



7. OPTIMIZACIJA DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU GRAVITACIJSKE TOČKE



U poglavlju se raspravlja o problemu optimizacije logističke mreže korištenjem Gravitacijske točke (engl. *Gravity Model*). Mreža opskrbnog lanca pretvara sirovine u finalne proizvode i, naravno, isporučuje ih krajnjim kupcima (potrošačima). Uključuje različite vrste objekata. Projektiranje mreže lanca opskrbe (SCND) važno je pitanje povezano s upravljanjem lancem opskrbe (SCM). Najvažnija pitanja o kojima se govori u ovom poglavlju uključuju:

- Mreža opskrbnog lanca,
- Distribucijska mreža,
- Točka gravitacije.

7.1. Uvod

Dizajniranje mreže opskrbnog lanca (engl. *Supply Chain Network Design*, SCND) važno je pitanje povezano s upravljanjem lancem opskrbe (SCM). Opskrbni lanac se shvaća kao složena mreža poduzeća i objekata, od kojih je većina raspoređena na velikom geografskom području. Ovaj opskrbeni lanac trebao bi sinkronizirati niz međusobno povezanih aktivnosti kroz mrežu.

Mreža opskrbnog lanca pretvara sirovine u finalne proizvode i, naravno, isporučuje ih krajnjim kupcima (potrošačima). Uključuje različite vrste objekata. Planiranje i projektiranje mreže opskrbnog lanca stoga se usredotočuje na prepoznavanje broja i vrsta pojedinačnih veza i koordinaciju aktivnosti među njima. Tipične karike u mreži opskrbnog lanca sastoje se



od dobavljača i podizvođača, proizvodnih i montažnih pogona, distribucijskih centara, skladišta i kupaca (Govindan i dr., 2017). Tipični tokovi materijala odvijaju se od dobavljača do kupaca. Mogu se razlikovati i obrnuti tokovi (tzv. obrnuta logistika). Također valja uzeti u obzir i potrebu planiranja i projektiranja tokova i rješavanja problema povezanih s mnogim varijantama/vrstama proizvoda. Analiza vezana uz lokaciju određenog objekta u opskrbnom lancu važno je pitanje za rad i troškove opskrbnog lanca.

7.2. Logistička mreža

Složenost mreže opskrbnog lanca je važna i utječe na odluke o planiranju zajedno s klasičnim odlukama o dodjeli lokacije za postizanje integriranog sustava (Govindan i dr., 2017).

S obzirom na tri razine odlučivanja, na **strateškoj razini** potrebno je donijeti odluke o opskrbnom lancu kao što su: (1) broj, (2) lokacija i (3) kapacitet objekata. Strateške odluke obično imaju vremenski horizont od otprilike tri do pet godina. Strateške odluke koje se tiču dizajna logističke mreže utječu na učinkovitost usluge potražnje kupaca. Odluke o dizajnu ne mogu se donijeti bez razmatranja utjecaja na operativne odluke. **Taktičke odluke** obično traju od tri mjeseca do tri godine. Na primjer, odluke o cijenama obično se postavljaju na razinu taktičkog planiranja. **Operativne odluke** (npr. odluke o ruti vozila) često se kreću od jednog sata do jednog tromjesečja (Govindan i dr., 2017). Naravno, opseg donesenih odluka može ovisiti o prirodi opskrbnog lanca.

Odabir najbolje lokacije za poslovni objekt može se promatrati u smislu opće ili specifične lokacije. Opća lokacija definira određeni prostor na kojem će se smjestiti određeni gospodarski objekt.

Mnogo je čimbenika koji utječu na mjesto objekta u opskrbnom lancu. To su između ostalog:

- izvori sirovina i lokacija tržišta za materijale za proizvodnju (uglavnom sirovine, komponente),
- industrijske tradicije regije, uključujući dostupnost dobavljačima i kupcima (osobito važno za djelatnost posredničkih veza),



- radna snaga (mogućnosti zapošljavanja, naknada, dostupnost, razina kvalifikacija),
- mogućnosti opskrbe energetske faktorima,
- porezni propisi i administrativna ograničenja,
- klima i terenski uvjeti,
- dostupnost cesta i prometnih točaka,
- karakteristike stanovništva, društveno-politički odnosi,
- karakteristike infrastrukture (ceste, škole, komunikacije),
- mogućnost proširenja objekta.

Međutim, detaljna lokacija označava određenu nekretninu ili područje na kojem će se objekt graditi. Odabir detaljne lokacije vezan je uz, primjerice, njezinu tehničku infrastrukturu, dostupnost prometne infrastrukture (lokalne ceste), kao i lokalni razvojni plan.

Detaljnije, također biste trebali uzeti u obzir:

- stope plaća u susjednim pogonima,
- mogućnosti komunikacije za posadu i putne naknade,
- mogućnost kupnje željenog zemljišta u odabranoj regiji,
- ceste, autoceste i razvoj zemljišta s vodovodnom i plinskom mrežom,
- sigurnosne zone za mirise, buku i zagađenje,
- teren koji omogućuje izgradnju proizvodnih i pomoćnih objekata, parkirališta
- mogućnost budućeg proširenja u skladu s potrebama proizvodnog procesa i zahtjevima arhitektonsko-građevinskih tijela.

Opseg detaljne lokalizacije nije obuhvaćen ovom studijom.

Važno je zapamtiti da opskrbeni lanci rade u promjenjivom okruženju. Često se događa da se objekti zatvaraju, otvaraju ili ponovno otvaraju više puta unutar utvrđenog planskog horizonta. Dinamika tržišta tjera na donošenje druge odluke, odnosno na pitanje povećanja, smanjenja ili prijenosa proizvodnih kapaciteta objekata u logističkoj mreži. Drugo važno pitanje je bilo kakva vrsta **poremećaja** u funkcioniranju opskrbenih lanaca. Prekid lanca opskrbe je događaj koji se može dogoditi u dijelu lanca opskrbe zbog, primjerice, prirodnih katastrofa (npr. potresa i poplava) i namjernih ili nenamjernih ljudskih radnji (npr. ratovi i teroristički



napadi). Identificira se kao događaj koji prekida protok materijala u opskrbnom lancu, uzrokujući iznenadni prekid protoka robe. Čak i mali poremećaj može imati razoran učinak na funkcioniranje lanaca opskrbe jer se proteže kroz lanac (Grzybowska i Stachowiak, 2022). A budući da su opskrbni lanci složene i heterogene strukture, osjetljivi su na prijetnje i njima je teško upravljati.

Distribucijska mreža, često nizvodni dio opskrbe mreže, sastoji se od tokova proizvoda od skladišta do kupaca ili trgovaca na malo. Projektiranje takve mreže zahtijeva rješavanje dva teška problema kombinatorne optimizacije, uključujući određivanje lokacije objekta i rute vozila koja će opsluživati korisnike.

7.3. Koncept korištenja gravitacijskog modela u logističkoj mreži

Izgradnja razumne logističke mreže ključ je razvoja regionalne logistike. Gravitacijski model izveden je iz Newtonove gravitacije – podsjetimo: zakon gravitacije je zakon univerzalne gravitacije, čija je svrha opisati silu kojom se tijela međusobno privlače.

Postupno se koncept primjene gravitacijskog modela primijenio i na druge studije, područja i polja po analogiji s fizikom. U svojoj kasnijoj ekspanziji, osim što je dokazala postojanje same teorije gravitacijskog modela, primijenjena je na mnoge discipline. Među njima su najrazvijenija istraživanja vezana uz trgovinu, urbano prostorno povezivanje i logistiku:

- Reilly je prvi upotrijebio gravitacijski model za proučavanje odnosa između gradova (1929),
- Stewart je predložio koncept gravitacijskog modela (1948),
- Tinbergen je uveo gravitacijski model (GM) u međunarodnu trgovinu (1962),
- Huff je predložio korištenje gravitacijskog modela za procjenu tržišnog udjela (1963),



- Bergstrand je razjasnio stranu ponude gospodarstava, ukazujući na teorijske temelje odnosa između obdarenosti faktorima proizvodnje i trgovine s konstantnom elastičnošću transformacije (CET) (1989),
- Kong i suradnici ispitivali su dizajn mreža zelenih površina koristeći gravitacijski model (2010),
- Duanmu i suradnici razvili su model spregnute gravitacije i genetski algoritam za proučavanje distribucije naboja (2012),
- Puertas i sur. Su koristili gravitacijski model za analizu logističke mreže - procjena indeksa učinkovitosti logistike (2014),
- Zhu i Fan koristili su gravitacijski model za proučavanje intenziteta logističkih veza u unutarnoj regionalnoj logistici (2017).

Udaljenost je u Newtonovom modelu aproksimacija otpora gibanju, odnosno čimbenik koji slabi silu privlačenja. To znači da što su partneri udaljeniji jedni od drugih, to je njihova međusobna trgovina manje intenzivna. Glavni razlog za to je postojanje troškova trgovinske transakcije, koji rastu s povećanjem geografske udaljenosti. Ovi troškovi uključuju, između ostalog: troškove transporta ili osiguranje tereta (Bułkowska, 2018).

Geografski položaj oduvijek je bio čimbenik koji je određivao poslovne aktivnosti. Promijenili su se smisao i mogućnosti transporta. Geografija je jedan od glavnih izvora troškova trgovine, odnosno prostorne karakteristike zemalja koje utječu na njihove troškove domaćeg i međunarodnog transporta. Značajke koje se uzimaju u obzir uključuju geografsku udaljenost između objekata ili zemalja. U slučaju analize zemlje, analiza uključuje odgovore na pitanja: imaju li zemlje zajedničku granicu?, jesu li zemlje bez izlaza na more?, jesu li otočne zemlje? Intuicija sugerira da veća geografska udaljenost, nepostojanje zajedničke granice i/ili veća udaljenost od trgovačkog partnera negativno utječu na troškove transporta. Stoga ima negativan utjecaj na međunarodnu trgovinu. Te se posljedice mogu ublažiti razvojem infrastrukture kao što je izgradnja autocesta, tunela, zračnih luka i luka (Azmi i dr., 2024).

Jedan od čimbenika lokacije poslovnih objekata je i blizina prodajnog tržišta. Ovo susjedstvo dobiva novo i ključno značenje. Ponovno postaje prednost nakon iskustva s pandemijom COVID-19 i u vezi s poboljšanjem otpornosti opskrbnih lanaca na poremećaje.



Ovo se posebno odnosi na tvrtke koje:

- proizvoditi ili opskrbljivati kvarljivu robu,
- karakterizira visoka cjenovna elastičnost ponude ili ponuđenih usluga,
- proizvodnja proizvoda koji se odlikuju velikom varijabilnošću potražnje,
- proizvoditi ili prevoziti robu koja je teška za transport.

7.4. Tipični proces donošenja odluka o lokaciji objekta u opskrbnom lancu

Kratkoročno, upravitelj mora djelovati unutar ograničenja koja nameće lokacija. Međutim, dugoročno gledano, lokacija postaje varijabla i menadžer može donijeti odluku o promjeni lokacije kako bi zadovoljio zahtjeve kupaca, dobavljača ili promjene koje nameću konkurenti.

Vanjski čimbenici koji utječu na motivaciju za analizu lokacije novog objekta ili promjenu lokacije objekta su:

- širenje na nova tržišta,
- premještanje stambenih klastera,
- prijetnje konkurencije,
- pojava novih tržišta opskrbe.

Lokacija mora zadovoljiti dva kriterija: kvantitativni (cijena) i kvalitativni. Prvo se razmatraju kvantitativni kriteriji. Uzorak lokacije objekta ima oblik:

$$C = \frac{\sum r_i \cdot d_i \cdot S_i + \sum R_i \cdot D_i \cdot M_i}{\sum r_i \cdot S_i + \sum R_i \cdot M_i}$$

gdje:

C – centar mase

d_i – udaljenost od točke 0 na mreži do mjesta izvora sirovine j

D_i – udaljenost od točke 0 na mreži do točke lokacije izvora prodaje tržišta i

S_i – težinski volumen sirovina kupljenih od dobavljača i



M_i – težinski volumen gotovih proizvoda prodanih na tržištu i

r_i – transportna stopa za gotov proizvod i

R_i – transportna stopa za sirovinu i .

To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:

centar mase = a + b / c+d

a = SUM [transportna stopa za sirovinu (i) * udaljenost od točke 0 na mreži do točke lokacije izvora sirovine (i) * težina volumen sirovine (i)]



b = SUM [transportna stopa za gotov proizvod (i) * udaljenost od točke 0 na mreži do točke lokacije izvora tržišta (i) * težina volumen gotovog proizvoda (i)]

c = SUM [transportna brzina za sirovinu (i) * težina volumen sirovine (i)]

d = SUM [transportna stopa za gotov proizvod (i) * udaljenost od točke 0 na mreži do točke lokacije izvora tržišta (i)]

7.5. Dezagregirani i agregirani modeli gravitacije

Postoje mnoge varijante gravitacijskog modela koje se mogu koristiti za simulaciju tokova između trgovaca i potrošača. Odabir modela ovisi o svrsi njegove uporabe i podacima koji su dostupni za uklapanje u model. Pri odabiru gravitacijskog modela bitan faktor je i stupanj agregacije. Interakcije kupnje između potrošača i trgovaca na malo mogu se predstaviti **raščlanjenim modelom** koji procjenjuje ponašanje potrošača. Također se može prikazati u **agregiranom modelu**. U ovoj se varijanti maloprodajna mjesta u zoni ocjenjuju skupno (Schlaich, 2020). U agregatnim modelima nestaju karakteristike pojedinačnih trgovina i točne udaljenosti između potrošača i trgovca. S druge strane, agregacija u zone značajno smanjuje složenost modela kako se skup odredišta smanjuje.



Od svih modela prostorne interakcije u maloprodaji, Huffov (1963) gravitacijski model jedan je od najčešće korištenih. U svom početnom obliku, ovaj model izračunava vjerojatnosti pokroviteljstva ovisno o veličini trgovine i udaljenosti transporta.

U gravitacijskim modelima važno je odrediti varijablu koja opisuje "snagu međusobnog privlačenja" trgovinskih partnera, odnosno modelski objašnjenu (ovisnu) varijablu. Gravitacijski modeli pružaju geografima i ekonomistima fleksibilan alat za analizu.

7.6. Model uravnotežene gravitacije

Model uravnoteženog težišta koristi se za određivanje lokacije pojedinog gospodarskog objekta (npr. skladišta). Uzima u obzir izvore potražnje različite važnosti i lokacije. Lokacija se određuje pomoću koordinata (X, Y), koje označavaju položaj točke na karti. Važnost je povezana s, primjerice, količinom isporuka, brojem ljudi koji žive na određenoj lokaciji ili prodajnom vrijednošću. Može se koristiti i drugi indikator, važno je da je pravilno prilagođen situaciji. Opisana metoda koristi ponderirane koeficijente točke opskrbe, čime se generira točka na karti označena koordinatama.

Za metodu ponderiranog težišta upotrijebite model:

$$X^* = \frac{\sum W_i \cdot X_i}{\sum W_i}$$

$$Y^* = \frac{\sum W_i \cdot Y_i}{\sum W_i}$$

gdje,

X_i, Y_i – koordinate i-tog izvora potražnje

W_i – težina i-tog izvora potražnje

Ponderirane koordinate (X^*, Y^*) izračunate pomoću modela pokazuju odgovarajuću lokaciju opskrbe točke, uzimajući u obzir važnost pojedinih izvora potražnje.



To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



koordinate točke opskrbe (X) = SUM [(ponderirani pokazatelj izvora potražnje_(i) * koordinate X_(i))] / SUM koordinate X_(i)

koordinate točke opskrbe (Y) = SUM [(ponderirani pokazatelj izvora potražnje_(i) * Y koordinate_(i))] / SUM Y koordinate_(i)

Metoda uravnoteženog težišta omogućuje određivanje položaja jednog gospodarskog objekta na odabranom geografskom području. Metoda je jednostavna za korištenje i svodi se na određivanje dva parametra na geografskoj mreži.

Proširenje ove metode je model:

$$Koordinate_{(X,Y)} = \frac{\sum r_i \cdot d_i \cdot S_i + \sum R_i \cdot D_i \cdot M_i}{\sum r_i \cdot S_i + \sum R_i \cdot M_i}$$

gdje,

Koordinate_(X,Y) – težište

r_i – transportna stopa za gotov proizvod /

d_i – udaljenost od točke 0 na mreži do mjesta izvora sirovine /

S_i – težinski volumen sirovina kupljenih od dobavljača /

R_i – transportna stopa za sirovinu /

D_i – udaljenost od točke 0 na mreži do točke lokacije izvora prodaje tržišta /

M_i – težinski volumen gotovih proizvoda prodanih na tržištu /

Izračuni se izvode za okomite i vodoravne koordinate.

To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



Brojnik (X) = SUM (stopa transporta za gotov proizvod_(i) * udaljenost od točke 0 na mreži do točke lokacije izvora sirovina_(xi) * volumen mase sirovina kupljenih od izvora opskrbe_(i)) + SUM (stopa transporta za sirovinu_(i) * udaljenost od točke 0 na mreži do točke



lokacije izvora tržišta (x_i) * volumen mase gotovih proizvoda prodanih na tržištu (i)

Nazivnik = SUM (vozarina za gotov proizvod (i) * težina volumena sirovina kupljenih od izvora opskrbe (i)) + SUM (vozarina za sirovinu (i) * težina volumena gotovih proizvoda prodanih na tržištu (i))

koordinate točke opskrbe (X) = brojnik (x) / nazivnik

Brojnik (y) = SUM (stopa transporta za gotov proizvod (i) * udaljenost od točke 0 na mreži do točke lokacije izvora sirovina (y_i) * volumen mase sirovina kupljenih od izvora opskrbe (i)) + SUM (stopa transporta za sirovinu (i) * udaljenost od točke 0 na mreži do točke lokacije izvora tržišta (y_i) * volumen mase gotovih proizvoda prodanih na tržištu (i))

Nazivnik = SUM (vozarina za gotov proizvod (i) * težina volumena sirovina kupljenih od izvora opskrbe (i)) + SUM (vozarina za sirovinu (i) * težina volumena gotovih proizvoda prodanih na tržištu (i))

koordinate točke opskrbe (Y) = brojnik (y) / nazivnik

7.7. Gravitacijski model u međunarodnoj trgovini

Tinbergen (1962) je prvi dao intuitivno objašnjenje bilateralnih trgovinskih tokova u međunarodnoj trgovini. Njegova su otkrića postavila temelje za moderni model gravitacije, koji pretpostavlja da je trgovina među nacijama izravno proporcionalna veličini njihovih gospodarstava i obrnuto proporcionalna troškovima trgovine. Ovo treba shvatiti na sljedeći način:

- očekuje se da će veće zemlje više trgovati,
- očekuje se da će zemlje koje su udaljenije manje trgovati (vjerojatno zbog viših troškova trgovine).

Od tada se model naširoko koristi u industrijskoj literaturi za objašnjenje međunarodnih trgovinskih tokova. Zbog učinkovitosti modela gravitacije u istraživanju trgovine, vidjeli smo



značajan porast upotrebe modela gravitacije za procjenu različitih aspekata međunarodne trgovine (Azmi i dr., 2024).

$$X_{ij} = \alpha_i + \beta_1 \cdot GDP_i + \beta_2 \cdot GDP_j + \beta_3 \cdot TC_{ij} + \mu_i$$

gdje:

X_{ij} – tok u međunarodnoj trgovini iz zemlje i u zemlju j

GDP_i i GDP_j – bruto domaći proizvod zemlje podrijetla i zemlje odredišta

TC_{ij} – trošak trgovine između dviju zemalja, procijenjen geografskom udaljenošću između glavnih gradova

μ_i – slučajna greška

α_i – sjecište modela

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – koeficijenti koji mjere utjecaj eksplanatornih varijabli.

To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



trgovinski tok = odsječak + koeficijent ₍₁₎ * prihod zemlje izvoznice + koeficijent ₍₂₎ * prihod zemlje uvoznice + koeficijent ₍₃₎ * trošak trgovine između dvije zemlje + slučajna pogreška

Poznate su i razne varijante predstavljenog modela. Ispod je jedna od njih:

$$X_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \cdot y_i + \beta_2 \cdot y_j + \beta_3 \cdot n_j + \beta_4 \cdot n_i + \beta_5 \cdot d_{i,j} + \beta_6 \cdot D_{ij} + \mu_{ij}$$

gdje:

X_{ij} – tok robe (izvoz ili uvoz iz zemlje i u zemlju j)

y_i – prihod zemlje izvoznice i

y_j – prihod zemlje uvoznice j

n_j – broj stanovnika zemlje i, j

$d_{i,j}$ – udaljenost između zemalja i i j

D_{ij} – lažna varijabla s vrijednošću 1 ako su zemlje i i j članice određenih povlaštenih trgovinskih područja, a 0 u suprotnom



β_0 – predstavlja točku presjeka

$\beta_1 - \beta_6$ – koeficijenti $y_i, y_j, n_j, n_i, d_{i,j}, D_{ij}$ respectively

μ_i – slučajna greška.

To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



trgovinski tok = odsječak + koeficijent $_{(1)}$ * prihod zemlje izvoznice + koeficijent $_{(2)}$ * prihod zemlje uvoznice + koeficijent $_{(3)}$ * stanovništvo zemlje j + koeficijent $_{(4)}$ * stanovništvo zemlje i + koeficijent $_{(5)}$ * udaljenost između zemalja + koeficijent $_{(6)}$ * lažna + slučajna pogreška

7.8. Gravitacijski model lociranja konkurentskih objekata

Većina konkurentnih modela lokacije objekata pretpostavlja da se sva raspoloživa kupovna moć dijeli među konkurentskim objektima.

Lajtmotiv svih konkurentskih lokacijskih modela je postojanje međupovezanosti između četiri varijable: kupovna moć (potražnja), udaljenost, atraktivnost objekta i tržišni udjel. Prve navedene varijable su nezavisne varijable, dok je tržišni udjel zavisna varijabla.

Svaki konkurentski objekt, npr. poslovni objekt, ima "sferu utjecaja". Određena je njegovom razinom privlačnosti. Atraktivniji objekti imaju veći radijus svoje sfere utjecaja. Kupovna moć koju troši potrošač u sferi utjecaja nekoliko objekata ravnomjerno se dijeli između konkurentskih objekata (Drezner i Drezner, 2016).

Konkurentni lokacijski modeli imaju niz primjena, npr. omogućuju lociranje trgovačkih centara, trgovina (npr. trgovine mješovitom robom, specijalizirane trgovine - kućanskih aparata, obuće, knjižare, računala, nakita..), restorana (fast food, kafići, sladoledarnice..), benzinskih postaja, poslovnica banaka i drugo.



7.9. Gravitacijski model za interkontinentalni opskrbeni lanac

Gravitacijski modeli mogu poslužiti kao prikladni alati za procjenu isporuke tereta u luke, pri čemu troškovi vremena i udaljenosti igraju važnu ulogu (Wang i Li, 2021). Kako bi analizirao obrasce interakcije maloprodajnih regija povezanih s različitim aglomeracijama, Reilly je stvorio gravitacijski model tokova robe kao:

$$X_{ij} = \alpha \frac{P_i \cdot P_j}{d_{ij}^2}$$

gdje:

X_{ij} – tijek u opskrbnom lancu

d_{ij} – prostorna udaljenost

P_i, P_j – stanovništvo u mjestu podrijetla i i odredišta j

α – koeficijent gravitacije, konstanta jednaka 1.

To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



protok u opskrbnom lancu = koeficijent gravitacije * stanovništvo u mjestu _(i) * stanovništvo u mjestu _(j) / prostorna udaljenost ²

U ovom modelu poznata je lokacija svih nodalnih gradova. Gravitacijska sila između gradova može se odrediti veličinom grada i prostornom udaljenošću.

PITANJA POGLAVLJA

1. Koji vanjski čimbenici utječu na odluku o preseljenju objekta?
2. Koje su glavne prednosti i ograničenja korištenja različitih varijanti gravitacijskog modela za simulaciju tokova između trgovaca i potrošača?



LITERATURA

Azmi, S. N., Khan, K. H., i Koch, H. (2024). Assessing the effect of INSTC on India's trade with Eurasia: an application of gravity model. *Cogent Economics i Finance*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/23322039.2024.2313899>

Bergstrand J.H. (1989) The generalized gravity equation, monopolistic competition, and the factor-proportions theory in international trade, *Review of Economics and Statistics*, 71(1), 143-153.

Bułkowska M. (2018) Model grawitacyjny w handlu zagranicznym: wybrane aspekty teoretyczne i metodyczne. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, (529), 39-47.

Drezner, T., i Drezner, Z. (2016). Sequential location of two facilities: Comparing random to optimal location of the first facility. *Annals of Operations Research*, 246, 1-15.

Duanmu J., Foytik P., Khattak A. i Robinson R.M. (2012) Distribution analysis of freight transportation with gravity model and genetic algorithm. *Transportation research record*, 2269(1), 1-10.

Govindan K., Fattahi M. i Keyvanshokoo E. (2017) Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions, *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108-141.

Grzybowska K. i Stachowiak A. (2022) Global changes and disruptions in supply chains – preliminary research to sustainable resilience of supply chains. *Energies*, 15 (art. 4579), 1-15.

Huff, D. L. (1963). A probabilistic analysis of shopping center trade areas. *Land economics*, 39(1), 81-90.

Kong F., Yin H., Nakagoshi N. i Zong Y. (2010) Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and urban planning*, 95(1-2), 16-27.

Puertas R., Martí L. i García L. (2014) Logistics performance and export competitiveness: European experience. *Empirica*, 41, 467-480.



Reilly, W. J. (1929). Methods for the study of retail relationships (Vol. 44). Austin: University of Texas, Bureau of Business Research.

Schlaich T., Horn A.L., Fuhrmann M. i Friedrich H.(2020) A Gravity-Based Food Flow Model to Identify the Source of Foodborne Disease Outbreaks. International Journal of Environmental Research and Public Health. 17(2):444. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020444>

Stewart J.Q. (1948) Demographic gravitation: evidence and applications. Sociometry 11(1/2), 31-58.

Tinbergen J. (1962) Shaping The World Economy Suggestions for an International Economic Policy, The Twentieth Century Fund, New York.

Wang H. i Li M. (2021) Improved gravity model under policy control in regional logistics. Measurement and Control, 54(5-6), 811-819. doi:10.1177/0020294020919849

Zhu X. i Fan Y. (2017) Research on the construction of regional hub-and-spoke logistics network in Guangxi under the gravity model. Bus Econ Res, 9, 214-217.