

Tudományos közlemény

# Számszerűsített Térbeli Modell Rendszer fejlesztése a különböző közlekedési beruházások hatásainak optimalizálása érdekében

Beküldve: 2024.01.17.  
Elfogadva: 2024.07.01.  
Online közzétéve: 2024.11.29.

**id FÜTYÜ ISTVÁN** szakértő II, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Mobilitás Kutatóközpont, futyu.istvan@kti.hu

**Kivonat:** A kutatás célja a közlekedési munkamegosztás térbeli vizsgálata, annak pozitív befolyásolása és várható hatásainak becslése különböző ösztönzők alkalmazása mellett. A munkamegosztás regionális / körzetek közötti hatékonyabb eloszlása mellett a további cél a modal-shift hasonló alapokon történő térbeli vizsgálata és a különböző multimodalitást ösztönző beavatkozások, valamint az innovatív és kooperatív rendszerek alkalmazásának és hatásainak modellezése. Az intermodalitás EU szinten már régóta fokozott és kitüntetett figyelmet kap, továbbá a technológiai fejlődés eredményeképpen a különböző módszertanok is újra értelmezhetőek, azok könnyebben, hatékonyabban és fokozott hasznossággal alkalmazhatóak. Az EU-s közlekedéspolitikai és klímacélok megvalósulása is jelentős mértékben függ az intermodalitástól, és az egyes beruházások optimális alkalmazásától, amelyhez a térbeli modell rendszer EU-szintű kiterjesztése további hozzáadott értékkel szolgálhat.

*Kulcsszavak: Számszerűsített Térbeli Modell Rendszer; modal-shift; közlekedés*

## Development of a Spatial Computable General Equilibrium based Model System to optimise the impact of different transport investments

**Abstract:** The main aim of the research is to investigate the modal-share on a spatial way and to estimate its positive impact and expected effects of different incentives. In addition, the encouragement of multimodality, as well as innovative and cooperative schemes are also aimed. Intermodality receiving increased and prominent attention at EU level, and technological progress has also led to a reinterpretation of the different methodologies, making them easier, more efficient, and easier to apply, which is targeted by the EU transport policy and climate change objectives (thus the extension of the modelling system at EU level could provide further added value).

*Keywords: Spatial Computable General Equilibrium Model; modal-shift; transportation*

## Bevezetés

A közlekedés és a mobilitás mindennapi életünk szerves részét képezi, annak szerepe, valamint hatékonyságának és fenntarthatóságának növelése egyre nagyobb hangsúllyal bír napjainkban. Az azonnali, kényelmes és rugalmas mozgás az emberiség alapvető igényévé vált. A mobilitás és a motorizáció iránti növekvő igény mellékhatásként a hagyományos közlekedési hálózatok és módok kiegyensúlyozatlanná váltak. A személygépkocsik túlzott elterjedése fokozott közúti torlódásokhoz, gyakoribb és súlyosabb balesetekhez vezet, számos további externáliák mellett (zaj, emisszió). A közlekedési rendszer térbeli elemzése SCGE modellekkel képes meghatározni a társadalmi-gazdasági egyensúlyt, kimutatható az egyes bemeneti változók módosítására kialakuló új egyensúlyi pont, vagy akár meghatározhatóak a térben a javasolt, fokozott hasznosságú fejlesztési területek is. Kutatásom célja egy olyan SCGE-modell keretrendszerének kidolgozása, amely a közlekedési ágazatot és annak szabályszerűségeit alapvető elemként veszi figyelembe, miközben képes meghatározni és előre jelezni az optimális egyensúlyi pontot a megfelelő beruházások vagy a modellezett környezetben szükséges változások meghatározása érdekében.

## Módszertan és modellrendszer

A térbeli számszerűsíthető egyensúlyi (Spatial Computable General Equilibrium, SCGE) modellek olyan gazdasági modellek, amelyek a területi eloszlást és a gazdasági egyensúlyt egyidejűleg figyelembe veszik. Ezek a modellek átfogó és részletes módon vizsgálják egy adott terület (pl. ország vagy régió) gazdaságát és egyéb számszerűsíthető adottságait (népsűrűség, migráció stb.), lehetővé teszik a különböző befolyásoló tényezők térbeli elemzését és az egyes beavatkozások hatásainak elővetítését (Samuelson, 1997). Az SCGE modellel a gazdaság különböző szektorai, régiói és piaci sajátosságai, valamint egyéb kitüntetett tényezők (mint például a különböző közlekedési fejlesztések) és azok közötti kapcsolatok is vizsgálhatók.

A modellrendszer felhasználása elsődlegesen a döntéstámogatási és hatásvizsgálati célokra javasolt, ugyanis objektív és összemérhető kimenetet ad a különböző bemeneti paraméterekre. Az SCGE modellek komplex számításokon alapulnak, amelyek során figyelembe vehetők az egyes gazdasági szereplők (szektorok, régiók) különböző jellemzői és viselkedési mintái (Tavasszy et al., 2011). Ez teszi lehetővé többek között a szükséges változások területi alapon történő indikálását.

Az általam tervezett modellrendszerben egy alap térbeli egyensúlyi modell kiterjeszhetőségét vizsgálom közlekedési oldalról, különböző aspektusok, kulcstényezők figyelembevételével.

Ilyen kulcstényezőként elsődlegesen a következő hazai és nemzetközi közlekedéspolitikai célokban is prioritált elemeket – ezek hatékony integrálhatóságát – vizsgálom:

- Multimodalitás, és ezen belül
  - a közlekedési munkamegosztás (modal-split)
  - az egyes módok közötti hatékonyabb eloszlás serkentése (modal-shift)
  - az infrastrukturális és mobilitási szűk keresztmetszetek feltárása
- különböző innovatív mobilitási megoldások hatásai
  - a közlekedésbiztonságra
  - a demográfiára
- modell kiterjesztésének és exponálásának lehetőségei
  - funkcionális
  - területi

A modell és módszertan tágabb megközelítésből a hagyományos I/O és a számszerűsített egyensúlyi modellek újragondolt módszerének tekinthető (de Palma, 2011). Az SCGE modellek a társadalmi-gazdasági egyensúlyt számítható módon ábrázolják, miközben figyelembe veszik a földrajzi allokációkat és a területi eloszlásokat is.

A jelenlegi modellezési keretrendszer a közlekedési hálózat javítását célzó különböző beavatkozásokat és fejlesztéseket elemzi a zökkenőmentesebb és gyorsabb mobilitás érdekében, illetve a fenntarthatóság, a közlekedési módok átrendeződése és a gazdasági növekedés előmozdítása érdekében (a közvetett hatásokat is beleértve).

A módszertani alapok az Anas–Fujita–Krugman-modellből származnak. Ezzel összhangban került kidolgozásra egy alapmodell, amelyben a közlekedés térbeli vizsgálata eltér a korábbi „jéghegy”-elv alapú, együttthatóként megjelenő megközelítéstől (Anas, 1992; Fujita – Krugman, 1995; Fujita – Hamaguchi, 2001).

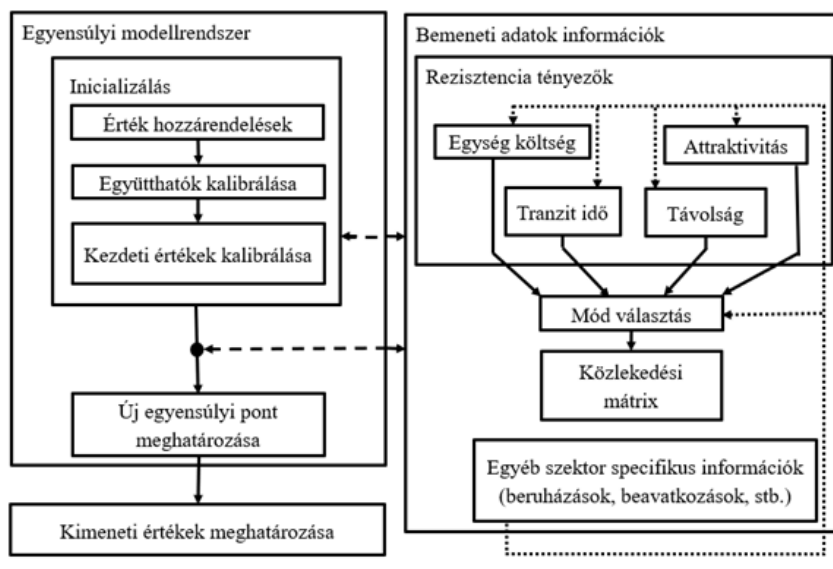
Az alapmodellben tehát a közlekedés, mint önálló összetevő jelenik meg, amely a későbbi fázisokban és az igények szerint szabadon bővíthető.

A modell alapjellemezői a következők:

- A vizsgált környezetet földrajzi régiókra osztja.
- Minden régióban megjelennek a fogyasztók, akik valamely régió munkaerejét képezik.
- A régiókban megkülönböztethetők az adott térségre jellemző erőforrások és azok eloszlási rugalmassága.
- Fogyasztói oldalról a cél a hasznok maximalizálása: minden fogyasztó motivált arra, hogy a fizetését különböző régiók termékkosarára költse, maximalizálva azok hasznosságát.
- A leegyszerűsített alaprendszerben nem kalkulálok megtakarításokkal, illetve a rendszer határain átívelő (export/import) forgalommal.
- A helyváltoztatási és a termékkosarak szállítási terheit (közlekedési költségek) a fogyasztók viselik.

- A közlekedési költség differenciáltan jelentkezik, a modális döntések alapján:
  - egy átfogó gazdasági szereplőnél (üzemanyagszolgáltató, vagy közösségi közlekedési szolgáltató), illetve
  - a jövőben tervezett a modell kiterjesztése e-kereskedelmi vonatkozásban (logisztikai szolgáltató által), valamint a pandémia mellékhatásaként is jelentkező, otthoni munkavégzés fokozott elterjedésének hatásvizsgálatával és integrációjával.
- A fogyasztás határa az egyének jövedelme.
- A modellben, a vállalatok a bevételt a termelésre költik, így a termelés korlátja a rendelkezésre álló erőforrás (munkaerő), és az eladásokból származó bevételek.
- A különböző régiók termékkosarai mindenki számára elérhetőek.

A modellrendszer működési folyamatainak logikai struktúráját az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra A modellrendszer sematikus működési ábrája

Forrás: saját szerkesztés

A fő modellezési egyenletek beállítása után a következő lépés az inicializálás, azaz a kezdeti paraméterek beállítása. A rendelkezésre álló adatforrásokból a kalibrációs függvények segítségével beállításra kerülnek a fő működési paraméterek (lásd alább a (11), (12), (13) egyenleteket), és a közlekedésmátrix előállítása is ennek a lépésnek a része.

A közlekedésmátrix elkészítése a modellben egy összetett, multikritériumos, és a későbbi kiterjesztési igények és elképzelések szerint, bővíthető feladat. A modális döntéseket többtényezős súlyozó függvények (4), (5) segítségével alkalmazza a modell, fő döntési tényezőként a költség, az idő és a kényelmi szintet tekintve. Majd a modális eloszlás függvényében kerül aggregálásra a közlekedésköltségmátrix.

Az externális és környezeti költségek megjelenítése jelenleg még nem képezi a modellrendszer részét, de a jövőbeli fejlesztési célok között szerepelnek.

Az inicializálás befejeztével a modell alkalmas a bemeneti információk feldolgozására a különböző beavatkozások és beruházások hatásainak vizsgálatára érdekében.

A bemeneti hatások a teljes modellt befolyásolják (az inicializálás során kalibrált együtthatókat is beleértve). A modell a különböző inputok hatására számszerűen leolvasható és vizualizálható kimeneti adatokat ad, a rendszer így alkalmas a döntéshozatal objektív támogatására, és további adatfeldolgozással az eredménymátrixok könnyen kiértékelhető megjelenítésére is alkalmas.

A fogyasztói haszon maximalizálása a klasszikus és széles körben használt CES termelési függvénnyel, a Cobb–Douglas hasznossági függvényével írható le (Saito, 2012; Török – Török – Heinitz, 2014; Török – Török, 2014) (1):

$$U_j = \prod_i (X_{ij}^{a_{ij}}) \quad (1)$$

ahol:

$i = [1, r]$ ,

$j = [1, r]$ ,

$r = a$  régiók száma

$U_i$  = fogyasztói hasznosság "i" régióban,

$X_{ij}$  = "i" termékkosár fogyasztása "j" régióban,

$a_{ij}$  = "i" termékkosár helyettesítési rugalmassága "j" régióban ( $\sum_i a_{ij} = 1$ ).

A korlátozó tényező fogyasztói oldalról a munkabér (2):

$$\sum_i (W_i - Tw_{ij}) \cdot M_{ij} = \sum_i (P_i + T_{ij}) \cdot X_{ij} \quad (2)$$

ahol:

$W_{ij}$  = átlagbér (Wage) // "i" régióban lakó "j" régióban dolgozó

("j" termékkosár előállításában dolgozó),

$Tw_{ij}$  = Munka vonatkozású közlekedési költség (Transport cost) // "i" és "j" régiók közötti ingázás költsége

$M_{ij}$  = munkaerő // "i" régióban lakó "j" régióban dolgozó,

$P_i$  = "i" régió termékkosárának ára,

$T_{ij}$  = Fogyasztási vonatkozású közlekedési költség // "i" régióban elfogyasztott "j" régió termékkosárának közlekedési költsége.

A zárt rendszer fenntartása érdekében a közlekedési költségek egy aggregált szolgáltatónál jelentkeznek bevételként (3):

$$X_{tr_i} = \sum_j ((Tw_{ij} \cdot M_{ij}) + (T_{ij} \cdot X_{ij})) / P_i \quad (3)$$

ahol:

$X_{tr_i}$  = aggregált szolgáltató "i" termékkosár fogyasztása

A munkába járás kapcsán felmerülő, modális döntésekkel súlyozott közlekedési költség függvényei (4), (5):

$$MS_{ij} = \{(s_{ij}/CT_{U_{priv}}) \cdot (v_{publ_{ij}}/CV_U) \cdot A_{CL_{priv}}\} / \{(s_{ij}/CT_{U_{publ}}) \cdot (v_{publ_{ij}}/CV_U) \cdot A_{CL_{publ}}\} \quad (4)$$

$$Tw_{ij} = MS_{publ_{ij}} \cdot CT_{U_{publ}} \cdot s_{ij} + MS_{priv_{ij}} \cdot CT_{U_{priv}} \cdot s_{ij} \quad (5)$$

ahol:

$MS_{ij}$  = „Modal split” "i" és "j" régiók közötti ingázás vonatkozásában (ez egyéni és közösségi közlekedés aránya),

$CT_U$  = Költség vonatkozású attraktivitási tényező,

$CV_U$  = Eljutási idő (sebesség) vonatkozású attraktivitási tényező,

$s$  = Régiók közötti átlagos távolság,

$v$  = Eljutási idő (sebesség),

$A_{CL}$  = Kényelmi szint vonatkozású attraktivitási tényező.

A modellrendszer leképezése (1) és (2) függvényekből történik, Lagrange feltételes szélsőérték módszerrel. Melynek eredményeképp a következő (6) egyenletrendszer adódik fogyasztói oldalról:

$$(a_{ij}/a_{kj}) \cdot (X_{kj}/X_{ij}) = (P_i + T_{ij}) / (P_k + T_{kj}) \quad (6)$$

ahol:

$k = [1, r]$ , és  $k \neq i$ .

Míg termelési oldalon a profitmaximalizálást tekintve célkitűzésnek, és az egyensúlyi pontban a keresleti és kínálati optimummal felírható az alábbi (7) összefüggés.

$$Q_i = \sum_j X_{ij} \quad (7)$$

ahol:

$Q_i$  = "i" régió termelése.

A munkabérek teljes egészében a termékkosarakra fordítódnak (Az aggregált közlekedési szolgáltató bevételeit is ide számítva) adódik a (8) egyenletrendszer.

$$\sum_j P_i \cdot X_{ij} + P_i \cdot X_{tr_i} = \sum_j W_i \cdot M_{ij} \quad (8)$$

Termelési oldalról az elérhető erőforrások (munkaerő) tekintve korlátozó tényezőnek felírható (9):

$$\sum_j X_{ij} = B_i \prod_j (M_{ij}^{b_{ij}}) \quad (9)$$

ahol:

$B_i$  = termelési együtttható,

$\delta_{ij}$  = erőforrás rugalmassági tényező ( $\sum_i \delta_{ij} = 1$ ).

Lagrange feltételes szélsőérték optimalizáció után adódik (10):

$$\delta_{ij} / M_{ij} = \delta_n / M_n \quad (10)$$

Az optimalizációk és kalibráció után a modell rendszer a (2), (3), (6), (8), (9) and (10) egyenletekkel írható le. Az együttthatók kalibrálását a (11), (12) és (13) egyenletrendszerrel végezve:

$$B_i = \sum_j X_{ij} / ( \prod_j M_{ij}^{\delta_{ij}} ) \quad (11)$$

$$a_{ij} = ( X_{ij} \cdot ( P_i + T_{ij} ) ) / \sum_j ( X_{ij} \cdot ( P_i + T_{ij} ) ) \quad (12)$$

$$\delta_{ij} = ( W_i - T_{w_{ij}} ) \cdot M_{ij} / \sum_j ( ( W_i - T_{w_{ij}} ) \cdot M_{ij} ) \quad (13)$$

A modell a közlekedéssel kapcsolatos adatokat egy külön alrendszerben gyűjti és dolgozza fel további felhasználásra, a modális döntések és a közlekedési mátrixok leképezéséhez.

A modális megoszlás (4) leképezése után a szállítási költségek súlyozásával (5) egy aggregált kiindulási-célforgalmi mátrix kerül definiálásra. Az SCGE-modell ezeket a kimeneti mátrixokat használja fel annak meghatározására, hogy a tervezett beavatkozásnak hol lehet a legnagyobb haszna.

## Konklúzió

A klasszikus SCGE-módszertan adaptálásával a közlekedéshez kapcsolódó, több régióra kiterjedő, statisztikai és mért adatokon alapuló, döntéshozatalt támogató, bővíthető alapmodell került kifejlesztésre.

A modellezési keretrendszerben a közlekedési szegmens önállóan reprezentálásra kerül, és a regionális részletezettségigények és kapacitás szerint tovább bontható.

A kifejlesztett modell alkalmas az adott (pl. közlekedéshez kapcsolódó) beavatkozások (infrastruktúra-fejlesztés, karbantartás, regionális ösztönzők stb.) becsült társadalmi-gazdasági hatásainak (például a munkavállalók napi forgalma, a termelés növekedés, bérek és a fogyasztás változása stb.) előre jelzésére és térbeni tervezésére.

A modellrendszer továbbá alkalmas a különböző fejlesztések hatásainak (pl. a régiók közötti közlekedési módváltási döntések) becsülésére.

## Összegzés

A közlekedési hálózatok és annak tervezése, szervezése, irányítása, ellenőrzése a gazdaságunk és mindennapi életünk alapvető része és igénye. Az innovatív és korszerű megoldások, valamint a célzott és hatékony fejlesztések elengedhetetlenek a fenntartható és gazdaságos fejlődéshez.

A fenntarthatóság és hatékonyság fokozása napjaink beruházásainak fő fókuszpontja, mely közlekedési vonatkozású eszköze lehet (többek között) a módok közötti munkamegosztás kedvező befolyásolása.

A rendszer további fejlesztési irányaként és következő lépéseként egy mélyebb, részletesebb modális alkalmazást látok, illetve a különböző közlekedéstámogató rendszerek alkalmazásának és optimális kiépítésének térbeli elemzésének kialakítása is célszerű (mint pl. az ITS és C-ITS alkalmazások rendszerbe történő integrálhatósága, optimális beruházási helyszínek azonosítása stb.) a közlekedési teljesítmény növelése érdekében.

A modell európai szintre való kiterjesztése szintén a távlati célkitűzéseim között szerepel.

## Felhasznált irodalom

- Anas, Alex (1992): On the birth and growth of cities: Laissez-faire and planning compared, *Regional Science and Urban Economics*, 22:2, 243–258. [https://doi.org/10.1016/0166-0462\(92\)90014-R](https://doi.org/10.1016/0166-0462(92)90014-R)
- de Palma, André et al. (2011): *A Handbook of Transport Economics*, Edward Edgar Publishing, 928 o.
- Fujita, Masahisa – Hamaguchi, Nobuaki (2001): Intermediate Goods and the Spatial Structure of an Economy *Regional Science and Urban Economics*, 31:1, 79–109. [https://doi.org/10.1016/S0166-0462\(00\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S0166-0462(00)00066-1)
- Fujita, Masahisa – Krugman, Paul (1995): When is the economy monocentric?: von Thünen and Chamberlin unified, *Regional Science and Urban Economics*, 25:4, 505–528. [https://doi.org/10.1016/0166-0462\(95\)02098-F](https://doi.org/10.1016/0166-0462(95)02098-F)
- Saito, Tetsuya (2012): How Do We Get Cobb–Douglas and Leontief Functions from CES Function: A Lecture Note on Discrete and Continuum Differentiated Object Models, *Journal of Industrial Organization Education*, 6:1, 1–13. <https://doi.org/10.1515/1935-5041.1037>
- Samuelson, Paul A. (1997): Growth Theory Tries Once Again, *Japan and the World Economy*, 9(2), 283–286. [https://doi.org/10.1016/S0922-1425\(97\)00008-X](https://doi.org/10.1016/S0922-1425(97)00008-X)
- Tavasszy, Lóránt A. –Thissen, M. J. P. M. – Oosterhaven, J. (2011): Challenges in the Application of Spatial Computable General Equilibrium Models for Transport Appraisal, *Research in Transportation Economics*, 31:1, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2010.11.003>
- Török Ádám – Török Árpád – Heinitz, Florian (2014): Usage of Production Functions in the Comparative Analysis of Transport Related Fuel Consumption, *Transport and Telecommunication Journal*, 15:4, 292–298. <https://doi.org/10.2478/tjt-2014-0025>
- Török Árpád – Török Ádám (2014): Macroeconomic Analysis of Road Vehicles Related Environmental Pollution in Hungary, *Central European Journal of Engineering*, 4:2, 186–191. <https://doi.org/10.2478/s13531-013-0147-0>