

7. OPTIMIZACIJA DISTRIBUTIVNE MREŽE POMOĆU GRAVITACIONOG MODELA



U poglavlju se raspravlja o problemu optimizacije logističke mreže korišćenjem Gravitacionog modela (engl. *Gravity Model*). Mreža lanca snabdevanja transformiše sirovine u finalne proizvode i, naravno, isporučuje ih krajnjim kupcima (potrošačima). Uključuje različite vrste objekata. Projektovanje mreže lanca snabdevanja (SCND) je važno pitanje povezano s upravljanjem lancem snabdevanja (SCM). Najvažnija pitanja o kojima se govori u ovom poglavlju uključuju:

- Mreža lanca snabdevanja,
- Distributivna mreža,
- Tačka gravitacije.

7.1. Uvod

Dizajniranje mreže lanca snabdevanja (engl. *Supply Chain Network Design*, SCND) važno je pitanje povezano s upravljanjem lancem snabdevanja (SCM). Lanac snabdevanja se shvata kao složena mreža preduzeća i objekata, od kojih je većina raspoređena na velikom geografskom području. Ovaj lanac snabdevanja trebao bi sinhronizovati niz međusobno povezanih aktivnosti kroz mrežu.

Mreža lanca snabdevanja transformiše sirovine u finalne proizvode i, naravno, isporučuje ih krajnjim kupcima (potrošačima). Uključuje različite vrste objekata. Planiranje i projektovanje mreže lanca snabdevanja stoga se fokusira na prepoznavanje broja i vrste pojedinačnih veza i koordinaciju aktivnosti među njima. Tipične karike u mreži lanca snabdevanja sastoje se od dobavljača i podizvođača, proizvodnih i montažnih pogona,



distributivnih 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). Takođe, važno je uzeti u obzir i potrebu planiranja i projektovanja tokova i rešavanja problema povezanih s mnogim varijantama/vrstama proizvoda. Važno pitanje za rad i troškove lanca snabdevanja je analiza vezana za lokaciju određenog objekata u lancu snabdevanja.

7.2. Logistička mreža

Složenost mreže lanca snabdevanja je važna i utiče na odluke o planiranju zajedno s klasičnim odlukama o dodeli lokacije za postizanje integrisanog sistema (Govindan i dr., 2017).

S obzirom na tri nivoa odlučivanja, na **strateškom nivou** potrebno je doneti odluke o lancu snabdevanja 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 utiču na učinkovitost usluge isporuke kupcima. Odluke o dizajnu ne mogu se doneti bez razmatranja uicaja na operativne odluke. **Taktičke odluke** obično traju od tri meseca do tri godine. Na primer, odluke o cenama obično se postavljaju na nivou taktičkog planiranja. **Operativne odluke** (npr. odluke o ruti vozila) često se kreću od jednog sata do jednog tromesečja (Govindan i dr., 2017). Naravno, opseg donetih odluka može zavisi od prirode lanca snabdevanja.

Izbor najbolje lokacije za poslovni objekat može se posmatrati u smislu opšte ili specifične lokacije. Opšta lokacija definiše određeni prostor na kojem će se locirati određeni privredni objekat.

Mnogo je faktora koji utiču na mesto objekata u lancu snabdevanja. To su između ostalog:

- izvori sirovina i lokacija tržišta za materijale za proizvodnju (uglavnom sirovine, komponente),
- regioni s industrijskom tradicijom, uključujući dostupnost dobavljačima i kupcima (posebno važno za delatnosti posredničkih veza),



- radna snaga (mogućnosti zapošljavanja, naknada, dostupnost, nivo kvalifikacija),
- mogućnosti snabdevanja energentima,
- poreski propisi i administrativna ograničenja,
- klima i terenski uslovi,
- dostupnost saobraćajnica i saobraćajnih čvorišta,
- karakteristike stanovništva, društveno-politički odnosi,
- karakteristike infrastrukture (putevi, škole, komunikacije),
- mogućnost proširenja objekta.

Međutim, detaljna lokacija označava određenu nekretninu ili područje na kojem će se objekat graditi. Izbor detaljne lokacije vezan je uz, npr. njenu tehničku infrastrukturu, dostupnost saobraćajne infrastrukture (lokalni putevi), kao i lokalni razvojni plan.

Detaljnije, takođe biste trebali uzeti u obzir:

- nivo plata u susednim pogonima,
- mogućnosti komunikacije za posadu i putne naknade,
- mogućnost kupovine željenog zemljišta u odabranom regionu,
- putevi, autoputevi i razvoj zemljišta s vodovodnom i mrežom gasovoda,
- sigurnosne zone za mirise, buku i zagađenje,
- teren koji omogućava izgradnju proizvodnih i pomoćnih objekata, parking prostora,
- mogućnost budućeg proširenja u skladu s potrebama proizvodnog procesa i zahtevima arhitektonsko-građevinskih tela.

Opseg detaljne lokalizacije nije obuhvaćen ovom studijom.

Važno je zapamtiti da lanci snabdevanja funkcionišu u promjenjivom okruženju. Često se događa da se objekti zatvaraju, otvaraju ili ponovno otvaraju više puta unutar utvrđenog planskog horizonta. Dinamika tržišta tera na donošenje druge odluke, odnosno na pitanje povećanja, smanjenja ili prenosa proizvodnih kapaciteta objekata u logističkoj mreži. Drugo važno pitanje je kakva vrsta **poremećaja** može poremetiti funkcionisanje lanaca snabdevanja. Prekid lanca snabdevanja je događaj koji se može dogoditi u delu lanca snabdevanja zbog,



npr. prirodnih katastrofa (npr. potresa i poplava) i namernih ili nenamernih ljudskih aktivnosti (npr. ratovi i teroristički napadi). Identifikuje se kao događaj koji prekida protok materijala u lancu snabdevanja, uzrokujući iznenadni prekid protoka robe. Čak i mali poremećaj može imati razoran učinak na funkcionisanje lanaca snabdevanja jer se proteže kroz lanac (Grzybowska i Stachowiak, 2022). A budući da su lanci snabdevanja složene i heterogene strukture, osetljivi su na pretnje i njima je teško upravljati.

Distributivna mreža, često nizvodni deo mreže snabdevanja, sastoji se od tokova proizvoda od skladišta do kupaca ili trgovaca na malo. Projektovanje takve mreže zahteva rešavanje dva teška problema kombinatorne optimizacije, uključujući određivanje lokacije objekata i rute vozila koja će opsluživati korisnike.

7.3. Koncept korišćenja gravitacionog modela u logističkoj mreži

Izgradnja racionalne logističke mreže ključ je razvoja regionalne logistike. Gravitacioni model izveden je iz Newtonove gravitacije – podsetimo: zakon gravitacije je zakon univerzalne gravitacije, čija je svrha da opiše silu kojom se tela međusobno privlače.

Postepeno se koncept gravitacionog modela primenio i na druga istraživanja, područja i polja po analogiji s fizikom. U svojoj kasnijoj ekspanziji, osim što je dokazano postojanje same teorije gravitacionog modela, primena je proširena na mnoge discipline. Među njima su najrazvijenija istraživanja vezana uz trgovinu, urbano prostorno povezivanje i logistiku:

- Reilly je prvi upotrebio gravitacioni model za proučavanje odnosa između gradova (1929),
- Stewart je predložio koncept gravitacionog modela (1948),
- Tinbergen je uveo gravitacioni model (GM) u međunarodnu trgovinu (1962),
- Huff je predložio korišćenje gravitacionog modela za procenu tržišnog učešća (1963),



- Bergstrand je razjasnio stranu privredne ponude, ukazujući na teorijske osnove odnosa između ponude i potražnje s konstantnom elastičnošću transformacije (CET) (1989),
- Kong i saradnici ispitivali su dizajn mreža zelenih površina koristeći gravitacioni model (2010),
- Duanmu i saradnici razvili su model spregnute gravitacije i genetski algoritam za proučavanje distribucije naboja (2012),
- Puertas i saradnici su koristili gravitacioni model za analizu logističke mreže - procena indeksa učinkovitosti logistike (2014),
- Zhu i Fan koristili su gravitacioni model za proučavanje intenziteta logističkih veza u unutrašnjoj regionalnoj logistici (2017).

Udaljenost je u Newtonovom modelu aproksimacija otpora kretanju, odnosno faktor 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 trgovinskih transakcija, koji rastu s povećanjem geografske udaljenosti. Ovi troškovi uključuju, između ostalog: troškove transporta ili osiguranje tereta (Bułkowska, 2018).

Geografski položaj oduvek je bio faktor koji je određivao poslovne aktivnosti. Promenili su se smisao i mogućnosti transporta. Geografija je jedan od glavnih izvora troškova trgovine, odnosno prostorne karakteristike zemalja koje utiču na njihove troškove domaćeg i međunarodnog transporta. Karakteristike koje se uzimaju u obzir uključuju geografsku udaljenost između objekata ili zemalja. U slučaju analize država, analiza uključuje odgovore na pitanja: imaju li države zajedničku granicu?, da li su države bez izlaza na more?, da li su ostrvske države? Intuicija sugerise da veća geografska udaljenost, nepostojanje zajedničke granice i/ili veća udaljenost od trgovačkog partnera negativno utiču na troškove transporta. Stoga ima negativan uticaj na međunarodnu trgovinu. Te se posledice mogu ublažiti razvojem infrastrukture kao što je izgradnja autoputeva, tunela, aerodroma i luka (Azmi i dr., 2024).

Jedan od faktora lokacije poslovnih objekata je i blizina prodajnog tržišta. Ovo susedstvo dobija novo i ključno značenje. Ponovo postaje prednost nakon iskustva s pandemijom COVID-19 i u vezi s poboljšanjem otpornosti lanaca snabdevanja na poremećaje.



Ovo se posebno odnosi na kompanije koje:

- proizvode ili isporučuju kvarljivu robu,
- karakteriše visoka cenovna elastičnost ponude ili ponuđenih usluga,
- proizvode proizvode koji se odlikuju velikom varijabilnošću potražnje,
- proizvode ili prevoze robu koja je teška za transport.

7.4. Tipični proces donošenja odluka o lokaciji objekata u lancu snabdevanja

Kratkoročno, menadžer mora delovati unutar ograničenja koja nameće lokacija. Međutim, dugoročno gledano, lokacija postaje varijabla i menadžer može doneti odluku o promeni lokacije kako bi zadovoljio zahteve kupaca, dobavljača ili promene koje nameću konkurenti.

Spoljni faktori koji utiču na motivaciju za analizu lokacije novog objekta ili promenu lokacije objekata su:

- širenje na nova tržišta,
- premeštanje stambenih sektora,
- pretnje konkurencije,
- pojava novih tržišta snabdevanja.

Lokacija mora zadovoljiti dva kriterijuma: kvantitativni (cena) i kvalitativni. Prvo se razmatraju kvantitativni kriterijumi. Izraz lokacije objekta ima oblik:

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

gde:

C – centar mase

d_i – udaljenost od tačke 0 na mreži do mesta izvora sirovine j

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

S_i – težinski volumen sirovina kupljenih od dobavljača i



M_i – težinski volumen gotovih proizvoda prodatih 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 tačke 0 na mreži do tačke lokacije izvora sirovine (i) * težina volumen sirovine (i)]



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

7.5. Dezagregirani i agregirani modeli gravitacije

Postoje mnoge varijante gravitacionog modela koje se mogu koristiti za simulaciju tokova između trgovaca i potrošača. Izbor modela zavisi od svrhe njegove uporabe i podataka koji su dostupni za uklapanje u model. Pri izboru gravitacionog modela bitan faktor je i stepen agregacije. Interakcije kupovine između potrošača i trgovaca na malo mogu se predstaviti **raščlanjenim modelom** koji procenjuje ponašanje potrošača. Takođe se može prikazati u **agregiranom modelu**. U ovoj varijanti se maloprodajna mesta u zoni ocenjuju zajedno (Schlaich, 2020). U agregiranim modelima nestaju karakteristike pojedinačnih trgovina i tačne 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) gravitacioni model jedan je od najčešće korišćenih. U svom početnom obliku, ovaj model izračunava verovatnost veza zavisno od obima trgovine i udaljenosti transporta.

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

7.6. Model uravnotežene gravitacije

Model uravnoteženog težišta koristi se za određivanje lokacije pojedinačnih privrednih objekata (npr. skladišta). Uzima u obzir izvore potražnje različite važnosti i lokacije. Lokacija se određuje pomoću koordinata (X, Y), koje označavaju položaj tačke na karti. Važnost je povezana sa npr. količinom isporuka, brojem ljudi koji žive na određenoj lokaciji ili prodajnom vrednošću. Mogu se koristiti i drugi indikatori, važno je da su pravilno prilagođeni situaciji. Opisana metoda koristi ponderisane koeficijente tačke isporuke, čime se generiše tačka na karti označena koordinatama.

Za metodu ponderisanog težišta upotrebite model:

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

gde,

X_i, Y_i – koordinate i-tog izvora potražnje

W_i – težina i-tog izvora potražnje

Ponderisane koordinate (X^*, Y^*) izračunate pomoću modela pokazuju odgovarajuću lokaciju tačke isporuke, uzimajući u obzir važnost pojedinih izvora potražnje.



To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



koordinate tačke isporuke (X) = SUM [(ponderisani pokazatelj izvora potražnje $_{(i)}$ * koordinate X $_{(i)}$)] / SUM koordinate X $_{(i)}$

koordinate tačke isporuke (Y) = SUM [(ponderisani pokazatelj izvora potražnje $_{(i)}$ * Y koordinate $_{(i)}$)] / SUM Y koordinate $_{(i)}$

Metoda uravnoteženog težišta omogućava određivanje položaja jednog privrednog objekta na odabranom geografskom području. Metoda je jednostavna za korišćenje i svodi se na određivanje dva parametra na geografskoj mreži.

Proširenje ove metode je model:

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

gde,

$Koordinate_{(X,Y)}$ – težište

r_i – transportna stopa za gotov proizvod i

d_i – udaljenost od tačke 0 na mreži do mesta izvora sirovine i

S_i – težinski volumen sirovina kupljenih od dobavljača i

R_i – transportna stopa za sirovinu i

D_i – udaljenost od tačke 0 na mreži do lokacije prodaje i

M_i – težinski volumen gotovih proizvoda prodatih na tržištu i

Izračunavanja se izvode za upravne i vodoravne koordinate.

To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



Brojilac (X) = SUM (stopa transporta za gotov proizvod $_{(i)}$ * udaljenost od tačke 0 na mreži do tačke lokacije izvora sirovina $_{(xi)}$ * volumen mase sirovina kupljenih od izvora snabdevanja $_{(i)}$) + SUM (stopa transporta za sirovinu $_{(i)}$ * udaljenost od tačke 0 na mreži do lokacije prodaje $_{(xi)}$ * volumen mase gotovih proizvoda prodatih na tržištu $_{(i)}$)



Imenilac = SUM (vozarina za gotov proizvod $_{(i)}$ * težina volumena sirovina kupljenih od izvora snabdevanja $_{(i)})$ + SUM (vozarina za sirovinu $_{(i)}$ * težina volumena gotovih proizvoda prodatih na tržištu $_{(i)})$

koordinate tačke isporuke (X) = brojilac $_{(x)}$ / imenilac

Brojilac $_{(y)}$ = SUM (stopa transporta za gotov proizvod $_{(i)}$ * udaljenost od tačke 0 na mreži do tačke lokacije izvora sirovina $_{(yi)}$ * volumen mase sirovina kupljenih od izvora snabdevanja $_{(i)})$ + SUM (stopa transporta za sirovinu $_{(i)}$ * udaljenost od tačke 0 na mreži do tačke lokacije izvora tržišta $_{(yi)}$ * volumen mase gotovih proizvoda prodatih na tržištu $_{(i)})$

Imenilac = SUM (vozarina za gotov proizvod $_{(i)}$ * težina volumena sirovina kupljenih od izvora snabdevanja $_{(i)})$ + SUM (vozarina za sirovinu $_{(i)}$ * težina volumena gotovih proizvoda prodatih na tržištu $_{(i)})$

koordinate tačke isporuke (Y) = brojilac $_{(y)}$ / imenilac

7.7. Gravitacioni 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 direktno proporcionalna veličini njihovih privreda i obrnuto, proporcionalna troškovima trgovine. Ovo treba shvatiti na sledeći način:

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

Od tada se model na široko koristi u industrijskoj literaturi za objašnjenje međunarodnih trgovinskih tokova. Zbog efikasnosti modela gravitacije u istraživanju trgovine, postoji značajan porast njegove upotrebe za procenu različitih aspekata međunarodne trgovine (Azmi i dr., 2024).



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

gde:

X_{ij} – tok u međunarodnoj trgovini iz zemlje I u zemlju J

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

TC_{ij} – trošak trgovine između dve zemlje, procenjen geografskom udaljenošću između glavnih gradova

μ_i – slučajna greška

α_i – secište modela

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – koeficijenti koji mere uticaj eksplanatornih varijabli.

To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



trgovinski tok = odsečak + koeficijent ₍₁₎ * prihod zemlje izvoznice + koeficijent ₍₂₎ * prihod zemlje uvoznice + koeficijent ₍₃₎ * trošak trgovine između dve zemlje + slučajna greška

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

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

gde je:

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 vrednošću 1 ako su zemlje i i j članice određenih povlašćenih trgovinskih područja, a 0 u suprotnom

β_0 – predstavlja tačku preseka

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

μ_i – slučajna greška.



To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



trgovinski tok = odsečak + 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 varijabla + slučajna greška

7.8. Gravitacioni model lociranja konkurentskih objekata

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

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

Svaki konkurentski objekat, npr. poslovni objekat, ima "sferu uticaja" koja je određena njegovim nivoom privlačnosti. Atraktivniji objekti imaju veći radijus svoje sfere uticaja. Kupovna moć potrošača u sferi uticaja nekoliko objekata ravnomerno se deli između konkurentskih objekata (Drezner i Drezner, 2016).

Konkurentski lokacijski modeli imaju niz primena, npr. omogućavaju lociranje trgovačkih centara, trgovina (npr. trgovine mešovitim robom, specijalizovane trgovine - kućnih aparata, obuće, knjižare, računara, nakita..), restorana (fast food, kafići, poslastičarnice...), benzinskih stanica, poslovnica banaka i drugo.

7.9. Gravitacioni model za interkontinentalni lanac snabdevanja

Gravitacioni modeli mogu poslužiti kao prikladni alati za procenu isporuke tereta u luke, pri čemu troškovi vremena i udaljenosti igraju važnu ulogu (Wang i Li, 2021). Kako bi analizirao



obrasce interakcije maloprodajnih regiona povezanih s različitim aglomeracijama, Reilly je postavio gravitacioni model tokova robe kao:

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

gde:

X_{ij} – tok u lancu snabdevanja

d_{ij} – prostorna udaljenost

P_i, P_j – stanovništvo u mestu porekla i i odredišta j

α – koeficijent gravitacije, konstanta jednaka 1.

To je objašnjeno formulom koja se koristi u Excelu:



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

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

Pitanja poglavlja

1. Koji spoljni faktori utiču na odluku o preseljenju objekata?
2. Koje su glavne prednosti i ograničenja korišćenja različitih varijanti gravitacionog 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.