felmerült a kérdés, hogyan lehetne ezt vagy ehhez hasonló technológiát az egyéni közlekedésben vagy a teherszállításban hasznosítani, hogy a járművek kisebb kapacitású akkumulátorral is tetszőlegesen hosszú utakat tudjanak megtenni. Ennek érdekében, a kutatók próbálták a felső vezetést az útburkolat felületére, kollektorként áthelyezni. Bár ez a megoldás szintén fizikai érintkezéssel jár, elérhető személyautók számára is. A szabad mobilitás növekvő fontossága miatt azonban előtérbe került olyan megoldások kifejlesztése, melyek fizikai érintkezés nélküli töltési lehetőségeket biztosítottak. Ezek a dinamikus töltési lehetőséget biztosító utak az elektromos autókat fizikai érintkezés nélkül, a Faraday-féle elektromágneses indukció elve alapján töltik. A kutatók jelen álláspontja szerint, az elérhető mód-szerek közül ez a megoldás nyújtja a legalkalmasabb megoldást (Chen, et al., 2014.).

## 3. VEZETŐ UTAK

A fizikai kapcsolatot igénylő töltési lehetőségeknek létezik statikus és dinamikus megoldása is. Az előbbire példa a jelenleg legerjedtebb kábellel történő töltés. Dinamikus töltés megteremtéséhez a kapcsolat más módja szükséges. Ez történhet tehát áramszedő és vezető pálya által (1. ábra).

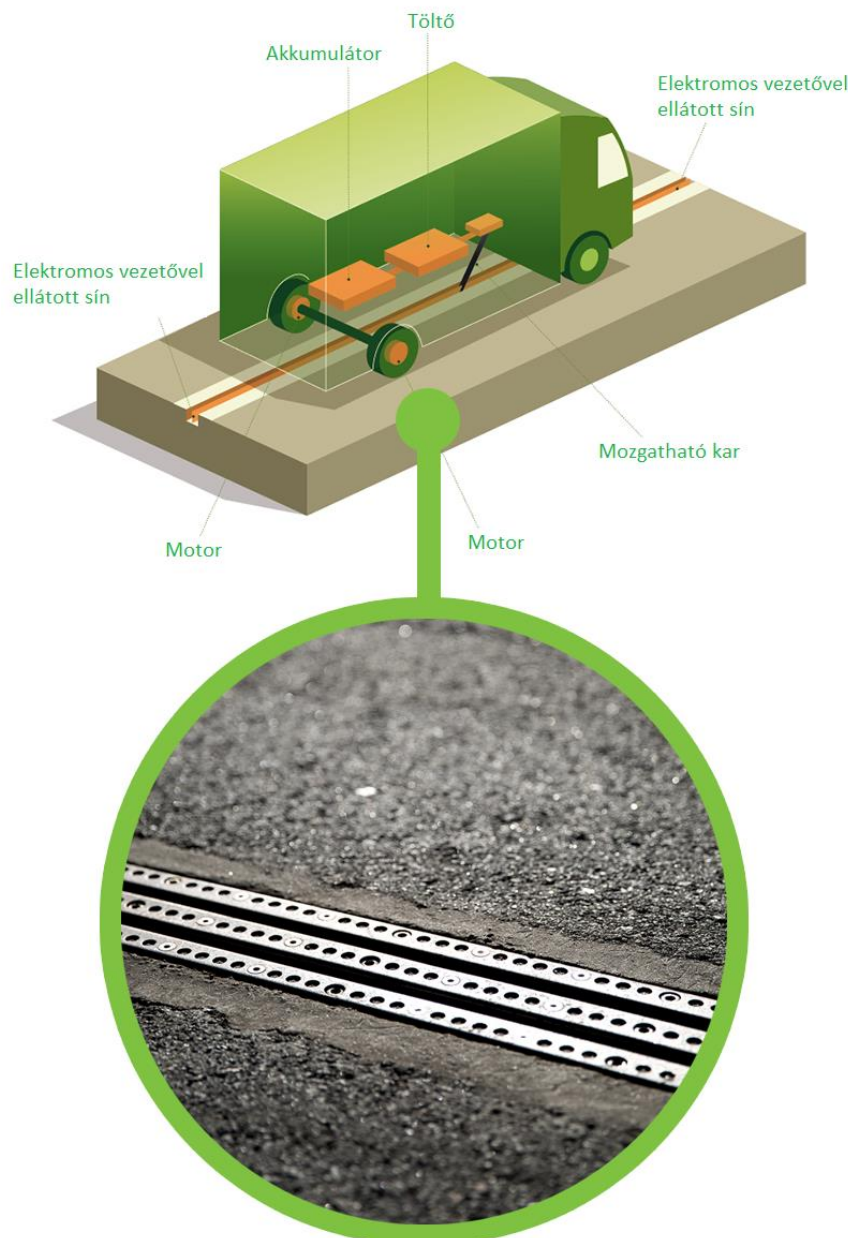


1. ábra: (a) eHighway töltési megoldás, áramszedővel (Siemens AG 2015) (b) eRoad Arlanda vezető pálya. (nordicroads.com 2016)

Áramszedő (pantográf) által megvalósított töltés ötvözi a vasúti technológia erőforrás-hatékonyágát a közúti közlekedés rugalmasságával. Működése a trolibuszokéval hasonló módon történik. A Siemens által megálmodott eHighway-t hibrid tehergépkocsik oly módon vehetik igénybe, hogy azok mozgatható, aktív áramszedő segítségével tudnak egyszerűen és gyorsan a felsővezetékhez kapcsolódni. Az energiát az elektromos motorba, közvetlenül a felsővezetékéről, a pantográf szállítja. A modern áramszedővel a csatlakozás könnyen megtörténhet, akár 90 km/h sebességet elérő mozgás esetén is. A speciálisan kialakított érzékelőknek köszönhetően, a teherautó oldalirányú mozgásának kompenzálására, az áramszedő automatikusan beállíthatja pozícióját (Siemens AG, 2015). A Siemens jelenleg is folyó vizsgálatának keretében Stockholm északi részén, két kilométeres eHighway próbaszakaszt épített ki. A technológia várhatóan 2018-ig a projekt gyakorlati megvalósíthatóságát bizonyítja.

A vezető pálya esetében, az elektromos energia a burkolatba süllyesztett, folytonos sínből származik, melyhez az elektromos járművek pickup rendszer segítségével kapcsolódnak. Ez, mozgatható kar segítségével, a villamos energiát összegyűjti, és az elektromos motorba közvetíti. Amíg a gépjármű a

sín felett közlekedik, a mozgatható kar lefelé áll. Amikor a járműnek előznie kell egy másik járművet, a kar automatikusan lecsatlakozik a sínről. A technológia egyaránt alkalmazható személyautók és olyan nehézgépjárművek esetén, mint autóbuszok és tehergépkocsik. Jelenleg is folyó svédországi Arlanda projekt vizsgálja a megoldási módszert; ennek keretében, az Arlanda repülőtér és egy logisztikai központ között, 2 km-es hosszúságú próbaszakaszt építettek ki (www.ncc.group). A sín lehetővé teszi a jármű akkumulátorainak áramlás közbeni feltöltését. A rendszer továbbá kiszámítja a jármű energiafogyasztását, ezzel a villamosenergia-költségek járművenként és felhasználónként terhelhetők. Amint a következő ábra mutatja (2. ábra), a rendszer részei az elektromos vezető, a mozgatható kar, a motor, a töltő és az akkumulátor (eRoadArlanda).



2. ábra: eRoad Arlanda projekt műszaki megoldása

Ezeknek a megoldásoknak a fő hiányosságai (Chen, et al., 2014.) azok manuális működtetése, az újratöltés gyakori igénye, és legfőképpen az a tény, hogy a szennyeződés és a nedvesség, valamint a rossz időjárási viszonyok az érintkezést megnehezítik vagy akár ellehetetlenítik, így rontják a kapcsolatot a jármű és a töltési rendszer között.

#### 4. FIZIKAI KAPCSOLAT NÉLKÜLI MEGOLDÁSOK

Ezzel a megoldással az elektromos energia az elektromos járműbe, a statikus vagy a dinamikus töltési módtól függetlenül, légréseken keresztül szállítható (EV). A kontaktus mentes töltési módszer az EV számára biztonságos, kényelmes és megbízható hozzáférést biztosít, és a vezető utas megoldásokkal összehasonlítva, kevesebb fenntartási munkát igényel, a nedvességtől vagy a szennyezett környezettől való függősége jóval kisebb, valamint kevésbé szennyezi a környezetét. Az ilyen típusú töltési megoldásokhoz vezeték nélküli energiaátvitel (Wireless Power Transmission – WPT) használatos.

A WPT különböző típusai a következők:

- Inductive Power Transfer (IPT)  
On-line Inductive Power Transfer (OLPT)  
Resonant Inductive Power Transfer (RIPT)
- Capacitive Power Transfer (CPT)
- Permanent Magnet Coupling Transfer (PMPT)
- Resonant Antenna Power Transfer (RAPT)

A kutatók jelenlegi álláspontja szerint, az elektromos járművek töltésére az Inductive Power Transfer (IPT) a legmegfelelőbb; így jelenleg is ezt a megoldást tanulmányozzák (Chen, et al., 2014.).

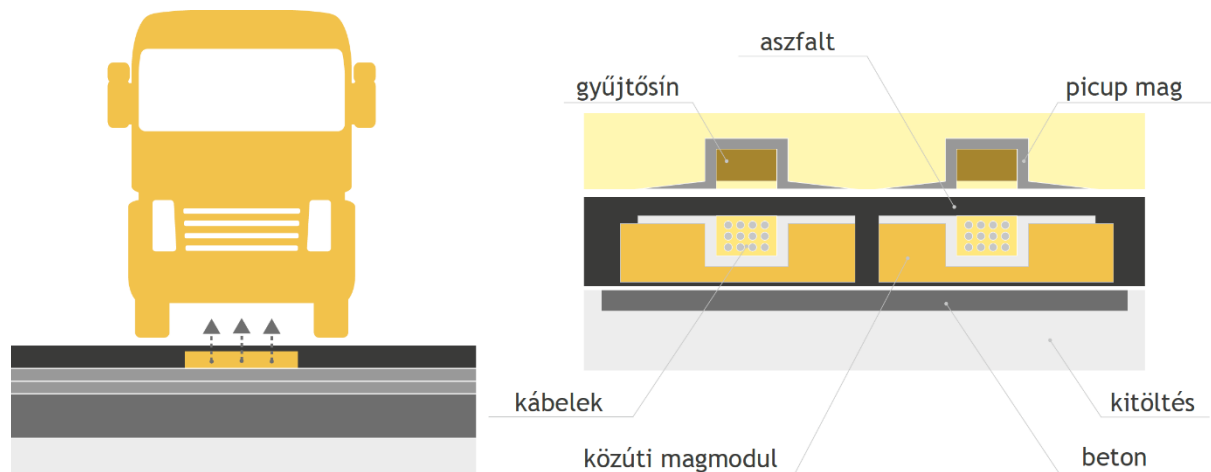
A WPT technológiával ellátott utakról jellemzően elmondható, hogy amíg azon nem elektromos jármű közlekedik, azok hagyományos útként funkcionálnak, mivel a rendszer nem kerül feszültség alá. Ezek a töltési egységek, a burkolatba építve, folytonosan vagy különböző távolságra lévő „szigetekként” helyezhetők el a megadott forrás érvénytelen (Viktoria Swedish ICT, 2014).

##### 4.1. INDUCTIVE POWER TRANSFER (IPT)

Az induktív teljesítmény átvitel módszere a jól ismert, elektromágneses indukció elvén működik. Váltakozó áramot továbbítanak egy tekercsbe, amely mágneses mezőt generál, ez pedig egy fogadótekercsben áramot indukál. Az áramátvitel hatékonysága az áramkör frekvenciájától és impedanciájától (váltakozó áramú ellenállástól), a tekercsek és a mágneses terek eloszlásának távolságától és eltolódásától függ.

Az IPT rendszerek jellemzően két részből tevődnek össze, (on-board) fedélzeti és off-board egységből. Az előbbit az elektromos jármű alá szerelik fel, és, a mágneses kapcsolón keresztül, felelős a váltakozó áram felvételéért, amit egyenárammá alakít át. Az utóbbi, off-board egység három részegységből tevődik össze. Ezek felelősek a tápegységért, az átalakítóért és az adó-egységért, ami a fedélzeti szerkezet felvevő (pick-up) egységéhez kölcsönösen kapcsolódik (Chen, et al., 2014).

Az IPT töltőberendezéseknek burkolatba történő beágyazásához mind az előre gyártáson alapuló, mind a helyszíni építési módszerek lehetségesek, bár a jelenlegi tanulmányok azt mutatják, hogy az előre gyártási módszerek hatékonyabb és megbízhatóbb megoldásokat kínálnak. A 3. ábra megmutatja az előre gyártott töltőegységek (CU) részeit, azaz a gyűjtőszínt (bus bars), a felszedő magot, a kábeleket, a közúti magokat és a közúti magmodult. A töltőegységet általában betondobozba ágyazzák; ennek felületén a forgalmi terheléstől vékony aszfaltréteg védi a rendszert. Fontos a felső (záró) aszfaltréteg megfelelő vastagságának optimalizálása, a megfelelő ellenállás és a töltési hatékonyság biztosításának ellentétes szempontjai között (Chen, et al., 2017).



3. ábra: (a) Kereszt-szelvény profil egy lehetséges villamosított út struktúra alapján és (b) Az előre gyártott töltőegység és elemei

Azt is figyelembe kell venni, hogy a különböző rendszereket még fejlesztik, így számos speciális paraméter még nem publikus.

## 5. ÉLETCIKLUS-ELEMZÉS (LIFE CYCLE ASSESSMENT, LCA)

„Egy termék hatásrendszeréhez tartozó bemenet, kimenet és a potenciális környezeti hatások összegyűjtése és értékelése annak teljes életciklusa során”(MSZ ISO 14040, 1997).

Egy termék vagy szolgáltatás életciklusa mind azokat a szakaszokat jelenti, amelyeken az, a nyersanyag bányászatától vagy kitermelésétől kezdve az élettartama során végighalad. Az életciklus-gondolkodásnak ma is jelentős szerepe van, ezért az életciklus-elemzés olyan eszköz, amely e gondolkodás megvalósításában segítséget nyújt.

Az 1990-es évektől kezdve az életciklus-elemzésnek tehát kiemelt szerep jutott, így a közlekedéstervezésben és az újtechnológia témájában is számos tanulmány született már. Minden tanulmánynak meg kell felelnie az ISO keretrendszernek. Ezért az LCA-nek tartalmaznia kell a vizsgálat célját és hatókörét, a készletelemzést és a hatásvizsgálatot. Mindezek a kategóriák az eredmények értelmezéséhez vezetnek.

A tanulmány céljának világosnak kell lennie, megfogalmazva, mi a kutatási kérdés, a tervezett alkalmazás és a tervezett célközönség. A hatókörnek részben fel kell tüntetni a termék vagy szolgáltatás határait, a hatásokat, az adatigényeket és a funkcionális egységet (functional unit – FU).

A funkcionális egységnek a következőket kell tartalmaznia (Anon, 2010):

- a rendelkezésre álló funkció,
- tervezett mennyiség,
- tervezett időtartam,
- tervezett minőség.

Más szóval: Mi? Mennyi? Meddig? Milyen módon?

A készletelemzés esetében a tanulmánynak tartalmaznia kell az alapvető kibocsátási, erőforrás- és energiaparamétereket. Ebben a fázisban a termék tényleges adatgyűjtése és a modellalkotás az elvégzendő feladat. Az egyszerűsített és a részletes folyamatábra elkészítése és az adatgyűjtés után, a készletelemzéshez az előállítási és egyéb számítások, az elosztás és az újrafelhasználási folyamatok kiszámítása szükséges.

Az életciklus-hatásvizsgálat (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) a potenciális környezeti hatások jelentését, fontosságát és következményeit értékeli, a termékek teljes élettartama alatt.

Az életciklus-hatásvizsgálat jellemzően a következő lépéseket tartalmazza:

- hatás kategóriák, mutatók és modellek kiválasztása és meghatározása,
- osztályozás,
- jellemzés,
- normalizálás,
- aggregáció és/vagy súlyozás.

Önálló és összehasonlító, valamint a tulajdonság alapú és következtető életciklus-elemzést (LCA) különböztetnek meg.

Az LCA létrehozásához a rendszer határainak meghatározása fontos. A bölcsőtől a sírig, a bölcsőtől a kapuig vagy a kaputól – kapuig modellek ismereteseek (4. ábra).



4. ábra: Bölcsőtől a sírig modell

A tanulmány során a modellt SimaPro program segítségével építettem fel. Ez a világon az egyik legelterjedtebb LCA szoftver. A program szakmai eszközt biztosít a termékek fenntarthatósági teljesítményének összegyűjtésére, elemzésére és monitorozására. A szoftver alkalmazása rugalmas és könnyen használható, számos különböző hatásvizsgálati módszert tartalmaz, valamint nagy mennyiségű adat megtalálható, például, az Ecoinvent adatbázison keresztül. Az Ecoinvent a világ legkövetkezetesebb és átláthatóbb életciklus-nyilvántartási adatbázisa, amely több ezer termékhez jól dokumentált folyamatadatokat biztosít.

### 5.1. VILLAMOSÍTOTT UTAK ÉLETCIKLUS-ELEMZÉSE

#### Cél és hatókör

A tanulmány célja olyan megfelelő modell építése volt SimaPro programban, amely a villamosított utak hatásainak elemzéséhez a közlegő projektek számára keretet adhat.

Ezen túlmenően a villamosított utak három legfontosabb (az áramszedőt, a vezető útpályát, illetve az IPT-rendszert hasznosító) megoldásához összehasonlító, tulajdonság alapú életciklus-elemzés volt a célkitűzés.

Mivel a témában jelenleg is számos kutatás folyik, tervezett célközönség a kutatók és a döntéshozók. Tehát a cél az, hogy segítse a döntéshozók azon törekvését, hogy a villamosított utak fenntarthatóságának eléréséhez a legjobb megoldást megtalálják.

Ennek következtében a projekt fő kérdése:

Melyek a három (áramszedő, vezető út és IPT rendszerű) villamosított úttípus környezeti hatásai?

### Funkcionális egység

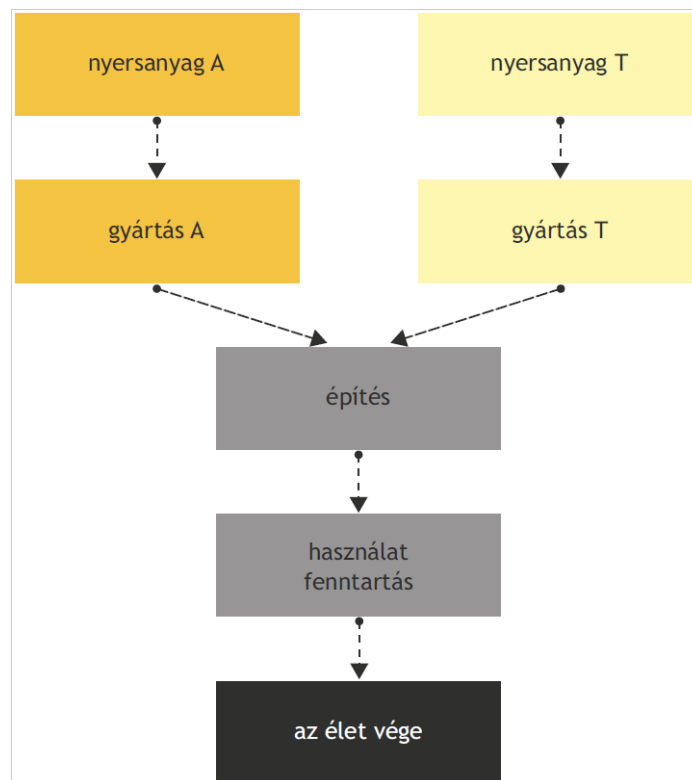
A tanulmány funkcionális egysége egysávos, 3,5 \* 10000 m-es méretű, aszfalt autópálya szakasz, kiépítve a megfelelő áramszedő, vezetőút vagy süllyesztett IPT töltési rendszerrel a pálya – 20 éves élettartama során, a megfelelő minőségű és mennyiségű üzemeltetési és fenntartási munkával.

Ennek meghatározása azon a feltevésen alapult, hogy ezt a sávot, üzemelő autópályaszakasz mellett, újonnan építik.

### Egyszerűsített folyamatábra

Az egyszerűsített folyamatábra (5. ábra) mindhárom töltési rendszernél egyforma. A modell tartalmazza a nyersanyag-kitermelést, a gyártási folyamatokat, a szakasz megépítését és a megfelelő fenntartási és üzemeltetési munkákat.

Fontos megemlíteni, hogy a modell „Használat” életszakasza során azon különösebb kibocsátás nem következik be, így az csak a fenntartási és üzemeltetési munkákkal számol. A modell a „bölcsőtől – kapuig” modell típus, tehát az élettartam végi folyamatokat nem veszi figyelembe.



5. ábra: Egyszerűsített folyamatábra

### Készletelemzés

A készletelemzés az életciklus-elemzésben fontos szerepet tölt be. Itt mutatják be a felhasznált adatokat, a kifejtett folyamatábrát, az elosztást, a normalizálást és a súlyozási problémákat, valamint a feltételezéseket, limitációkat és korlátozásokat.

A megfelelően felépített modell kialakításához a részletes adatgyűjtés elengedhetetlen. A teljes valóság modellezéséhez számos tényezőt figyelembe kellene venni, ám ezt a megkívánt végességgel kell figyelembe venni, így limitáció szükséges.

Bár a SimaPro szoftver segítségével, az Ecoinvent adatbázis elérhető, egyedi adatgyűjtésre is szükség van. Ennek keretein belül, a nyersanyagok szükséges mennyiségét meghatározzák az aszfaltkeverékhez és a töltési egységekhez. Ezután a nyersanyagok kitermeléséhez és az aszfaltkeverék gyártásához

szükséges energia- és anyagigényeket, valamint a káros anyag kibocsátásokat az adatbázisban levő, beépített minta alapján határozzák meg. A felhasználni kívánt aszfaltmennyiség a töltési mód típusától függően különböző. Áramszedő használata esetén – mivel itt a töltést acéloszlopokkal alátámasztott felsővezetékek biztosítják – a teljes pályaszerkezetet kiépítik, itt a felhasznált aszfaltmennyiség 8321 m<sup>3</sup>. A másik két esetben a mennyiségek nyilvánvalóan a töltési egységek térfogatával kisebbek; vezető út esetében, 8311 m<sup>3</sup>, IPT használatakor pedig 6721 m<sup>3</sup>.

Következő lépés a villamosított útpálya megépítéséhez szükséges igények számítása. Ez két részből tevődik össze, a különböző rétegekhez szükséges aszfaltmennyiségek helyszínre szállításából és a beépítést végző munkagépekből. Az aszfaltkeveréket EURO3 tehergépkocsikkal szállítják ki, a munkagépekkel kapcsolatos számításokat pedig egy tanulmány (Stripple, 2001) alapján hajtották végre. Mivel a gépek legnagyobb káros hatása az üzemanyag-fogyasztásból ered, a számítások a dízel-fogyasztásra összpontosítanak.

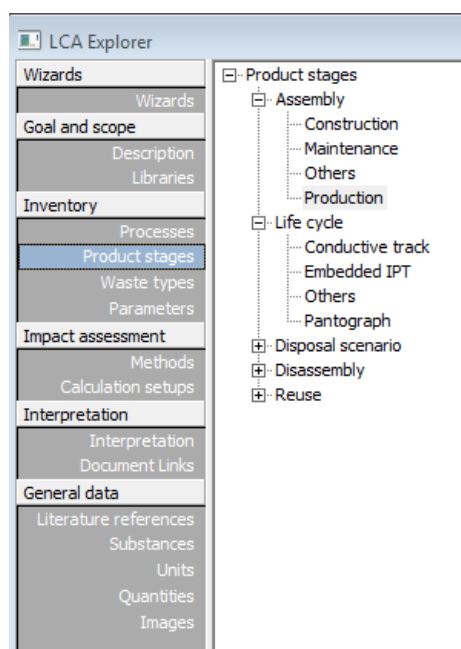
Miután az útszakasz megépült, a következő életciklus-elem a használat. Ebben a fázisban, a fenntartási és az üzemeltetési munkákat veszi a modell figyelembe. A tanulmány ezeket a Trafikverkelt weboldala alapján számítja, és becsüli. Azonban, mivel ott hagyományos út-pályaszerkezet adatai szerepelnek, esetünkben pedig a külső tényezők és egységek befolyásol-hatják az elvégzendő munka mennyiségét, így a modellalkotás során, egységesen a megadott adatok 120%-át vettem fel. Ezt a későbbiekben finomítottam, leginkább a téli fenntartás tekintetében, mivel a három megoldás várhatóan különböző munkaigényű.

Szintén fontos meghatározni a modell elemzése során használt hatás-értékelési módot és a meghatározandó kategóriákat. A tanulmány – számos előnye miatt – ReCiPe Midpoint (H) módszerrel számol. Ez a módszer 18 hatáskategóriát vizsgál, többek között az éghajlatváltozást, az emberi toxicitást, az ózonlebontást, a földi ökototoxicitást és az ásványi anyagok kimerülését.

### **A modell és eredményei**

Miután az említett adatokat a megfelelő mennyiségben megadtuk a modellben, a modell kiértékelése következik. A szoftver számos lehetőséget nyújt a rendszerek vagy folyamatok elemzésére (6. ábra). Lehetőség van egyedi elemzések elvégzésére vagy a három töltési rendszer összehasonlítására. Lehetséges egyetlen folyamat vizsgálata is annak felmérésére, hogy mennyi befolyása van a végtermékre. A program különböző módon (hálózat, táblázat vagy diagram) jeleníti meg az eredményeket. Kiválaszthatók az elemzendő hatáselemek (éghajlatváltozás, ózonlebontás, földi savasodás, emberi toxicitás, természetes szárazföldi átalakulás, fosszilis károsodás stb). Az eredmények karakterizáció és a normalizálás után is. elérhetőek.





6. ábra: SimaPro felülete és könyvtárai

Ahhoz, hogy ez a tanulmány kezelhető legyen, az eredmények az éghajlatváltozás hatásaira reflektálnak, mivel ez utóbbi az üvegházhatású gázok levegőbe történő kibocsátásához kapcsolódik, így sok szempontból érinti a bolygót. Az éghajlatváltozás karakterizációs tényezője, a fent említett ReCiPe Midpoint (H) módszer esetében, a globális felmelegedési potenciál; egysége év/kg CO<sup>2</sup> egyenérték.

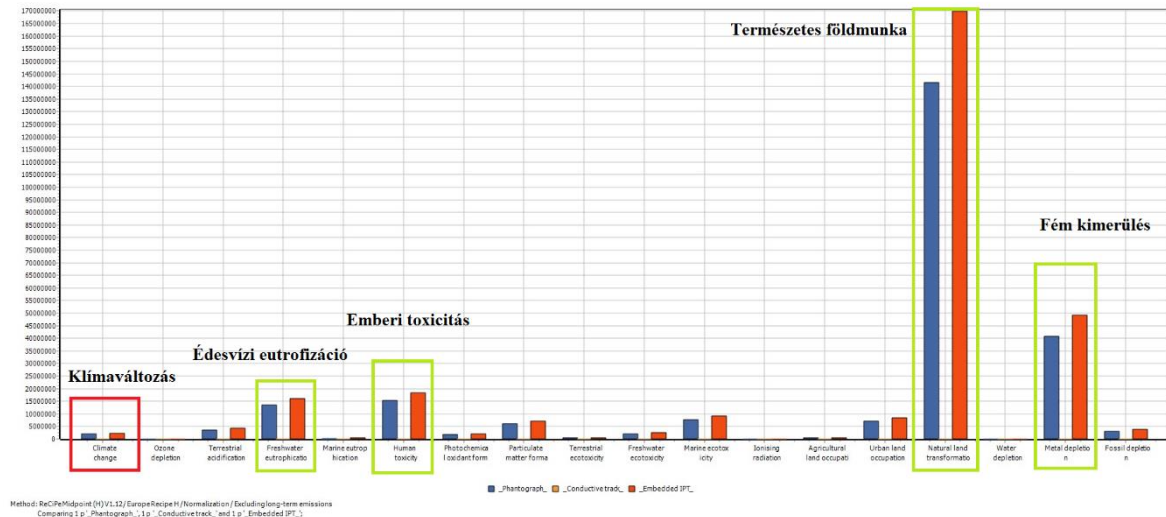
### Eredmények

Az eredmények egyszerű összehasonlítása érdekében a számítások értékét normalizáltam, azaz azt a hatáskategória-mutatót referencia (vagy normál) értékkel hasonlítottam össze. Ehhez a hatáskategóriát el kell a referencia értékkel osztani, így azok azonos egységgel rendelkeznek, megkönnyítve az összehasonlítást. Ezt a műveletet a szoftver automatikusan elvégzi.

Az alapmodell eredményeként a hatásvizsgálat és a leltár elemzés szemszögéből a következő összegeket kaptuk. Az előbbi esetén a vezető pálya sokkal kevesebb hatással jár, mint a másik két lehetőség. Ezeknek a meglepően nagy különbségeknek az okát a rézkábelek képezik. Mivel a rézkábelek száma és típusa, pontos információk hiányában, csak feltételezéseken alapul, az érzékenységvizsgálat során a tanulmány a kábelek megváltozott mennyiségének hatásait is megvizsgálja. Emellett látható, hogy négy eredmény kiemelkedő, melyek a természetes föld-munka, a fém kimerülése, az emberi toxicitás és az édesvízi eutrofizáció (elalgásodás). Ezt követi a tengeri ökotoxicitás, a városi területek felhasználása, a földi savasodás és az éghajlat-változás. Minden esetben az IPT (narancs) megoldás kb. 20%-kal nagyobb hatásokat eredményez. (1. táblázat, 7. ábra)

1. táblázat: Hatásvizsgálat normált eredményei, alapmodell

Hatáskategória	Hatásvizsgálat [10 <sup>6</sup> ]		
	Áramszedő	Vezető út	IPT
Természetes földmunka	141,57	0,0639	169,87
Fém kimerülés	40,93	0,0018	49,11
Emberi toxicitás	15,25	0,0016	18,30
Édesvízi eutrofizáció	13,40	0,0011	16,08
Klíímaváltozás	1,95	0,0008	2,34



7. ábra: Hatásvizsgálat normált eredményeinek ábrázolása, alapmodell

Leltárelemzés során felülvizsgáljuk a leltár eredményeit, mely megmutatja a folyamat be- és kimenő elemeit. Az eredmények azt mutatják, hogy az IPT és az áramszedő esetében a legjelentősebb anyagok azonosak. A legmagasabb érték a szén-dioxidhoz (fosszilis) tartozik, ezt követi – nagy ugrással az értékek között – a metán (fosszilis), majd dinitrogén-monoxid, de szintén jelentős a kén és a szén-dioxid. A vezető pálya esetében a legjelentősebb hatással szintén a szén-dioxid (fosszilis) bír, de ebben az esetben a harmadik legmagasabb érték a metán (fosszilis), a kettő között pedig a szén-dioxid kap helyet (2. táblázat).

2. táblázat: Leltárelemzés normalizált eredményei

	Anyag	Tér	Áramszedő	Vezető út	IPT
	Teljes		1949,97	0,830	2339,77
	Fennmaradó anyagok		2,07	0,300	2,43
1	Szén-dioxid (fosszilis)	Levegő	1783,67	0,480	2140,29
2	Metán (fosszilis)	Levegő	142,32	0,039	170,78
3	Dinitrogén-monoxid	Levegő	12,36	0,006	14,83
4	Metán tetrafluor, CFC-14	Levegő	4,24	0,000	5,09
5	Kén-hexafluorid	Levegő	2,36	0,001	2,83
6	Szén-dioxid (földmunka)	Levegő	1,77	0,002	2,13
7	Metán (biogén)	Levegő	1,17	0,001	1,40

Mivel a tanulmány a klímaváltozást befolyásoló hatásokat helyezi előtérbe, így a 3. táblázat bemutatja a három különböző típusú eRoad megoldás minden folyamatára és eljárásaira vonatkozó normalizált eredményeket. A kapott adatokról elmondható, hogy mivel, a feltételezés szerint, az aszfaltkeverő telep és az építési terület egymástól 30 km-re van, így az aszfaltkeverék szállításából jelentkező hatások a többihez képest nem jelentősek. Ugyan ez elmondható az építés közben felhasznált dízelolajból származó hatásokról. Az aszfaltgyártás esetében a hatások jelentősebbek. A felhasznált aszfaltkeverék mennyiségétől függően, nyilvánvaló, hogy az áramszedő megoldás a legmagasabb, majd a vezető pálya és végül az IPT következik. A karbantartási és az üzemeltetési munkáknak természetére gyakorolt hatása a burkolat 20 éves élet-tartama alatt nagymértékű. Ez az érték egyaránt 558. A legnagyobb értékek az áramszedő és az IPT rézkábeleinek töltőegységeinek előállításánál jelentkeznek. Az acélsín és a beton dobozok előállításának hatása, ezekhez képest, elhanyagolható.

3. táblázat: A különböző folyamatokra és eljárásokra vonatkozó normalizált eredmények

Áramszedő		Vezető út		IPT	
Aszfalt gyártás	254,00	Aszfalt gyártás	253,00	Aszfalt gyártás	205,00
Aszfaltkeverék szállítás	0,30	Aszfaltkeverék szállítás	0,30	Aszfaltkeverék szállítás	0,24
Építkezés – dízel	0,20	Építkezés – dízel	0,20	Építkezés – dízel	0,20
Üzemeltetés és fenntartás	558,00	Üzemeltetés és fenntartás	558,00	Üzemeltetés és fenntartás	558,00
Réz kábel	1949154,30	Acél sín	13,30	Beton doboz	24,00
				Réz kábel	2338985,20

Mint említettem, információ hiányában, az alapmodell kialakításakor számos közelítéssel és becsléssel kellett élnem. Ezért érzékenység vizsgálatra volt szükség. Ennek célja az eredményekre vonatkozó legfontosabb feltételezések hatásának értékelése, változó feltételezésekhez az életciklus elemzés ismételt végrehajtásával.

A tanulmányban a legfontosabb feltevések a töltőegységekhez szükséges réz mennyisége és a télen szükséges karbantartás. Ezeknél két esetet vizsgáltunk:

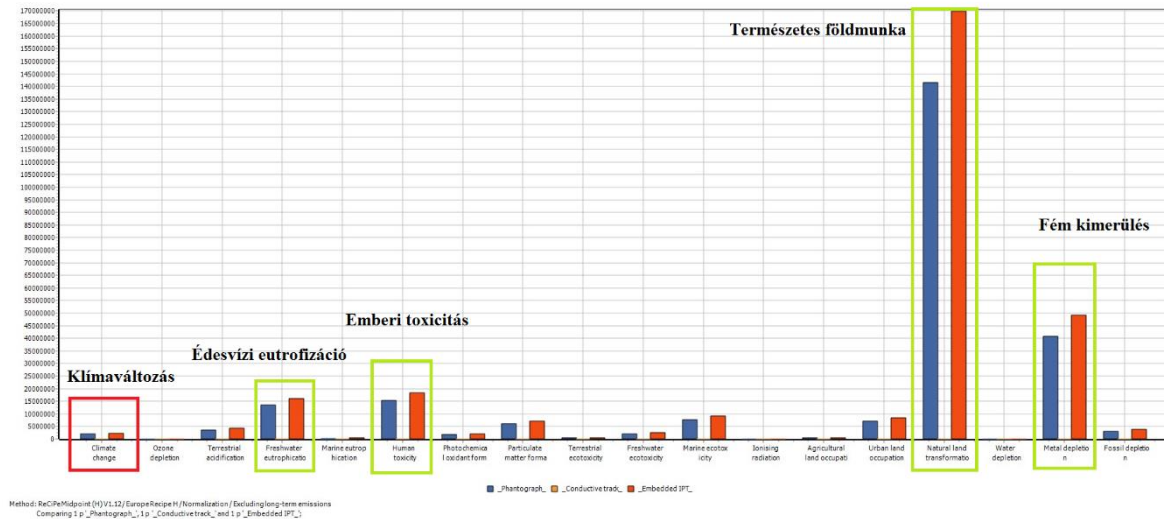
- csökkentett réz mennyiséget,
- több téli karbantartási és fenntartási munkát.

Az alapmodell eredményeiből szembeötlő, hogy a réz kimagasló hatással bír, ám ennek pontos meghatározása becsléseken alapult. Ennek kiküszöbölésére a bevitt adatokat a következőképpen módosítottam.

Az IPT megoldás a legújabb fejlesztés, így a legbizonytalanabb is. A szükséges réz mennyisége valóban különbözhet a feltételezett értéktől, ezért az érzékenységi elemzésben a feltételezett arány felével számoltunk. Az áramszedő megoldása kiforrottabb, ezért nem rugalmas a réz mennyiségére vonatkozólag, így a számítás az eredeti feltételezett érték 80%-át használja fel. A vezetőpálya nem tartalmaz rezet. Ennek következtében a réz értéke a következő módon változott. Tehát:

- IPT: 0,5,
- áramszedő: 0,8,
- vezető út: 0

A hatásvizsgálat eredményeit a 2. ábra és a 4. táblázat mutatja be. Megfigyelhető, hogy ekkor, minden esetben, a (kék) áramszedő hatásai a legmagasabbak. Ezt követi az IPT (narancs), majd végül a vezető út, jelentősen kisebb értékekkel.



2. ábra: Hatásvizsgálat normált eredményeinek ábrázolása, kevesebb rézkábel esetében

4. táblázat: Hatásvizsgálat eredményei a szükséges rézmennyiség csökkentése esetén

Hatásvizsgálat – Normalizált eredmények, csökkentett réz [10 <sup>6</sup> ]					
Hatáskategória	Áramszedő	Áramszedő	IPT	IPT	Vezető út
	Réz csökk.	Alap	Réz csökk.	Alap	Alap
Klimaváltozás	1,56	1,95	1,17	2,34	0,0008
Édesvízi eutrofizáció	10,72	13,40	8,04	16,08	0,0011
Emberi toxicitás	12,20	15,25	9,15	18,30	0,0016
Természetes földmunka	113,27	141,57	84,96	169,87	0,0639
Fém kimerülés	32,74	40,93	24,56	49,11	0,0018

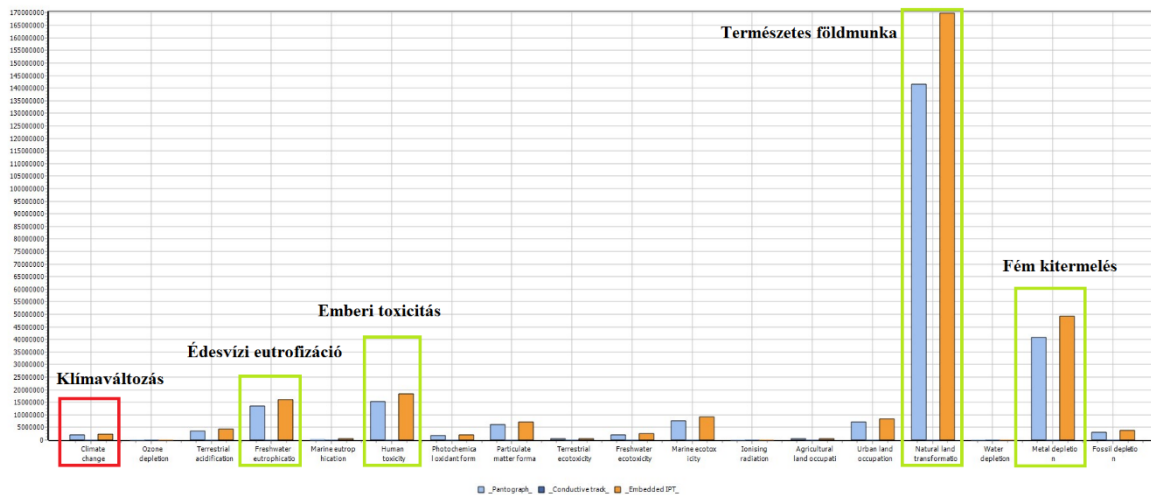
Téli fenntartási és üzemeltetési munkák esetében, az alapmodell azzal a feltételezéssel élt, hogy a három rendszer ugyanannyi munkát igényel. Szintén fontos megjegyezni, hogy bár az áramszedős és a vezető út esetében, a közelmúltban már épültek próbaszakaszok, a rendszerek hosszú távú (téli) viselkedéséről azonban még nem áll információ rendelkezésre.

Feltételezésem szerint a vezető utas megoldás igényli a legmagasabb téli üzemeltetési munkát, hiszen mint kültéri rendszer, az időjárási körülmények nagymértékben befolyásolhatják a teljesítményt, többek között például a szennyeződés és a hó könnyen eltömítheti a sánt, megakadályozva ezzel a megfelelő csatlakozást. Ezt követi az IPT megoldás, ahol szintén fontos a megfelelő légrés biztosítása. Az áramszedő esetében, ebben a számításban, az alapmodell megemelt munkájához képest nem változtattunk.

Ezek alapján a következőkkel növeltem az eredeti – a töltési rendszer nélküli autópályához képest 120%-kal megnövelt munkaigény – feltevést:

- vezető út: 2,5,
- IPT: 1,5,
- áramszedő: 1

Az eredményekből látható (3. ábra, 5. táblázat), hogy ebben az esetben is a (narancs) IPT megoldás adja a legmagasabb értékeket, a vezető út hatása pedig, a másik két megoldáshoz képest, még mindig elenyésző. Az IPT megoldás esetén, a változások 103-os nagyságrendűek.



9. ábra: Hatásvizsgálat normált eredményei ábrázolása, megnövelt téli üzemeltetési- és fenntartási munkánál

5. táblázat: Hatásvizsgálat normált eredményei, megnövelt téli üzemeltetési- és fenntartási munkánál

Hatásvizsgálat – Normalizált eredmények, növelt üzemeltetési munka [10 <sup>6</sup> ]					
Hatáskategória	Áramszedő	Vezető út		IPT	
		Növelt üz.	Alap	Növelt üz.	Alap
Klíma változás	1,95	1,37	0,0008	2,34	2,34
Édesvízi eutrofizáció	13,40	1,25	0,0011	16,08	16,08
Emberi toxicitás	1,52	2,06	0,0016	18,30	18,30
Természetes földmunka	141,57	71,62	0,0639	169,87	169,87
Fém kimerülés	40,93	1,92	0,0018	49,11	49,11

## 6. ÖSSZEZÉS

A korábban bemutatott eredmények azt mutatják, hogy a környezeti, különösen az éghajlatváltozás szempontjából a – rézkábel nélküli – vezető út megoldása a leginkább fenntartható, ugyanakkor még ez a megoldás is, a töltési egység nélküli utakhoz képest, a környezetre jóval nagyobb (átlagosan háromszoros) hatást gyakorol.

Annak ellenére, hogy ezek a különbségek jelentősnek és ténylegesen nagy hatásnak tűnnek, hangsúlyozni kell és figyelembe kell venni azt is, hogy a modell a forgalomból adódó hatásokkal nem számol. Ha a megfelelő infrastruktúra kiépül, az elektromos járművek széles körben elterjedhetnek, ekkor a 20 éves időtartam alatt ez a megoldás a környezeti terhelést jelentős mennyiségű káros kibocsátás megtakarításával csökkentheti.

Ezen kívül, a döntéshozatalhoz figyelembe kell azt is venni, hogy a különböző megoldásokat az elektromos járművek felhasználói különböző módon fogadhatják. Az érintkezésmentes megoldásra valószínűleg kedvezőbben reagálnának, mint az áramszedős vagy és a vezetőpályás változatra, amelyek feltehetőleg több karbantartási igényt okozhatnak a járművek számára.

Ez a tanulmány és modell ugyan alaposan áttekintette a rendszereket és fenntarthatóságot, jövőbeni fejlesztése során, a modellt célszerű kiterjeszteni, például, az elektromos alkatrészek (csatlakozó, rács, stb.) figyelembevételére is; kitérhet a forgalmi és gazdasági hatásokra, a megnövekedett fenntartási igényre, valamint a hosszú távú teljesítményre is.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

Budhia, M., Covic, G. A., Boys, J. T. & Huang, C.-Y., 2011. Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging.

Chen, F., Taylor, N. & Kringos, N., 2014.. Electrification of roads Opportunities and challenges. Applied Energy, 13. 12.

eRoadArlanda, <http://eroadarlanda.com>. [Online] Available at: <http://eroadarlanda.com/the-technology/> [Hozzáférés dátuma: 05. 03. 2017.].

European Environment Agency, 2016. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2014 and inventory report 2016, Copenhagen

MSZ ISO 14040, 1997.

Siemens AG, 2015. eHighway – Innovative electric road freight transport. Germany

Stripple, H., 2001. Life Cycle Assessment of Road – A Pilot Study for Inventory Analysis, Gothenburg, Sweden

[www.ncc.group](https://www.ncc.group), <https://www.ncc.group>. [Online] [Hozzáférés dátuma: 05. 03. 2017].