

Kibocsátásbecslési eljárások és modellek összehasonlítása

Comparison of Emission Models and Processes

Compararea procedurilor și modelelor pentru evaluarea emisiilor

SZENDRŐ Gábor¹, TÖRÖK Ádám²

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Környezetgazdaságtan Tanszék, Budapest, Magyar tudósok körútja 2, H-1117, Telefon: +36 1 463 4030, e-mail: szendro@eik.bme.hu

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszék, Sztoczek u. 2., H-1111 Budapest, e-mail: atorok@kgazd.bme.hu

ABSTRACT

In this paper authors aim to compare the different transport related emission models and processes. Different models and different processes were elaborated in the last couple of decades to examine the effect of technical development on climatic issues. Some just covering technical parameters others are dealing with socio-economic parameters as well.

ÖSSZEFOGLALÓ

Cikkünkben a közlekedési kibocsátási eljárások becslésére szolgáló modelleket és eljárásokat kívánjuk bemutatni. Az elmúlt évtizedekben a modellek hatalmas fejlődésen mentek keresztül, a technológiai paraméterek mellett ma már a társadalmi-gazdasági paraméterek változását is figyelembe veszik.

Kulcsszavak: kibocsátásbecslés, emissziós modell, Mobile 6.2, MOVES, Global Calculator, TREMOVE, ForFITS, IEA

1. BEVEZETÉS

A BECSLÉSI ELJÁRÁSOKRA VONATKOZÓ KRITÉRIUMOK MEGFOGALMAZÁSA

Az eddigi tapasztalatok és megvizsgált modellek alapján elmondható, hogy cél lenne olyan CO₂ emissziós modell fejlesztése, amely a tényadatokból kiindulva képes előrebecsülni a teljes közlekedési szektor (légi-, vízi-, vasúti- és közúti közlekedés) kibocsátását és a programozható dekarbonizációs pályák hatását. A bemenő adatstruktúrája legyen ellenőrizhető, a modell legyen transzparens (átlátható számítási folyamatok) és robusztus (az eddig kidolgozott előre- vagy visszabecslési módszerek vagy dekarbonizációs pályavizsgálatok érzékenysége nem ismert, általánosan feltételezett, hogy a paraméterezett modellek pontosan leírják a megfigyeléseket). Így természetes kérdésként merül fel azonban a modellek alkalmazhatósága, hiszen ezek a modellek pontosan szinte sohasem igazak. Általánosabb értelemben egy modellezési eljárás robusztus, ha nem túlzottan érzékeny azokra a feltételekre, bemenő paraméterekre amelyektől függ [2]. A bemenő adatok és modellezési folyamatok legyenek jól dokumentáltak. Lehesse változtatni a kimenő adatok dimenzióját [tCO_{2e}] vagy [PJ]. Ezek alapján elvárás, hogy a modell megbízhatóan tudja számszerűsíteni a jövőbeli kibocsátásokat és alkalmas legyen trendek előrejelzésére, beleértve a bizonytalanságok kezelését, bemutatását. A modell egy a tudományos kutatásban használt fogalom, amely a nagyon pontosan (tehát a matematika nyelvén) megfogalmazott hipotéziseket és szabályokat jelenti. A modellezés során a valóság egy meghatározott szeletéből kiemeljük a számunkra adott szituációban fontos, ismert vagy feltételezett elemeket és azokat hipotézisünknek megfelelően kapcsolatba hozzuk egymással. Az így elkészített modellt tesztelnünk kell. Ha a modell úgy viselkedik, ahogyan a modellezni kívánt rendszer vagy objektum, (tehát predikciói egybevágóak a közvetlen tapasztalatokkal), akkor azt mondhatjuk, hogy a modell jó (céljának megfelelő keretek között használható), ha eltér attól, akkor a modellt tovább kell fejleszteni vagy el kell vetni [7]. A mindennapi életben a valóságos világ különböző problémáival találkozhatunk, melyek lehetnek például fizikai, gazdasági vagy mérnöki jellegűek, és amelyek megoldásában a matematika felhasználása segítségünkre lehet. De ahhoz, hogy a matematikát alkalmazzuk, gyakran egy absztrakt matematikai problémát kell megfogalmaznunk, melyet az eredeti probléma matematikai modelljének nevezünk, és amely közelítőleg leírja a való életből vett problémát. Egy ilyen modell felállításához gyakran egyszerűsítésekre és feltevésekre van szükség. A matematikai probléma

ezek után vizsgálható, esetleg megoldható. Az eredmények interpretálása a valóságos világ fogalmaival megfelelő választ adhat az eredeti problémára. Az átláthatóság, transzparencia segít a modell továbbfejlesztésében. Segítségével megérthető és tovább fejleszthető a moduláris felépítésű program. A transzparencia egyszerűen azt jelenti, hogy az emberi gondolkodás számára kézenfekvőnek tűnő megfelelés van egy megismerő rendszer modelljében felvett elemek és/vagy viszonyok és az általa lefedett rendszer elemei és/vagy viszonyai között, és a megfelelés egyértelmű és bijektív. Modellalkotásánál alapvető a transzparencia iránti igény, igény arra, hogy maga a gondolatok rendje megfeleljen a dolgok rendjének (Pléh, 2011). A modellezési eljárás érzékenységet a bemenő paraméterek és a kimenet vagy kimenetek közötti érzékenység-vizsgálattal lehet meghatározni. A vizsgálat célja, hogy meghatározzuk a bemenő paraméterek egységnyi változása, milyen és mekkora hatást gyakorol a kimeneti változókra. Érzékenység vizsgálatnál feltételezzük, hogy a bemeneti változók függetlenek – tehát az egyik bemeneti változó változása nincs hatással a másik változóra. A ceteris paribus elv igen fontos a robosztusság vizsgálatánál, ugyanis lényege, hogy a komplex, egymással kölcsönhatásban álló viszonyok elemzése során csak egyetlen bementi tényező megváltoztatásával elemezzük a jelenségeket. Tehát a vizsgált tényezőkön kívül valamennyi hatótényezőt változatlanul hagyunk. A bizonytalanságok kezelésére a matematika régóta kínál eszközöket, azonban ezen eszközök alkalmazása eddig nem integrálódott a károsanyag-makromodellezésbe. A bizonytalanságot legkevésbé a diszkrét rendszerek tudják kezelni (ma ezekre épülnek a modellek), ma idősoros diszkrét rendszereket használunk. Kisebb adatgyűjtési és modellezési befektetéssel javítható lenne a modellezés és intervallum alapú rendszer építhető ki. Nagy adatgyűjtési és modellezési befektetéssel nagy pontosságú sztochasztikus rendszer (azokra a folyamatokra használható, amelyek mint a természetben előforduló valódi jelenségek többsége eleve véletlen jellegűek, vagy kevésbé ismert, bonyolult rendszerekre, melyek esetleges oksági összefüggéseit egyszerűbb statisztikus kapcsolatként vizsgálni valószínűségi változók segítségével) alakítható ki, mely az idősoros adatok segítségével dinamikus rendszerre alakítható (egy rendszer valamely állapotainak rögzített szabályok szerinti időbeli változásával foglalkozik. Egy dinamikus rendszer állapotát véges számú állapotjellemző írja le. A rendszer állapotában bekövetkező kis változások a számok kis megváltozásával járnak. A dinamikai rendszer időfejlődését egy rögzített szabály vezérli, amely a jelenlegi állapot ismeretében megadja a jövőbeli állapotokat. Az időfejlődés determinisztikus: a jelenlegi állapotból csak egyetlen jövőbeli állapot következhet be adott időtartam alatt.)

2. EMISSZIÓS MODELLEK A NAGYVILÁGBAN

Az ÜHG-kibocsátások számításának számos módja van a felhasznált modellektől, feltételezésektől, változótól és a bemenő adatok rendelkezésre állásától függően. A módszerek alapját a tüzelőanyag fogyasztás, illetve közlekedési teljesítmény meghatározása jelenti. Ezen módszerek alkalmazása esetén figyelembe veendő, hogy a különböző tüzelőanyagok széntartalma eltérő, valamint, hogy a dízelüzemű gépjárművek fogyasztása általában alacsonyabb, azonban a magasabb relatív széntartalom ezt az előnyt részben kiegyenlíti. Ennek a módszernek a legnagyobb problémája az adathiány (a tüzelőanyagok külföldi beszerezhetősége („benzinturizmus”) miatt pedig a rendelkezésre álló adatok megbízhatósága is kérdéses). A számítás másik fontos bemenő adata a közlekedési teljesítmény meghatározása (ez szintén nehézségekbe ütközhet). Amennyiben a gépjárműállományra és a tüzelőanyag fogyasztásra nem állnak rendelkezésre megbízható adatok, egyes modellek kiindulhatnak a járműkilóméter-adatokból is, emissziós faktorokat alkalmazva. Ilyen modell például az Egyesült Államokban alkalmazott MOVES (lásd alább). Az összes ÜHG kibocsátás számszerűsítése a CO₂ egyenérték alkalmazásával történik, a hatások becsléséhez pedig a globális felmelegedési potenciállal történő szorzás szükséges (leggyakrabban a 100 évre megadott érték alkalmazandó). A legnagyobb mennyiségben kibocsátott üvegházgáz a széndioxid, azonban a globális felmelegedéshez való hozzájárulás az egyes üvegházgázok között drasztikusan eltérhet (pl. N₂O GWP: 300 100 évre). A következőkben a rendelkezésre álló szakirodalom alapján a különböző modellezési eljárásokat tekintjük át.

2.1. Egyesült Államok

Az Egyesült Államok és az Európai Unió, ezen belül Magyarország közlekedésfejlődése, igényei, szabályozása, stb. jelentős eltéréseket mutat, ezért a modellek extenzív (és munkaigényes) átalakítása nélkül átültetésük nehézségekbe ütközne. Mindemellett azonban érdemes áttekinteni az alkalmazott megoldásokat az EU-s és hazai modellek fejlesztése érdekében.

2.2. MOBILE6.2

A MOBILE modell első változatát (MOBILE1) az EPA a hetvenes években fejlesztette ki a jövőbeli várható kibocsátások becslésére. A program mára mind architektúráját, mind felhasználói felületét tekintve elavult (DOS-alapú), azonban a jelenleg alkalmazott modellek fontos módszertani alapjául szolgált. A jelenlegi, 2002-

ben kiadott változat az általános kibocsátásokon (CO₂, CO, NO_x, HC, SO₂, NH₃, PM-) túl, a futóművek és a fékrendszer kopásának PM-kibocsátásait is számszerűsíti a benzin és dízel járművekre [18]. A modell 28 különféle gépjármű kategóriára határoz meg emissziós tényezőket két tengerszint feletti magasságon, valamint figyelembe veszi a külső hőmérsékletet (téli, nyári mód), az utazási sebességet, és egyéb külső tényezőket is, időtávja 1951-től 2050-ig terjed [15]. Hátránya, hogy fontos bemenő adatát képeznék a forgalmi engedélyekben rögzített adatok, valamint a megtett kilométerek száma, azonban erőforráshiány miatt nem minden állam rögzíti ezeket (így országos átlagokat kénytelenek alkalmazni, ami rontja a modell előrejelzéseinek pontosságát). A CO₂ kibocsátások becslésének módja ebben a modellben rendkívül egyszerű (minden évre meghatározott becsült szorzókon alapszik), legnagyobb hátránya azonban mégsem ez, hanem hogy egyáltalán nem veszi figyelembe a sebességet, a tüzelőanyagok jellemzőit, az alternatív hajtásokat és tüzelőanyagokat, valamint a CAFE (Corporate Average Fuel Economy) szabványok változásait. Ennek megfelelően előrejelzései csak olyan időtávra alkalmazhatóak, ahol ezen tényezők hatása elenyésző. A fenti hiányosságok következtében a modell például túlbecsüli az új gépjárművek VOC és HC-emisszióit. A MOBILE emissziós program csomag képes HC, NO_x, CO, CO₂, PM kibocsátásirata-előrebecsléseket [g/km] készíteni 2050-ig, az előrebecslések a betáplált historikus adatok alapján készülnek. A programot 2004 óta nem fejlesztik, csak technológiai paramétereket használ fel az előrebecslések elkészítéséhez. Társadalmi, gazdasági paramétereket nem vesznek figyelembe, illetve nincs lehetőség forgatókönyv-elemzésre sem.

2.2.1. MOVES

A MOVES modellt szintén az EPA fejlesztette ki a MOBILE kiváltására, annak legtöbb hibáját kiküszöbölve – a legfrissebb kiadott változat 2014 októberében jelent meg. A program MySQL adatbázisokon alapul, pontos számítási módszertana az Excelre épülő modellekhez képest nehezebben hozzáférhető. Ez a modell már figyelembe veszi a különböző közlekedési beruházásokat, valamint számos, a közlekedésben tapasztalható változást is, min pl. a járműállomány összetételének változása (pl. tüzelőanyag szerint – [9]), megtett járműkilométerek számának megoszlása úttípus és napszak szerint, és a sebesség (torlódások, üresjáratok figyelembevétele). A MOVES modellje a következő meghajtásokat képes modellezni: CNG; Dízel; Elektromos; E-85; Benzin; LPG.

Összesen 13 járműkategória szerepel a modellben (személygépjármű, távolsági busz [17]), lakókocsi, hulladék szállító, stb.). A modell felhasznál környezeti (hőmérséklet, páratartalom, földrajzi jellemzők, időtáv), gépjárműállományra vonatkozó (fogyasztás, tüzelőanyag-mix, elektromos járművek), valamint a megtett útra vonatkozó (járműkilométer, úttípus, sebességeloszlás, hidegindítás, üresjáratok) paramétereket [16]. Megjegyzendő ugyanakkor, hogy átlagos értékekkel dolgozik (tehát például nem modellezi külön a hibrid járműveket – csak tartalmazza az átlagban), és egyes megoldásokat nem vesz figyelembe, ugyanakkor igen nagyszámú légszennyezőt modellez (csak PAH-vegyületekből 30 fajtát). A MOVES emissziós tényezői üzemiállapotokra (gyorsítás, üresjárat) vannak meghatározva, így a MOBILE-lal ellentétben az átlagsebesség változásain túl a vezetés egyéb jellemzőire is érzékeny). Fontos megjegyezni, hogy a számítási algoritmusok, valamint a bemenő adatok miatt a MOVES és a MOBILE csak az Egyesült Államokra használható. A MOVES emissziós programcsomag képes HC, NO_x, CO, CO₂, PM kibocsátásirata-előrebecsléseket [g/km] készíteni 2030-ig, az előrebecslések a betáplált historikus adatok alapján készülnek. Külön figyelmet szentel a hidegindítás és üzemszerű használat eltérő emissziós paramétereinek.

A program legfrissebb verziója 2014-es. A program csak technológiai paramétereket használ fel az előrebecslések elkészítéséhez. Társadalmi, gazdasági paramétereket nem vesznek figyelembe, illetve nincs lehetőség forgatókönyv-elemzésre sem.

2.3. Egyesült Királyság

Az Egyesült Királyságban a Department of Energy and Climate Change (DECC) 2010-ben kiadott modellje használatos. Maga a kalkulátor egy felhasználóbarát internetes felületen keresztül is elérhető (1. ábra), de létezik MS Excelben megszerkesztett változata is. A modell készítői kiadtak egy globális verziót is, a fejlesztés pedig folyamatos.



1. ábra

Global Carbon Calculator

Forrás: <http://tool.globalcalculator.org>

A DECC számos országgal együttműködik új, lokalizált modellek kidolgozásán (többek között Magyarországgal). Eddig hét ország adta ki hivatalosan saját, a brit módszertanra alapuló kalkulátorát: Belgium, 2011 (Wallonia 2050 Pathways Analysis); Kína, 2012 (China 2050 Calculator); Dél-Korea, 2013; Taiwan, 2013; India, 2014, (India Energy Security Scenarios 2047); Dél-Afrika, 2014; Japán, 2014 (Japan 250 Low Carbon Navigator).

A fentiekén kívül további 11 ország dolgozik hasonló, a brit módszertanra alapuló kalkulátor kidolgozásán (Algéria, Banglades, Brazília, Indonézia, Kolumbia, Magyarország, Mexikó, Nigéria, Szerbia, Thaiföld, Vietnam). A kalkulátor a közlekedésen kívül három energiafogyasztó szektort vizsgál (világítás és berendezések, ipar, fűtés-hűtés), ezen kívül öt nem-energetikai szektort (hulladékgazdálkodás, mezőgazdaság, ipari folyamatok, földhasználat és változásai – LULUCF, emissziók), az energetikai kínálati oldalon pedig tíz területtel számol (biomassza, atomenergia, fosszilis tüzelőanyagok CCS-sel, szárazföldi és tengeri szélenergia, hullámerőművek, árapály-erőművek, mikrogeneráció, geotermikus, vízenergia). Minden szektorra négy különböző forgatókönyvet határoztak meg, az eredmények pedig a költségek meghatározására is kísérletet tesznek. Jelen fejezet további részei kizárólag a közlekedésre vonatkozó elemek bemutatására szorítkoznak. Általános feltételezései:

- Népeség-növekedés: 0,5%/év
- GDP-növekedés: 2,5%/év
- Személygépjárművek kihasználtsága: 1,58-1,66 (forgatókönyvtől függően)
- Élettartam alatt megtett távolság járműtípusonként (km/jármű)
- Meghajtások hatékonysága (TWh/milliárd jkm, vasútnál és légiközlekedésnél az ülések számára vonatkoztatva), 2007-es tényadatokkal
- A vasúti energiafelhasználás mintegy fele szükséges a szerelvények mozgatásához (a másik 50% például az állomások energiafogyasztásából adódik). Ezt az arányt a modell állandónak tekinti
- Emissziós tényezők (kt/TWh) a következő légszennyezőkre: NO_x, PM₁₀, SO₂, NMVOC
- Felszállás üzemanyag-igénye (a teljes fogyasztás 30%-a, konstans)
- Élettartamok (kerékpár: 7 év, személyautó: 12 év, busz: 15 év, vasút: 40 év, légi járművek: 30 év, tehérgépjárművek: 7 év, tehervasút: 30 év)
- Dízel és elektromos hajtású nehézgépjárművek hatékonyságának fejlődése

A légi közlekedésben (személyközlekedés) mindegyik forgatókönyv ugyanazon fejlődéssel számol (a Committee on Climate Change 2009-es előrejelzéseinek „valószínű” forgatókönyvével). Az emissziók tekintetében a modell az Egyesült Királyság területéről felszálló járatokat veszi figyelembe. A fejlesztések tekintetében 10% bioüzemanyag-penetrációt és az igények 115%-os növekedését feltételezi 2005-höz képest. Megjegyzendő, hogy a modell többi része nem allokálja a bioüzemanyagokat szektorokhoz, így a két megközelítés nem teljesen összeegyeztethető. A teherszállításra szintén négy forgatókönyvet határoztak meg (ezekre itt részletesen nem térünk ki, a legnagyobb fejlődést mutató 4-es forgatókönyvben a közút részaránya 50%-ra csökken, vasút 23%, vízi szállítás 23%, csővezeték 4%). A kalkulátor szintén tartalmazza a nemzetközi légi közlekedést és szállítást is. A modellnek vannak ismert hiányosságai is:

- A kerékpárok számának túlbecslése (véltetőleg a jkm alulbecslése miatt)
- Nem számol alternatív meghajtású nehézgépjárművekkel (CNG, hidrogén, stb.)
- A költségek helyenként pontatlanok, vagy forrásuk nem ismert
- Stb.

A számítások menete személyközlekedésre a következő:

1. Az összesített éves utazási igény kiszámítása (a választott utaskm/fő adatok megszorítása a népességgel)
2. A kiválasztott modal split használatával az egyes közlekedési módokkal éves szinten megtett utaskilométerek számítása
3. A beállított technológiák (pl. hibrid, elektromos) segítségével megtett éves utaskm adatok számítása közlekedési módonként
4. Az utaskm adatok járműkilométerre váltása (osztás a kihasználtsággal)
5. Az egyes technológiákkal megtett távolság alapján a szükséges járművek számának meghatározása minden évre
6. Az élettartamok alapján a selejtezett járművek számának becslése
7. Szükséges új járművek számának meghatározása (selejtezés, igények növekedése miatt)
8. Új járművek tőkeigényének számítása
9. Járművek üzemeltetési költségeinek meghatározása

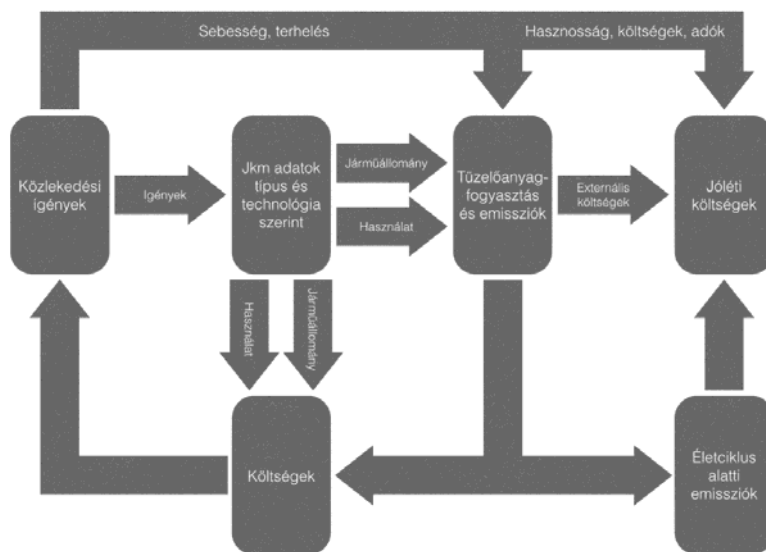
10. Energiafelhasználás számítása az utaskilométer adatok, valamint az utaskilométerre vetített energiaigény alapján (folyékony szénhidrogénekre, elektromos áramra és hidrogénre)
11. Kibocsátások számítása az emissziós tényezők segítségével

A teherszállítás számítása hasonló elven történik, azonban más konstansokkal és választási lehetőségekkel (pl. tengeren történő teherszállítás választott aránya). A Global Calculator emissziós-program csomag képes CO₂ kibocsátás-, energiafelhasználási- és energia előállítási előrebecsléseket [GtCO₂e] készíteni 2050-ig, az előrebecslések a betáplált historikus adatok alapján készülnek. A program előre definiált diszkrét paraméterlistával rendelkezik, a technológiai paraméterek mellett gazdasági és társadalmi paramétereket is használ az előrebecslések elkészítéséhez. 20 előre definiált és 1 a felhasználó által beállított forgatókönyv elemzésére alkalmas a programcsomag.

2.4. Belgium (TREMOVE)

A TREMOVE modellt a Leuveni Egyetem és a Standard&Poor's fejlesztette ki 1997-ben, az újabb verziókat (a legfrissebb 2007-es) a TML (*Transport&Mobility Leuven*) fejleszti. Célja a különböző közlekedéspolitikai döntések és beavatkozások kibocsátásokra gyakorolt hatásainak előrejelzése [6] vizsgálata. Összesen 31 ország adatai kerültek bele, vizsgálatának időtartama 1995-től 2030-ig terjed. Az egyes intézkedésekhez kiszámolja a közlekedési igényeket, a módváltást, a járműállomány megújulását, az emissziókat és a jólét szintjét [10]. A modell felépítését a 2. ábra mutatja.

A modell eredetileg Windows XP alá készült, kezelőfelülete pedig nehézkes volt (DOS használata, programfájlok szövegszerkesztőben való szerkesztése, hiányosságok az egyes modulok közötti adatáramlásban, stb.).



2. ábra

A TREMOVE modell felépítése

Forrás: TML, 2007[12]

A kezelőfelület 2010-ben frissítették – így a scenáriók módosítása 15-25 perc helyett már 1 perc alatt megtörténik – azonban még így sem kézenfekvő a modell használata (a grafikus kezelőfelület 2.5-ös verziója már Windows 7 operációs rendszeren is fut), a nagyobb mélységű kalibrációhoz továbbra is parancssorra van szükség. Ugyanakkor nagy előnye ennek a modellnek, hogy 31 ország adatai alapján képes szimulációt futtatni, így nem csak az összehasonlíthatóság lehetőségét teremti meg, de magasabb szintű tervezésre is alkalmas. Az emissziós számításokhoz a TREMOVE a COPERT4 adatait használja. Ez a módszertan a főbb légszennyezők (CO, NO_x, VOC, PM, NH₃, SO₂, nehézfémek) és üvegházgázok (CO₂, N₂O, CH₄) mennyiségének becslését teszi lehetővé járműkategóriák szerint (személyautó, kistehergépjármű [3], nehéz tehergépkocsi, busz, motorkerékpár, moped). Az emissziók számítása a következő források alapján történik:

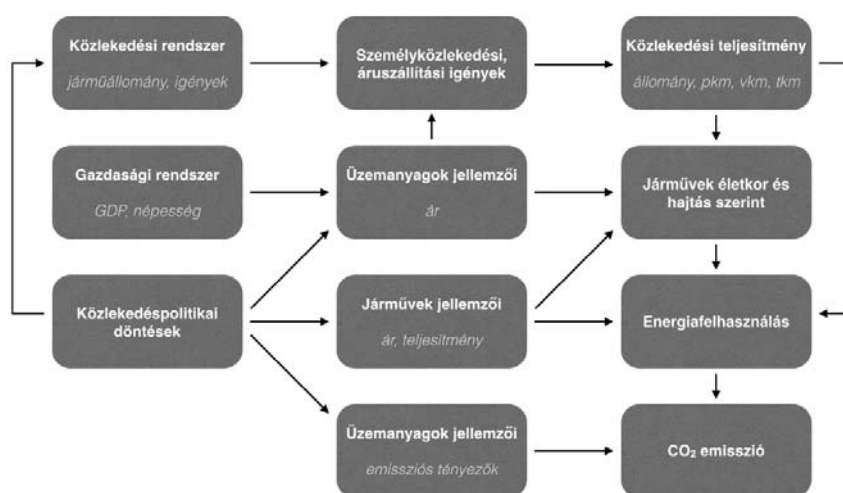
1. A motor üzemeléséből származó emissziók
 - a. Üzemanyag állapot emissziói
 - b. Hidegindítás emissziói az üzemi hőmérséklet elérése előtt
2. Diffúz emissziók (üzemanyag párolgása, PM emissziók a gumiabroncsok és a fék kopásából)

Az összesített emissziós adatokat a megadott használatra vonatkozó beállítások, valamint a sebességfüggő emissziós tényezők segítségével számolja ki a program. A TREMOVE emissziós program csomag képes CO₂ kibocsátás- és energiafelhasználási előállítási előrebecsléseket [MtCO₂e] készíteni 2020-ig, az előrebecslések a betáplált historikus adatok alapján készülnek. A program a technológiai paraméterek mellett gazdasági és társadalmi paramétereket is használ az előrebecslések elkészítéséhez. A forgatókönyvek felhasználó általi programozására van lehetőség (azonban ez a folyamat igen bonyolult, és jelentős szaktudást igényel).

2.5. ENSZ: forFITS

Az ENSZ 2008-ban saját közlekedési emissziós előrebecslő és dekarbonizációs modell fejlesztésébe kezdett [13]. Az ENSZ modellje egy determinisztikus közlekedési környezetterhelési előrebecslési modell, amely a várható környezetterhelést a szállítási teljesítményből származtatott mennyiségként kalkulálja. Elődjének a 2000-es években felépített SRES modell tekinthető, amely a legmeghatározóbb kibocsátás-előrejelző modell a közlekedési szektorban. Ebben a modellben 4 fő forgatókönyv változatot alakítottak ki a gazdasági, a társadalmi és a környezeti paraméterek változása alapján [8]. Később érzékenységi vizsgálatokkal kimutatták, hogy az előrebecslések során bizonyos bemenő paraméterek jobban befolyásolják az eredményeket, ezért a bemenő paraméterek pontosítása, hosszabb idősorok alkalmazása vált szükségessé, amit a kor számítógépes kapacitása és informatikai fejlettsége nem tett lehetővé [11]. Miután a globális irányelvek körvonalazódni látszottak, a paraméterek és eredmények nemzeti vagy regionális szintre történő szétbontása vált szükségessé. 2008-ban Az ENSZ Európai Gazdasági bizottsága is egységes közlekedési előrejelzést készítő programcsomag fejlesztésbe kezdett, mely gazdasági, társadalmi és közlekedési adatbázisok hosszú idősoraira épült.

A modell fejlesztéséhez nemzeti szakértők is csatlakoztak, a kifejlesztett modell 2012-ben nyilvánosságra került és szabad felhasználásúvá vált [14]. A forFITS a közlekedési teljesítményt (utaskm, járműkm, tonnakm), a járműállomány alakulását, az energiafelhasználást és a kibocsátásokat modellezi különböző közlekedéspolitikai döntések függvényében. Minden közlekedési módot figyelembe vesz (összesen 9 típust megkülönböztetve, beleértve a csővezetékes szállítást is), de elsősorban a közúti, vasúti és vízi közlekedésre és szállításra fókuszál. Összesen 31-féle hajtásmód szerepel a modellben, ami kiemelkedő. A modell egyszerűsített szerkezeti felépítését a 3. ábra mutatja.



3. ábra

A forFITS modell felépítése

Forrás: UNECE (2013) [14] alapján saját szerkesztés

A közlekedési igények generálása a modellben elsősorban a GDP adatok járműállománnyal, utas- és járműkilométerrel való kapcsolatán alapul. A ForFITS emissziós program-csomag képes CO₂ kibocsátás- és energiafelhasználási – és energia előállítási előrebecsléseket [GtCO₂e] készíteni 2040-ig, az előrebecslések a betáplált historikus adatok alapján készülnek. A program előre definiált diszkrét paraméterlistát használ (mely a technológiai paraméterek mellett gazdasági és társadalmi paramétereket is tartalmaz) az előrebecslések elkészítéséhez. 5 előre definiált és egy felhasználó által beállított forgatókönyv elemzésére alkalmas a program-csomag.

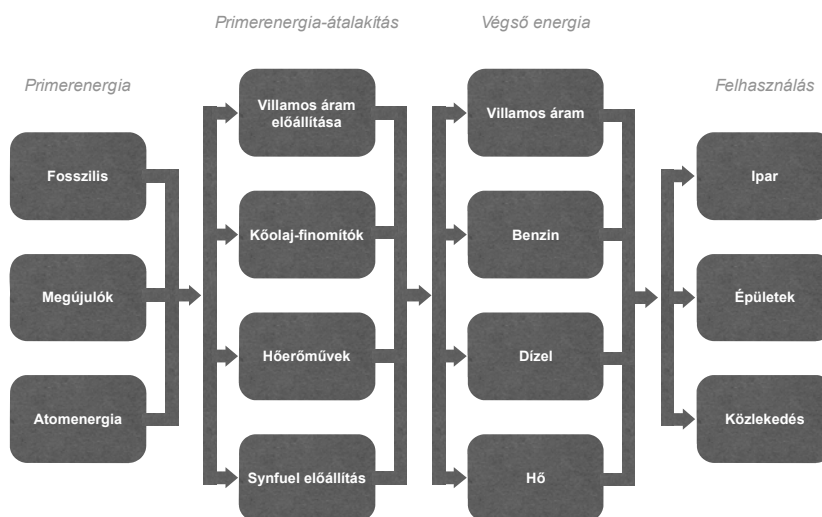
2.6. IEA ENERGY TECHNOLOGY PERSPECTIVE MODELL

A Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA: International Energy Agency) Energia-Technológia Perspektívák (ETP: Energy Technology Perspective) legfrissebb, 2015-ös kiadása az előrebecslés és a visszafejtés statisztikai [5] eszközeit használja 2012 és 2050 között három forgatókönyv [1, 5] segítségével:

1. 2°C (2DS) – ambíciózus, villamos áram előretörésére alapul, mely nagyban dekarbonizált (főként szél- és napenergia felhasználásával)
2. 4°C
3. 6°C (6DS) – tulajdonképpeni BAU, a jelenlegi trendek meghosszabbítása

A 2DS forgatókönyvhöz készült egy kiegészítő scenárió is Hi-Ren néven, ami azt vizsgálja, hogy mi-ként érhetőek el a 2DS-ben meghatározott célok abban az esetben, ha az atomenergia és a CCS valamilyen okból nem hozza a várt eredményeket.

A program segítségével eldönthető, hogy az előre definiált 6 eszköz (dekarbonizációs pálya – [4]) közül melyiket vagy melyikeket fogja a felhasználó használni a kitűzött cél elérése érdekében. A program lehetőséget nyújt a vizualizált eredmények Excel fájlba történő exportálására. A technológiai paraméterek vizsgálatánál a program csak a ma (2015-ben) kereskedelmi forgalomban kapható technológiákat vizsgálja. Az ETP modell az energia kereslet és kínálat szektoronkénti vizsgálatára épül a TIMES modell alapján. Az energetikai vizsgálatot a program 3 szektoron végzi el, sematikus felépítését a 4. ábra mutatja.



4. ábra
TIMES modell alkalmazása a ETP modellben
Forrás: <http://www.iea.org/etp/etpmodel>

Alapvetően a modell a 2°C forgatókönyvre fókuszál (ebben 2050-re a villamos energia a legfontosabb – aránya meghaladja a kőolajét is a teljes energiafelhasználásban), és számításai (többek között) a következő kitételeken alapulnak:

1. Az összesített emissziók az ipari folyamatok emisszióit is tartalmazzák
2. A közlekedési emissziók tartalmazzák a nemzetközi szállítás és légitranszport emisszióinak 50%-át (az adott országból vagy régióból induló/oda érkező közlekedési igényekre vonatkoztatva)
3. Az energiahatékonyság tartalmazza az „elkerült” közlekedést (pl. telekommunikáció)
4. Az elektromos és üzemanyagcellás járművek előnyeiket két tényezőben veszik figyelembe (energiahatékonyság, átállás új üzemanyagra)

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A modelleket áttekintve látható (1. táblázat), hogy a modellek eltérő bemeneti adatigénnyel rendelkeznek és eltérő projekciós időtávot használnak. Egyes modellek csak technológiai paramétereket használnak, mint például új hajtásmódok megjelenése és elterjedése, míg más modellek a hosszú időtáv miatt például számolnak a gazdasági hatásokkal. Ilyen gazdasági hatások lehetnek például az alternatív tüzelőanyagok elterjedésének lehetősége, a fosszilis tüzelőanyagok megdrágulása vagy a megváltozott közlekedéspolitikai környezet. Egyes modellek ezen túlmenően társadalmi folyamatokkal is számolnak. Ezen folyamatok nem egyszerűen a populáció változását jelentik, hanem például a közforgalmi közösségi közlekedés használatának attitűdjét vagy a gyaloglási távolság változását. Minél komplexebb egy modell, annál komplexebb (több, bonyolultabb) adat megadását igényli. Ráadásul nem is egyszerűen több paraméterről van szó, hanem a paraméterek idősoráról. Sok esetben ezeket a paramétereket, adatokat ma sem gyűjtik és nincs adatuk az elmúlt évtizedről sem. Az alábbiakban felsoroltuk a főbb bemenő paramétereket a teljesség igénye nélkül – a legtöbb modellben erre lenne szükség.

A vizsgált modellek összehasonlítása

1. táblázat:

Modell neve	Technológiai Paramétereket vizsgálja?	Gazdasági Paramétereket vizsgálja?	Társadalmi Paramétereket vizsgálja?	Előrebecslési időtáv	Dekarbonizációs pályák
Mobile6.2	☺	☹	☹	2050	-
MOVES	☺	☹	☹	2050	-
Global Calculator	☺	☺	☺	2050	20 + 1 a felhasználó által programozható

Modell neve	Technológiai Paramétereket vizsgálja?	Gazdasági Paramétereket vizsgálja?	Társadalmi Paramétereket vizsgálja?	Előrebecslési időtáv	Dekarbonizációs pályák
TREMOVE	☺	☺	☺	2020	Felhasználó által programozható
ForFITS	☺	☺	☺	2040	5 + felhasználó által programozható
IEA	☺	☹	☹	2050	6 előre definiált

Technikai paraméter: gépjárműállomány nagyságát hajtásmód és tüzelőanyag szerinti bontásban évenként; a hajtásmódok és tüzelőanyagok emissziós tényezője.

Gazdasági paraméter: a GDP változása; a gépjárművek kihasználtsága; az újonnan forgalomba helyezett gépjárművek darabszámát évente, hajtásmód és tüzelőanyag szerint; a közforgalmú közösségi és egyéni közlekedés aránya; tüzelőanyag árának és adótartalmának változása; úthasználati díjak változása.

Társadalmi paraméter: a lakosság számának változása; az éves futásteljesítmény; lakosság közlekedési célú fizetési hajlandósága; gyaloglási távolság hosszútávú változása; közforgalmi közösségi közlekedés használati attitűd

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bennaceur, K., & Gielen, D. (2010). Energy technology modelling of major carbon abatement options. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(2), 309-315.
- [2] Fegyverneki Sándor (2009): Valószínűség-számítás és matematikai statisztika, TÁMOP 4.1.2-08/1/A-2009-0033 elektronikus jegyzet
- [3] Fontaras, G., Kouridis, H., Samaras, Z., Elst, D., & Gense, R. (2007). Use of a vehicle-modelling tool for predicting CO₂ emissions in the framework of European regulations for light goods vehicles. *Atmospheric Environment*, 41(14), 3009-3021.
- [4] Fulton, L., Cazzola, P., & Cuenot, F. (2009). IEA Mobility Model (MoMo) and its use in the ETP 2008. *Energy Policy*, 37(10), 3758-3768
- [5] Gielen, D., & Taylor, M. (2007). Modelling industrial energy use: the IEAs energy technology perspectives. *Energy Economics*, 29(4), 889-912
- [6] Kioutsoukias, I., Kouridis, C., Gkatzoflias, D., Dilara, P., & Ntziachristos, L. (2010). Uncertainty and sensitivity analysis of national road transport inventories compiled with COPERT 4. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(6), 7690-7691.
- [7] Lénárt Csaba, Nagy Ildikó (2007): Környezeti folyamatok modellezése – modellezés alapjai, HEFOP 3.3.1., elektronikus jegyzet
- [8] Nakićenović, N., Swart, R. (2000): Special Report on Emissions Scenarios: a Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press
- [9] Pino-Cortés, E., Díaz-Robles, L. A., Cubillos, F., Fu, J. S., & Vergara-Fernández, A. (2015). Sensitivity analysis of biodiesel blends on Benzo [a] pyrene and main emissions using MOVES: A case study in Temuco, Chile. *Science of The Total Environment*, 537, 352-359
- [10] Siskos, P., Capros, P., & De Vita, A. (2015). CO₂ and energy efficiency car standards in the EU in the context of a decarbonisation strategy: A model-based policy assessment. *Energy Policy*, 84, 22-34.
- [11] Taylor et al., 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4) pp485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- [12] TML, 2007: Transport&Mobility Leuven: TREMOVE model description
- [13] UNDA, 2012: UNDA Seventh Tranche (2012): CO₂ Emissions from Inland Transport: Statistics, Mitigation Policies, and Modelling Tools
- [14] UNECE (2013): ForFITS - User Manual
- [15] Wallace, H. W., Jobson, B. T., Erickson, M. H., McCoskey, J. K., VanReken, T. M., Lamb, B. K., ... & Zhang, W. (2012). Comparison of wintertime CO to NO_x ratios to MOVES and MOBILE6. 2 on-road emissions inventories. *Atmospheric Environment*, 63, 289-297
- [16] Wu, Y., Song, G., & Yu, L. (2014). Sensitive analysis of emission rates in MOVES for developing site-specific emission database. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 193-206
- [17] Yao, Z., Wei, H., Perugu, H., Liu, H., & Li, Z. (2014). Sensitivity analysis of project level MOVES running emission rates for light and heavy duty vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(2), 81-96.
- [18] Zhang, K., & Batterman, S. (2010). Near-road air pollutant concentrations of CO and PM 2.5: a comparison of MOBILE6. 2/CALINE4 and generalized additive models. *Atmospheric Environment*, 44(14), 1740-1748