Governance of Population and Family

Journal homepage: www.pdj.ihu.ac.ir

Predicting Inter-Urban Migration Flows in Iran: A Comparative Analysis of Gravity and Radiation Models

Mohammad Vali Aliei[1]

1. Assistant Professor, Department of Demography, Research Institute for Population and Family Governance, Imam Hossein University, Tehran, Iran. Email: mv_aliei@yahoo.com

Received: 25 January 2025**; Revised:** 07 February 2025; **Accepted:** 31 May 2025; **Published:** 23 September 2025

Abstract

Purpose: This study aimed to predict interurban migration flows in Iran using the gravity and radiation model. Rapid urbanization in Iran has caused interurban migration to play an important role in the dynamics of urban systems. Predicting interurban migration flows plays an important role in migration policymaking, urban land use planning, urban management, and economic development.

Methodology: This research used the gravity and radiation model, and the data used included the migration matrix of Iranian cities in 2011-2016, limited to 98 cities with a population of over 100,000 people.

Findings: The gravity model showed that the population of the origin and destination cities has a positive relationship and geographical distance has a negative relationship with the volume of migration. In the radiation model, the probability of migration decreases indirectly with distance and increases directly with the number of intervening opportunities.

Research limitations /Implications: The results of the study showed that the gravity model overestimated the volume of migration to metropolitan areas. On the other hand, the radiation model was more successful in predicting outliers and reducing large errors. However, this model underestimates long-distance migration flows, which is one of its limitations. Therefore, the choice of the appropriate model depends on the purpose of the analysis; the gravity model is more suitable for general patterns and the radiation model for specific and outlier flows. Also, to improve the predictions, it is suggested to use a combination of these two models and add socio-economic indicators.

Keywords: Migration, inter-urban migration , migration forecasting , gravity model , radiation model.

Cite this Paper: Aliei'M.(2025). Predicting Inter-Urban Migration Flows in Iran: A Comparative Analysis of Gravity and Radiation Models. Governance of Population and Family, 2(5), 11–32.

©(2025) The Authors. Governance of Population and Family Published by Imam Hossein University.

This is an Open access article under the CC- BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

حکمرانی جمعیت و خانواده
Journal homepage: www.pdj.ihu.ac.ir

پیش‌بینی جریان‌های مهاجرت بین شهری در ایران با استفاده از مدل جاذبه و تابش

دکتر محمدولی علیئی[۱]

۱. استادیار، گروه جمعیت‌شناسی، پژوهشکده حکمرانی جمعیت و خانواده، دانشگاه جامع امام حسین(علیه‌السلام)، تهران، ایران.
Email: mv_aliei@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۰۶ بهمن ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۰۱ اسفند ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار: ۰۱ مهر ۱۴۰۴

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف پیش‌بینی جریان‌های مهاجرتی بین‌شهری ایران با استفاده از مدل جاذبه و تابش انجام شد. شهرنشینی سریع در ایران باعث شده است که مهاجرت‌های بین‌شهری نقش مهمی در پویایی سیستم‌های شهری ایفا کنند. پیش‌بینی جریان‌های مهاجرت بین شهری نقش مهمی در سیاستگذاری مهاجرت، برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، مدیریت شهری و توسعه اقتصادی دارد.

روش پژوهش: این پژوهش از مدل جاذبه و تابش استفاده کرده است که داده‌های مورد استفاده شامل ماتریس مهاجرتی شهرهای ایران در سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۵ و محدود به ۹۸ شهر با جمعیت بالای ۱۰۰ هزار نفر بوده است.

یافته‌ها: مدل جاذبه نشان داد که جمعیت شهرهای مبدأ و مقصد رابطه‌ای مثبت و فاصله جغرافیایی رابطه‌ای منفی با حجم مهاجرت دارد. در مدل تابش، احتمال مهاجرت به صورت غیرمستقیم با فاصله کاهش یافته و به طور مستقیم با تعداد فرصت‌های مداخله‌گر افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش نشان داد که مدل جاذبه در پیش‌بینی حجم مهاجرت به کلان‌شهرها دچار بیش‌برآورد شد. از سوی دیگر، مدل تابش، در پیش‌بینی مقادیر پرت و کاهش خطاهای بزرگ موفق‌تر عمل کرد. با این حال، این مدل جریان‌های مهاجرتی فواصل طولانی را کم برآورد می‌کند، که یکی از محدودیت‌های آن محسوب می‌شود. بنابراین، انتخاب مدل مناسب به هدف تحلیل بستگی دارد؛ مدل جاذبه برای الگوهای کلی و مدل تابش برای جریان‌های خاص و پرت مناسب‌تر است. همچنین، برای بهبود پیش‌بینی‌ها، استفاده از ترکیب این دو مدل و افزودن شاخص‌های اقتصادی- اجتماعی پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مهاجرت، مهاجرت‌های بین شهری، پیش بینی مهاجرت، مدل جاذبه، مدل تابش،

مقدمه و بیان مسئله

جهان ما با سرعتی چشمگیر در حال شهرنشینی است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ حدود ۷۰ درصد از جمعیت جهان در شهرها ساکن شوند(Wang et al., 2023). ایران نیز مشابه روند جهانی، در طی چند دهه گذشته روند شهرنشینی سریعی را تجربه کرده است. مهاجرت‌های شهر به شهر الگوی غالب مهاجرتی در کشور است که بر اساس داده‌های مهاجرتی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۰، ۶۸ درصد از مهاجرت‌ها شهر به شهر بوده است. در سطح استانی نیز همین الگوی مهاجرتی مشاهده می‌شود، در همه استان‌ها بیشترین تعداد مهاجرین در مسیر مهاجرتی شهر به شهر بوده است؛ با این حال، تنها در شدت این جریان‌ها در بین استان‌ها تفاوت وجود دارد(شرکت بین‌المللی پردازش اطلاعات نقش کلیک، ۱۳۹۹). در چنین وضعیتی، اهمیت درک پویایی سیستم‌های شهری به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این راستا، تحرک انسان نقشی کلیدی ایفا می‌کند. از طریق تحلیل و پیش‌بینی جابجایی افراد درون و بین مناطق شهری، می‌توان به بینش‌هایی دست یافت که از پیشگیری بیماری‌ها، مشکلات مسکن، پیش‌بینی ترافیک و برنامه‌ریزی شهری، کاربردهای فراوانی دارد(Wang et al., 2023).

مبانی نظری

مدل‌های مهاجرت اغلب بر روی اینکه افراد به کجا خواهند رفت، تمرکز دارند اما سوال مهم تر اینکه چند نفر مهاجرت خواهند کرد را نادیده می‌گیرند(Prieto-Curiel et al., 2024). علی رغم اینکه سنت طولانی در مدل سازی جریان‌ها و جابه جایی‌های جمعیت وجود دارد(Liu & Yan, 2019) اما هنوز یکی از مسائل بنیادین در جمعیت شناسی، جغرافیا و اقتصاد است و این حوزه هنوز درحال تکامل است(Yan et al., 2014). برای درک مکانیسم تحرک انسان و پیش بینی جریان‌های مهاجرتی، مدل‌های مختلفی ارائه شده است؛ دِ والک[1] و همکاران(۲۰۲۲) مدل‌های پیش بینی مهاجرت را در هفت گروه تقسیم بندی می‌شوند، که شامل۱) پیش بینی مبتنی بر استدلال[2]، ۲) پیمایش انگیزه مهاجرت[3]، ۳) مدل اقتصادسنجی تبیینی[4]، ۴) مدل کنش متقابل فضایی[5]، ۵) برون یابی سری زمانی[6]، ۶) مدل بیزی[7] و ۷) یادگیری ماشین[8]. در گروه مدل‌های کنش متقابل فضایی، مدل‌های مختلفی مانند مدل جاذبه، مدل فرصت مداخله ای[9](Stouffer, 1960) و مدل تابش(Simini et al., 2012) توسعه یافته است. در بین این مدل‌ها، مدل جاذبه به دلیل فرم ساده و سهولت محاسباتی برای پیش بینی جریان‌های مهاجرتی به طور چشمگیری مورد توجه بوده است(Marshall et al., 2018). مدل جاذبه فرض می‌کند که جابه جایی یا کنش متقابل بین دو مکان متناسب جِرم آن مکان‌ها(مانند جمعیت) است و با افزایش فاصله بین آن‌ها کاهش می‌یابد(Liu & Yan, 2019). این مدل به حداقل یک پارامتر قابل تنظیم[10] وابسته است که باید با استفاده از داده‌های مهاجرت موجود تخمین زده شود(Simini et al., 2012). علاوه بر این، پارامترهای مدل جاذبه از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است(Zheng et al., 2020). بنابراین، هنگام استفاده از مدل جاذبه برای برآورد جریان جمعیت بین مکان‌ها، تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای مدل دشوار است(Luo & Chen, 2024). در کنار

1. de Valk
2. .Argument based Forecast
3. Migration Intention Survey
4. Explanatory Econometric Model
5. Spatial Interaction Model
6. Time-series Extrapolation
7. Bayesian Model
8. Machine Learning
9. Intervention Opportunity
10. Adjustable Parameter

مدل جاذبه، مدل فرصت‌های مداخله‌ای توسط استوفر[1](۱۹۶۰) ارائه شد که از جمله مدل‌های اولیه مورد استفاده در برآورد جریان‌های جمعیت به شمار می‌رود. این مدل فرض می‌کند که عوامل تعیین کننده در جریان مهاجرت بین مبدا و مقصد، تعداد تجمعی فرصت‌ها در مقصد و فرصت‌های موجود در مقاصد نزدیک‌تر است. برای غلبه بر محدودیت‌های مدل جاذبه و فرصت مداخله ای، سیمینی و همکاران(۲۰۱۲) مدل تابش را ارائه کردند. این مدل دارای پارامتر آزاد[2] است و فرض می‌کند که افراد ترجیح می‌دهند نزدیک‌ترین مکانی را انتخاب کنند که مزایایی بالاتر از مبدأ ارائه دهد. مدل تابش عملکرد پیش‌بینی قوی برای طیف گسترده‌ای از جریان‌ها، مانند رفت‌وآمدهای روزانه، مهاجرت و حمل‌ونقل کالا در ایالات متحده نشان می‌دهد(Song et al., 2022). علی رغم کاربردهای گسترده‌ای که این مدل‌ها پیدا کرده اند، اما ما شواهدی از عملکرد این مدل‌ها برای پیش بینی جریان‌های مهاجرت داخلی نداریم. بنابراین، این پژوهش با هدف پیش بینی جریان‌های مهاجرت بین شهری با استفاده از مدل‌های جاذبه و تابش انجام می‌شود.

مدل‌های کنش متقابل فضایی در مهاجرت‌های انسانی

مطالعه کنش متقابل فضایی بین مکان‌های مختلف از موضوعات پژوهشی کلاسیک و بسیار مهم در جابجائی جمعیت، مهاجرت و جغرافیای انسانی است(Liu et al., 2024). خاستگاه نظری نظریه کنش متقابل فضایی به جغرافیدان آمریکایی ادوارد لوئیس اولمن[3] (۱۹۵۷، ۱۹۸۰) نسبت داده می‌شود که اولین بار به طور رسمی این مفهوم را تعریف کرد(Wang, 2016). کنش متقابل فضایی یک مفهوم کلی است که به جابجایی افراد، بار، انرژی، خدمات یا اطلاعات بین مبدأ و مقصد اشاره دارد. کنش متقابل بین مکان‌ها، پدیده جغرافیایی رایج است که در فعالیت‌های مختلفی مانند مهاجرت، تجارت، سفر هوایی و رفت‌وآمد مشاهده می‌شود. این کنش‌های متقابل بینشی را در مورد رابطه بین مناطق ارائه می‌دهد. زوال فاصله، پدیده‌ای که در آن شدت کنش متقابل با فاصله کاهش می‌یابد(Ren et al., 2020). با مطالعه کنش متقابل فضایی، پژوهشگران می‌توانند ساختار فضایی اساسی را که شامل ارتباطات(پیوندها) نقاط کلیدی(گره‌ها)، پسکرانه‌ها[4] و اهمیت سطوح (سلسه مراتب) در یک منطقه جغرافیایی است، درک کنند. کنش متقابل فضایی از یک سو، مکان‌های مختلف را در سراسر فضای جغرافیایی بهم پیوند می‌دهند و سیستمی با سازماندهی و عملکردهای خاص ایجاد می‌کنند و از سوی دیگر این کنش‌های متقابل دائماً در حال تحول هستند که منعکس‌کننده ویژگی‌های جغرافیایی و ساختار فضایی آنهاست(Liu et al., 2024). مدل‌های کنش متقابل فضایی به طور گسترده‌ای برای مطالعه و تجزیه و تحلیل جریان‌های فضایی در مناطق جغرافیایی استفاده شده است. این مدل‌ها به روشی قابل اعتماد برای درک عوامل مؤثر بر انواع تحرک جغرافیایی از جمله مهاجرت، حمل‌ونقل، تجارت بین‌المللی، رفت و آمد و گردشگری تبدیل شده‌اند(Zhang et al., 2019). مدل‌های کنش متقابل فضایی به دنبال تبیین جریان‌های فضایی هستند(Rodrigue, 2024). مدل‌های کنش متقابل فضایی توصیف‌های ریاضیاتی از جریان‌های فضایی هستند(Fotheringham, 2001).

بر اساس نظریه اولمان، برای اینکه کنش متقابل فضایی رخ دهد، سه شرط وابسته به هم باید برآورده شوند:

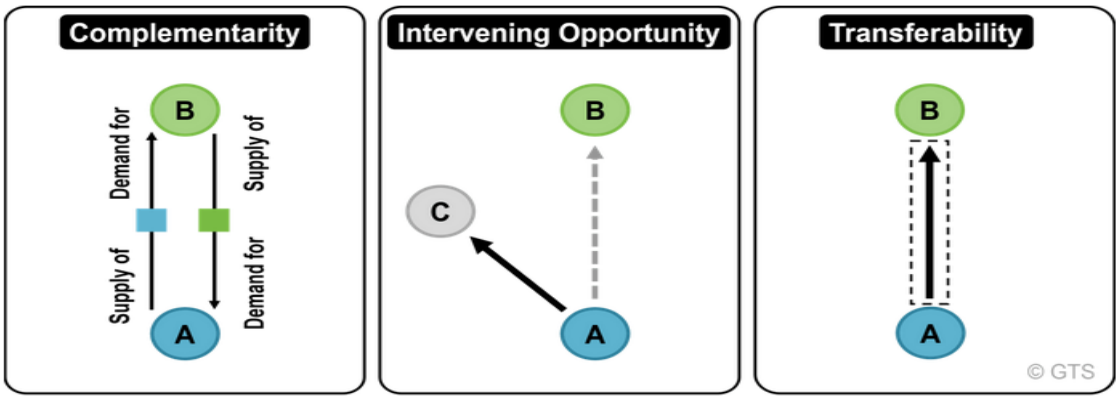
۱) مکمل بودن[5]: برای اینکه کنش متقابل فضایی بین دو مکان اتفاق بیفتد، باید رابطه عرضه و تقاضا وجود داشته باشد. وقتی یک مکان چیزی را دارد که مکان دیگری به آن نیاز دارد، آنها می‌توانند به این دلیل در کنش متقابل باشند. بنابراین مردم برای رفع این نیازها از مکانی به مکان دیگر مهاجرت می‌کنند. وقتی یک مکان (مکان A)

1. Stouffer
2. Parameter-free
3. Edward Louis Ullman
4. Hinterlands
5. Complementarity

چیزی را تولید می‌کند که مکان دیگری (محل B) به آن نیاز دارد، آنها می‌توانند به دلیل این رابطه عرضه و تقاضا با هم کنش متقابل داشته باشند. این رابطه باعث می‌شود این دو مکان مکمل یکدیگر باشند. اگر B چیزی را تولید کند که A نیاز دارد، آنها نیز می‌توانند کنش متقابل داشته باشند. این مبادله متقابل در موقعیت‌هایی مانند رفت و آمد (افرادی که بین خانه و محل کار سفر می‌کنند) یا تجارت بین المللی (کشورهای مبادله کالا و خدمات) رایج است. اولمن تاکید کرد که مکمل بودن محرک اصلی کنش متقابل فضایی است.

۲) قابلیت انتقال[1]: میزان سهولتی که کالاها، افراد یا اطلاعات می‌توانند بین این مکان‌ها جابجا شوند، اشاره دارد. برای اینکه کالاها، افراد یا اطلاعات با موفقیت بین دو مکان جابه جا شوند، باید زیرساخت‌های حمل و نقل کافی وجود داشته باشد که آنها را به هم متصل کند. هزینه غلبه بر فاصله بین این مکان‌ها باید کمتر از منافع حاصل از انتقال باشد. زیرساخت‌های حمل‌ونقل (مانند پایانه‌ها) باید برای پشتیبانی از کنش متقابل بین A و B وجود داشته باشند. همچنین، این زیرساخت‌ها باید دارای ظرفیت و سازگار با الزامات چنین تعاملی باشند.

۳) فرصت مداخله گر[2]: نباید جایگزین بهتری نزدیک به مبدأ وجود داشته باشد. برای اینکه کنش متقابلی بین دو مکان اتفاق بیفتد (مانند یک مشتری که به فروشگاه می‌رود)، نباید گزینه نزدیکتر یا بهتری در دسترس باشد. برای کنش متقال مشتری با یک فروشگاه خاص، نباید فروشگاه نزدیکتری وجود داشته باشد که محصولات مشابه را ارائه دهد. اگر فروشگاه نزدیک‌تری با کالاهای مشابه وجود داشته باشد، مشتری احتمالاً به جای آن فروشگاه نزدیک‌تر را انتخاب می‌کند. این مفهوم نشان می‌دهد که مکان جایگزین بهتر می‌تواند از وقوع کنش متقابل اولیه جلوگیری کند. اگر مکان C ویژگی‌های مشابهی (یعنی مکمل بودن) را به مکان B ارائه دهد و به مکان A نزدیک تر باشد، کنش متقابل بین A و B رخ نخواهد داد، زیرا کنش متقابل بین A و C جایگزین آن خواهد شد.



شکل(۱) شرایط تحقق کنش متقابل فضایی(Rodrigue, 2024, 345)

فرض اساسی در مورد بسیاری از مدل‌های کنش متقابل فضایی این است که جریان‌ها تابعی از ویژگی‌های مکان مبدأ، ویژگی‌های مکان مقصد و اصطکاک فاصله[3] بین مبدأ و مقصد هستند. فرمول کلی یک مدل کنش متقابل فضایی به شرح زیر است:

$$T_{ij} = f(TV_i, P_j, S_{ij})$$

T_{ij} کنش متقابل بین مکان i (مبدأ) و مکان j (مقصد) است. واحدهای اندازه گیری آن متفاوت است و می‌تواند شامل تعداد مسافران، جابه جایی بار، حجم ترافیک و غیره باشد. همچنین به یک دوره زمانی خاص مانند ساعت، روز، ماه یا

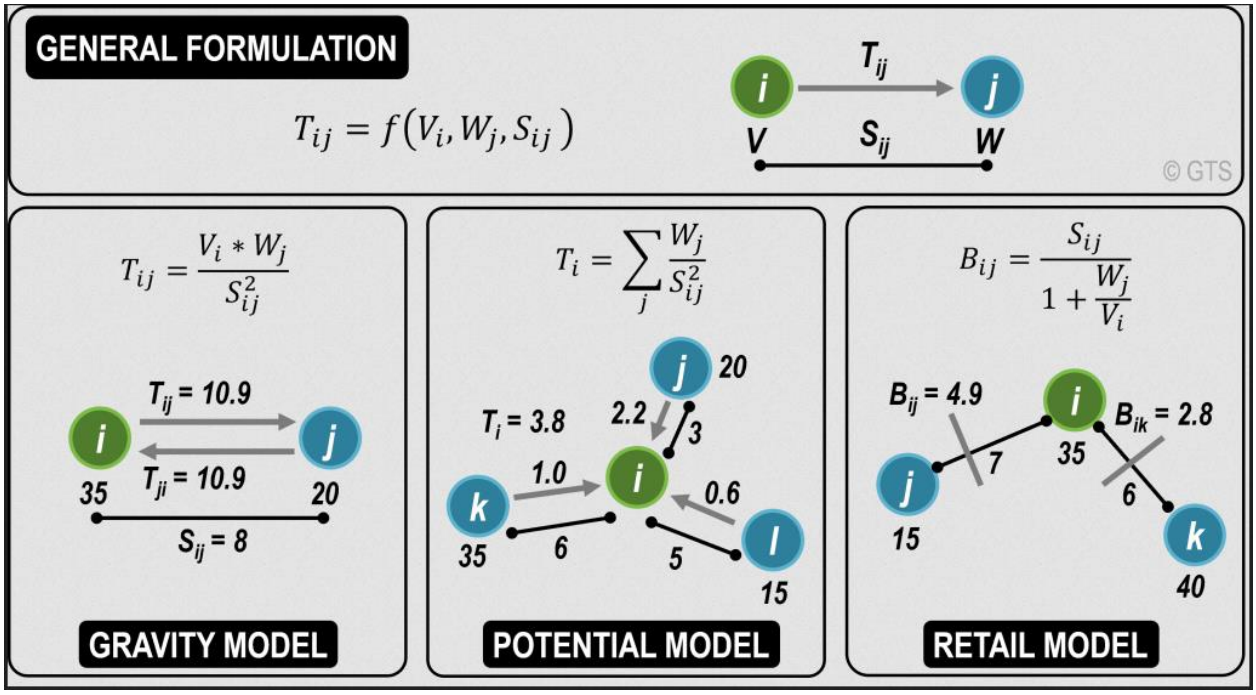
1. Transferability
2. Intervening Opportunity
3. Friction of Distance

سال مربوط می‌شود. V_i ویژگی‌های مکان مبدأ i است. اغلب به متغیرهایی که برای بیان ویژگی‌های مبدأ که ماهیت ماهیت اقتصادی- اجتماعی دارند مانند جمعیت، اشتغال، تولید صنعتی، یا هر نمونه‌ای از سطح فعالیت اقتصادی مانند تولید ناخالص اقتصادی اشاره می‌کند. V_j ویژگی‌های مکان مقصد j است. از متغیرهای اقتصادی- اجتماعی مشابه با ویژگی‌های قبلی برای تأکید بر متقابل بودن مکان‌ها استفاده می‌شود. S_{ij} ویژگی‌های جدایی بین مکان مبدا i و مکان مقصد j. همچنین به عنوان اصطکاک حمل و نقل، اصطکاک فاصله یا امپدانس شناخته می‌شود. متغیرهایی که اغلب برای بیان این ویژگی‌ها استفاده می‌شوند عبارتند از مسافت، هزینه حمل و نقل یا زمان سفر.

مدل جاذبه: کنش متقابل بین تمام جفت‌های مکان ممکن را اندازه گیری می‌کند.

مدل پتانسیل:کنش متقابل بین یک مکان و هر مکان دیگر را اندازه گیری می‌کند.

مدل خرده فروشی: مرز نواحی بازار را بین دو مکان که بر روی یک بازار با هم رقابت می‌کنند بر اساس شدت کنش متقابل مربوطه اندازه گیری می‌کند.



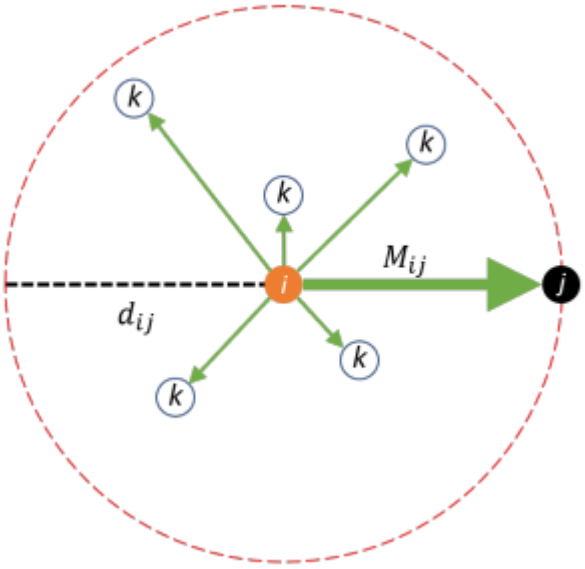
شکل(۲) سه مدل اصلی کنش متقابل فضایی(Rodrigue, 2024, 345)

مدل فرصت‌های مداخله‌گر

در حال حاضر، پژوهشگران هم نظر هستند که مدل‌های کنش متقابل فضایی باید ساختار فضایی رقابتی (نحوه رقابت مکان‌ها با یکدیگر) را در نظر بگیرند. مفهوم فرصت‌های مداخله‌گر مبتنی بر رفتار فضایی مهاجران برای جستجوی مقصد مطلوب است(Kotsubo, & Nakaya, 202). این ایده برای اولین بار توسط استوفر در سال‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۶۰ از طریق نظریه فرصت‌های مداخله‌گر، که الگوهای مهاجرت را بر اساس فرصت‌هایی که در طول مسیر با آنها مواجه می‌شوند تحلیل کرد، معرفی شد. اعتبار مفهوم فرصت‌های مداخله گر در مدل سازی کنش متقابل فضایی توسط تعداد زیادی از محققان تأیید شده است. استوفر فرض می‌کند که احتمال جابجایی یک فرد به مکان جدید لزوماً به مسافتی که باید طی کند مرتبط نیست. بلکه، تصمیم برای حرکت تحت تأثیر تعداد فرصت‌های موجود در مقصد و تعداد فرصت‌هایی است که در طول مسیر با آنها مواجه می‌شوند، قرار دارد. فرضیه استوفر تأکید می‌کند که در دسترس بودن و توزیع فرصت‌ها نقش مهم تری در تصمیم گیری‌های مهاجرت ایفا می‌کند تا مسافت واقعی طی شده. فرضیه در معادله زیر گنجانده شده

است(Gibson,1975). بنابراین، تعداد افرادی که در فاصله معینی از یک نقطه حرکت می‌کنند تابعی از فاصله مستقیم نیست، بلکه تابعی از توزیع فضایی فرصت‌ها است(Stouffer, 1960). نظریه استوفر یک رابطه خطی بین تعداد سفرها و فرصت‌های تجمعی فرض می‌کند. او توجه را از مفهوم سنتی فاصله جغرافیایی مطلق به عنوان مانعی برای مهاجرت جمعیت تغییر داد و استدلال کرد که فاصله خطی تنها به عنوان معیاری برای تعداد فرصت‌های مداخله گر مهم است. استوفر استدلال می‌کرد وقتی که مردم تصمیم می‌گیرند مهاجرت کنند، نه تنها مسافت، بلکه تعداد و توزیع سایر مقاصد ممکن را نیز در نظر می‌گیرند. این ایده منجر به توسعه «مدل مقاصد رقابتی» شد که توضیح می‌دهد که چگونه مکان‌های مختلف برای جذب افراد با یکدیگر رقابت می‌کنند. این مدل سعی می‌کند توضیح دهد که چگونه وجود گزینه‌های متعدد بر تصمیم‌گیری‌های افراد در مورد جایی که باید مهاجرت کنند، تأثیر می‌گذارد(Akwawua & Pooler, 2001).

بنابراین مهاجرت افراد از یک مکان به مکان دیگر نه تنها تحت تأثیر فاصله بین این دو مکان، بلکه متأثر از دو عامل اصلی دیگر قرار می‌گیرد: ۱) فرصت‌های مداخله‌گر: اینها فرصت‌هایی هستند (مانند شغل، مسکن و غیره) که بین مبدا و مقصد وجود دارد. اگر فرصت‌های جذاب زیادی نزدیک به مبدا وجود داشته باشد، افراد کمتری ممکن است به مقصد دورتر مهاجرت کنند.۲) مهاجران رقابتی[1]: این عامل تعداد مهاجران بالقوه دیگری را که به مقصد نزدیکتر از مهاجران مبدا هستند، در نظر می‌گیرد. اگر بسیاری از افراد نزدیک به مقصد نیز به دنبال مهاجرت باشند، می‌تواند احتمال حرکت مهاجران از مبدأ به آن مقصد را کاهش دهد. شکل کلی محاسبات مدل فرصت‌های مداخله گر به صورت زیر می‌باشد:



شکل(۳): شکل کلی محاسبات مدل فرصت‌های مداخله گر(Morefield, 2022)

بر اساس شکل بالا، i و j به ترتیب مبدا و مقصد هستند؛ M_{ij} مهاجرت مشاهده شده بین i و j است. d_{ij} فاصله بین i و j است؛ و فرصت‌های مداخله گر با استفاده از k نشان داده شده است. محاسبه فرصت‌های مداخله‌گر صرفاً مجموع فرصت‌ها در مکان‌های مداخله‌گر است به این معنی که برای تعیین تأثیر فرصت‌های مداخله‌گر بر مهاجرت، همه فرصت‌های موجود در مکان‌های بین مبدأ و مقصد را جمع می‌کنند. دو مفهوم دیگر در شکل بالا نشان داده شده است؛ اول، با افزایش فاصله بین مبدا و مقصد، تعداد فرصت‌های واقع بین این دو نقطه نیز افزایش می‌یابد. دوم، با افزایش تعداد فرصت‌های موجود بین نقطه مبدا و مقصد، احتمال جابجایی افراد از مبدا تا مقصد کاهش می‌یابد(Morefield, 2022).

1. Competing Migrants

در طول دهه ۱۹۸۰، ویلز روی ادغام دو مدل جاذبه و مدل فرصت‌های مداخله گر برای ایجاد چارچوب جامع تر برای درک کنش متقابل فضایی کار کرد. هدف ویلز ادغام مفاهیم فاصله و فرصت بود که توضیحی دقیق تر و جامع تر از چگونگی و چرایی کنش متقابل (مانند مهاجرت، تجارت، یا ارتباطات) بین مناطق یا نهادهای مختلف ارائه دهد. او تلاش کرد تا اثر فاصله را هم به صورت صریح(به عنوان ویژگی امپدانس) و هم به صورت ضمنی وارد مدل کند. اول، مسافت به طور مستقیم به عنوان یک مانع، مانند هزینه سفر یا زمان اندازه گیری شد. دوم، فاصله به‌طور غیرمستقیم برای تعیین ترتیبی که مردم در مورد مناطق مختلف فکر می‌کنند، استفاده شد، و ابتدا مناطق نزدیک‌تر در نظر گرفته شد. هدف این رویکرد درک بهتر این بود که چگونه فاصله بر تصمیمات افراد تأثیر می‌گذارد.

گونکالوز و اولیسه نتو (۱۹۹۳) نسخه مفصلی از مدل‌های «جاذبه-فرصت» ارائه کردند که عناصر مدل‌های جاذبه و مدل‌های فرصت‌های مداخله‌گر را ترکیب می‌کند. این مدل به صورت تجمیعی[1] عمل می‌کند زیرا جریان‌ها را بین جفت‌های مبدا-مقصد بدون در نظر گرفتن انتخاب‌های فردی پیش‌بینی می‌کند و به جای ایجاد این انتخاب‌ها بر اساس ترجیحات یا رفتارهای فردی، از مجموعه‌ای از انتخاب‌های از پیش تعریف شده برای مقاصد استفاده می‌کند(Cascetta et al., 2007).

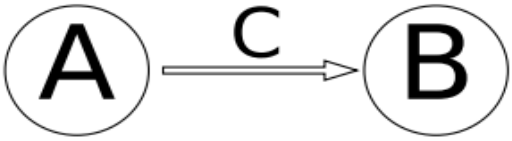
مدل جاذبه

در بین روش‌های موجود، مدل جاذبه پرکاربردترین مدل از خانواده مدل‌های کنش متقابل است که به ما کمک می‌کند تا کنش متقابل فضایی را درک و شدت جریان‌های فضایی را پیش‌بینی کنیم(Wilson, 1971). در علوم اجتماعی، مفهوم جاذبه به کارهای کری[2] در سال ۱۸۵۸ برمی گردد. کری در کار خود اغلب رفتار انسان را با اصول فیزیکی مقایسه می‌کند و از قیاس‌هایی از دنیای فیزیکی برای توضیح پدیده‌های اجتماعی استفاده می‌کند. او به طورخاص بر تمایل بشر به «کشش به سوی همنوعان خود» تأکید می‌کند و تأثیرات مستقیم جِرم (اندازه کشش) و تأثیرات معکوس فاصله را شناسایی کرد(هر چه افراد از هم دورتر باشند، کشش ضعیف‌تر می‌شود).

روانشتاین(۱۸۸۵) ایده مشابهی را در مطالعات مهاجرت خود ارائه کرد و پیشنهاد کرد که اکثر مهاجرت‌ها از قانون جاذبه نیوتن پیروی می‌کنند. اولین فرمول‌بندی رسمی شناخته شده با فیزیک نیوتونی توسط یانگ در سال ۱۹۲۴ برای مطالعه مهاجرت جمعیت کشاورز ارائه شد. این فرمول‌بندی متعاقباً توسط ریلی[3] در سال ۱۹۲۹ برای مطالعه حوزه بازار خرده فروشی استفاده شد. این جان کوئینسی استوارت (۱۹۴۱) بود که قیاس نیوتنی را به حد اعلاء خود رساند و نظریه جاذبه جمعیتی[4] را ارائه کرد. بعداً استوارت نسخه متفاوتی از این نظریه را پیشنهاد کرد که از یک واحد توان استفاده می‌کرد و به جای «نیروی جمعیتی» بر «انرژی جمعیتی» تمرکز می‌کرد. این رویکرد همچنین توسط زیپف[5] در سال‌های ۱۹۴۶ و ۱۹۴۹ مورد بررسی قرار گرفت و آن را در طیف گسترده‌ای از جریان‌های اجتماعی-اقتصادی به کار برد(Sen & Smith,2012).

مدل جاذبه، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، به طورگسترده‌ای برای پیش بینی مهاجرت جمعیت استفاده شده است. با فرض مهاجرت افراد از منطقه A به منطقه B و تعداد افراد مهاجر C است، بنابراین، C با اندازه جمعیت A و B همبستگی مثبت دارد و C با فاصله بین A و B همبستگی منفی دارد. بعداً مدل جاذبه به مدلی پایه برای بسیاری از مدل‌های دیگر تبدیل شد(Zhang et al., 2020).

1. Aggregate
2. Carey
3. Reilly
4. Demographic Gravitation
5. Zipf



شکل ۴ نمایش شماتیک از مدل جاذبه(Zhang et al., 2020)

انتقادات جدی به مدل جاذبه وارد شده است. به لحاظ نظری، مدل جاذبه فرض می‌کند که تعامل بین هر جفت مبدأ و مقصد مستقل از مکان‌های دیگر است. اما در واقعیت یک اثر رقابتی بین مقاصد داخل یک منطقه خاص وجود دارد، مثلاً وقتی مقاصد دیگر جذابیت کمتری داشته باشند، تعامل بین این دو مکان را تشدید می‌کند. برعکس، قدرت تعامل فضایی بین جفت مکان اصلی را تضعیف خواهد کرد. علاوه براین، کنش متقابل فضایی را به صورت نامتقارن برآورد می‌کند، به این معنی که جریان خارجی معادل جریان داخلی است. بدیهی است که جاذبه یک منطقه بزرگ، بیشتر از یک منطقه کوچک است. از دیدگاه عملی، اعتبار مدل جاذبه از منطقه‌ای به منطقه دیگر به دلیل پارامترهای قابل تنظیم تغییر می‌کند(Zheng et al., 2020). همچنین، مقدار مورد توافق جهانی برای توان فاصله γ مورد استفاده در محاسبات آنها وجود ندارد و مقدار توان فاصله در پژوهش‌ها از ۰٫۵ تا ۳ متغیر بوده است(Hong et al., 2019)؛ بنابراین، مدل به داده‌های مهاجرتی موجود برای کالیبره کردن (کارائی کردن) پارامترها نیاز دارد. به همین دلیل باعث می‌شود که شمولیت[1] نداشته باشد(Simini et al., 2012; Masucci et al., 2013).

مدل تابش

اخیراً، معرفی مدل تابش، بینش جدیدی از تاریخچه طولانی مدل‌سازی حرکت جمعیت ارائه کرده است. این مدل مبتنی بر یک پایه نظری قوی است و می‌تواند الگوهای تحرک مشاهده شده را از مهاجرت‌های فواصل طولانی تا رفت‌وآمدهای بین‌شهری را به‌طور دقیق برآورد کند. این مدل تنها به توزیع فضایی جمعیت به عنوان ورودی، بدون هیچ پارامتر قابل تنظیمی نیاز دارد(Yan et al., 2014). علی رغم استفاده گسترده مدل جاذبه برای برآورد جریان مهاجرت، داده‌های مهاجرت‌های قبلی برای برازش پارامترها در مدل ضروری است. مدل تابش یک مدل جایگزین بدون نیاز به داده تجربی است. برای پیش بینی الگوهای مهاجرت که فقط به داده‌های جمعیت در هر دو مکان نیاز است، پیشنهاد شد. باتوجه به ماهیت بدون پارامتر آن، مدل تابش را می‌توان در مواردی که داده‌های جریان قبلی وجود ندارند، اعمال کرد. این مدل، اولین بار توسط سیمینی و همکاران(۲۰۱۲) با استفاده از قیاس فرآیندهای انتشار و جذب در علوم فیزیک ارائه کردند. آن‌ها بر ایده «فرصت‌های مداخله‌گر» تکیه می‌کنند. این بدان معناست که وقتی مردم تصمیم به مهاجرت می‌گیرند، بیشتر تحت تأثیر فرصت‌های موجود در مقصد قرار می‌گیرند نه فقط مسافت یا جمعیت آنجا. به عبارت دیگر، آنها تصمیم می‌گیرند به مکانی مهاجرت کنند که نیازها و انتظارات آنها را برآورده کند(IDMC, 2022). مدل اولیه تابش مبتنی بر یک فرآیند تصمیم گیری تصادفی است که افراد برای انتخاب مقصد خود از آن استفاده می‌کنند، که احتمال جابجایی از یک مکان (i) به مکان دیگر (j) را محاسبه می‌کند(Kang et al., 2015). این مدل بر این فرض استوار است که الگوهای مهاجرت توسط یک فرآیند انتخاب شغل شامل دو مرحله تعیین می‌شود:

1. Universality: به این معناست که مدل را می‌توان در همه مقیاس‌های فضایی، همه دوره‌های زمانی و مکان‌های مختلف اعمال کرد

۱) جستجوی کار: هر فردی پیشنهادهای شغلی از همه مناطق، از جمله منطقه خود را در نظر می‌گیرد. تعداد فرصت‌های شغلی در هر مکان متناسب با جمعیت ساکن در آنجا است. به عبارت دیگر، بیشتر فرض می‌شود مکان‌هایی با جمعیت، فرصت‌های شغلی بیشتری دارند.

۲) انتخاب شغل: در این مرحله افراد بر اساس مجاورت جغرافیایی و مزایا، شغلی را انتخاب می‌کنند. به طور خاص، آن‌ها نزدیک‌ترین شغلی که مزایایی بالاتر از آنچه که می‌توانند از بهترین گزینه موجود در مکان فعلی‌شان دریافت کنند، انتخاب می‌کنند. این نشان می‌دهد که افراد مشاغل نزدیک‌تر را ترجیح می‌دهند، اما اگر شغل مزایای قابل توجه بهتری داشته باشد، مایلند بیشتر سفر کنند (Kong et al., 2022).

مفهوم فاصله در مدل‌های کنش متقابل فضایی

هر دو مدل جاذبه و تابش به نحوی با مفهوم فاصله جغرافیایی مرتبط هستند، اما نحوه استفاده از فاصله در این دو مدل متفاوت است. مدل جاذبه دارای پارامتر r_{ij} است که مستقیماً نشان‌دهنده فاصله جغرافیایی بین دو مکان است و به‌طور مستقیم در محاسبات تأثیرگذار است. در مقابل، مدل تابش از r_{ij} برای تعریف s_{ij} استفاده می‌کند. بنابراین، از فاصله به‌طور غیرمستقیم برای تعریف شعاعی مشخص استفاده می‌کند که تعداد فرصت‌های موجود در این شعاع را بررسی می‌کند. در مدل جاذبه، فاصله (نرخ زوال فاصله) به‌طور معمول با استفاده از فاصله اقلیدسی تعیین می‌شود، که به‌معنای فاصله خط مستقیم بین دو نقطه است. با این حال، برخلاف مدل جاذبه، فاصله را به عنوان یک متغیر در نظر نمی گیرد. در مدل تابش، فاصله به‌طور غیرمستقیم از طریق بررسی فرصت‌ها در شعاعی مشخص اثرگذار است(Liu & Yan, 2019).

بنابراین، هرچند هر دو مدل کاهش سفر را با افزایش فاصله محاسبه می‌کنند، مدل جاذبه مستقیماً به فاصله اقلیدسی متکی است، درحالی‌که مدل تابش تأثیر ترکیبی فاصله، جمعیت و فرصت‌ها را در نظر می‌گیرد(Wesolowski et al., 2015) در کنش متقابل فضایی، شدت کنش با افزایش فاصله میان سوژه‌های در حال کنش کاهش می‌یابد؛ این پدیده به‌عنوان زوال فاصله[1] شناخته می‌شود(Li et al., 2017).

زوال فاصله در مدل جاذبه می‌تواند نشان‌دهنده هزینه‌های فیزیکی مهاجرت و همچنین هزینه‌های غیرمستقیم، مانند موانع زبانی و فرهنگی باشد. اگرچه این هزینه‌ها معمولاً اندازه‌گیری نمی‌شوند، اما تأثیر آن‌ها بر جریان مهاجرت قابل مشاهده است. با افزایش فاصله فیزیکی، هزینه جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه مهاجرت کاهش می‌یابد. با این‌حال، پیشرفت‌های فناوری، ارتباطات، اطلاعات و حمل‌ونقل، هزینه‌های مهاجرت را کاهش داده‌اند. در نتیجه، تأثیر فاصله بر مهاجرت همچنان منفی است، اما شدت این تأثیر در طول زمان کاهش یافته است(Wajdi et al., 2017).

روش تحقیق

داده‌های مهاجرت برای این پژوهش از ترازنامه و ماتریس مهاجرتی شهرهای ایران سال ۱۳۹۵- ۱۳۹۰ استخراج شد. در سال ۱۳۹۵، ۱۲۴۲ شهر در کشور وجود داشته است، به دلیل صرفه جویی در زمان و هزینه محاسبات، تنها شهرهای ۱۰۰ هزار نفر و بالاتر در نظر گرفته شد که شامل ۹۸ شهر می‌شود. شکل (۵) تراکم جمعیت شهری و جمعیت شهرهای ۱۰۰ هزار نفر و بیشتر را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، برای برآورد مهاجرت، از دو مدل جاذبه و مدل تابش استفاده شد. مدل جاذبه فرض می‌کند که تعداد افراد T_{ij} که بین مکان i و j در واحد زمان حرکت می‌کنند با توان جمعیت مکان‌های مبدأ(m_i) و مقصد (n_j) و نسبت مستقیم و با فاصله r_{ij} بین i و j نسبت معکوس دارد که به صورت زیر بیان می‌شود:

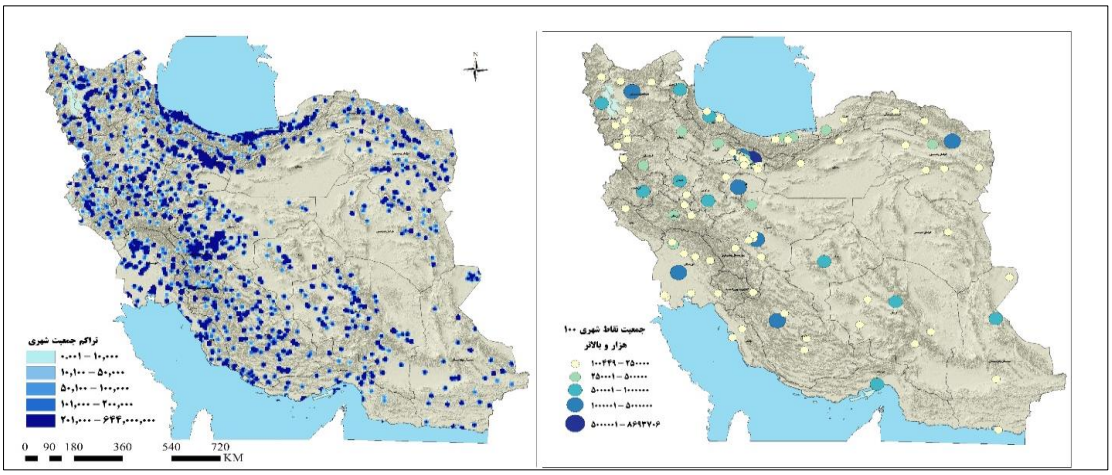
1. Distance Decay

$$T_{ij} = \frac{m_i^{\propto} n_j^{\beta}}{f(r_{ij})},$$

در این فرمول، α وβ نماهای قابل تنظیم هستند و تابع زوال فاصله $f(r_{ij})$ متناسب با داده‌های تجربی انتخاب می‌شود. T_{ij} نرخ احتمال حرکت افراد از i به j است(Simini et al., 2012). شکل خطی معادله جاذبه به صورت زیر می‌باشد:

$$\ln(M_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(P_i) + \beta_2 \ln(P_j) + \beta_3 \ln(r_{ji}) + e_{ij}$$

در این معادله، M_{ij} جریان مهاجرت بین شهر مبدأ i به شهر مقصد j را نشان می‌دهد. β_0 عرض از مبدأ است. P_i و P_j جمعیت شهر مبدأ i و جمعیت شهر مقصد j است. β_1 و β_2 ضرایب جمعیت مبدأ و مقصد است. r_{ji} فاصله جغرافیایی بین شهر مبدأ i و شهر مقصد j است. β_3 ضریب فاصله است که به طور معمول در فواصل طولانی کاهش جریان مهاجرت را نشان می‌دهد. بر اساس اصول اولیه مدل جاذبه، ما انتظار داریم که β_1 و β_2 رابطه مثبت و β_3 رابطه منفی داشته باشد. برای برآورد ضرایب جمعیت و فاصله از رگرسیون پواسون و رگرسیون پواسن با توزیع دوجمله‌ای منفی استفاده شد تا از ۱) ایجاد بایاس (تورش) ناشی از تبدیل لگاریتمی، ۲) نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها، ۳) مشکل ناهمسانی واریانس، و ۴) محدودیت استفاده از داده‌های شمارشی مهاجران جلوگیری شود(Wajdi et al., 2017). جمعیت کل هر شهر که جِرم دو جسم i و j را نشان می‌دهد در نظر گرفته شده است؛ زیرا جمعیت نشان دهنده ظرفیت یک شهر برای جذب مهاجران از نقاط شهری دیگر است، هرچه یک شهر جمعیت بیشتری داشته باشد، حجم مهاجرت نیز بیشتر خواهد بود. از اصطکاک فاصله به عنوان هزینه‌های فیزیکی و تا حدودی هزینه‌های غیرفیزیکی مانند موانع فرهنگی استفاده می‌شود. در این پژوهش، فاصله جغرافیایی، r_{ij}، به عنوان فاصله مستقیم بر حسب کیلومتر بین نقطه مبدأ i و مقصد j محاسبه شد. از دو تابع قانون توان افت فاصله[1] و توان افت فاصله نمایی[2] استفاده شد. اگرچه فاصله مستقیم، موانع فیزیکی مانند ساختار جغرافیای طبیعی یا شبکه راه‌ها را در نظر نمی گیرد اما با دقت معقولی میانگین مسافت طی شده توسط مهاجران را نشان می‌دهد. هنگامی که فاصله فیزیکی افزایش می‌یابد، هزینه‌های جابه جایی نیز افزایش می‌یابد، بنابراین مهاجرت نیز کاهش می‌یابد.



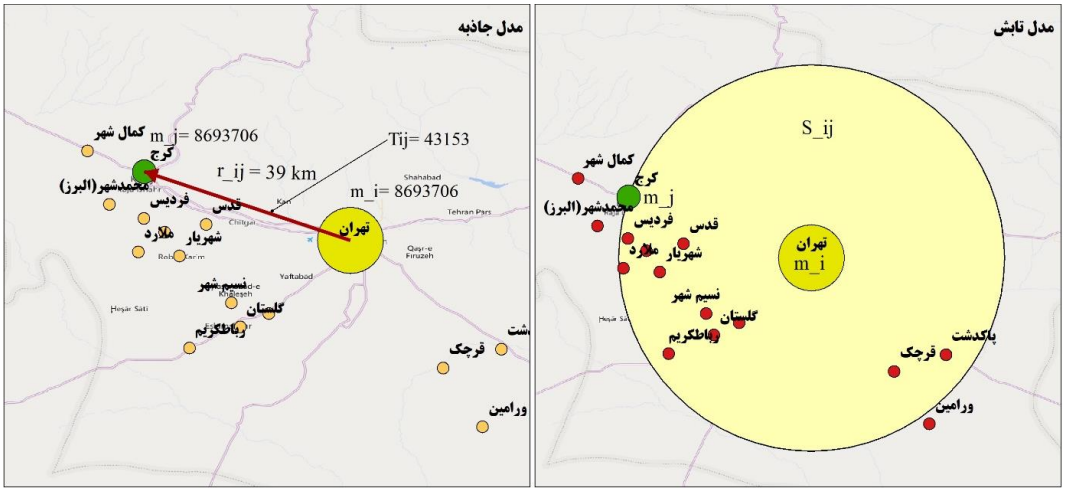
شکل(۵) تراکم جمعیت شهری (نفر در کیلومتر مربع) و جمعیت نقاط شهری ۱۰۰ هزار نفر و بالاتر

فرمول‌بندی مدل تابش به صورت زیر می‌باشد:

1. Power-law Distance-decay Function
2. Exponential Distance-decay Function

$$\langle T_{ij} \rangle = T_i \frac{m_i n_j}{(m_i + s_{ij})(m_i + n_j + s_{ij})},$$

برای پیش بینی جریان‌های مهاجرت، مکان‌های i و j را به ترتیب با جمعیت m_i و n_j در فاصله r_{ij} از یکدیگر در نظر می‌گیریم، s_{ij} جمعیت کل در دایره شعاع r_{ij} در مرکز i است. T_{ij} میانگین جریان مهاجرت از i به j است که توسط مدل تابش پیش بینی می‌شود. $T_i = \sum_{j \neq i} T_{ij}$ تعداد کل مهاجرانی است که سفر خود را از مکان i شروع می‌کنند که متناسب با جمعیت محل مبدأ است، از این رو، $T_i = m_i(N_c/N)$ در این فرمول، N_c تعداد کل مهاجران و N کل جمعیت است(Simini et al., 2012).

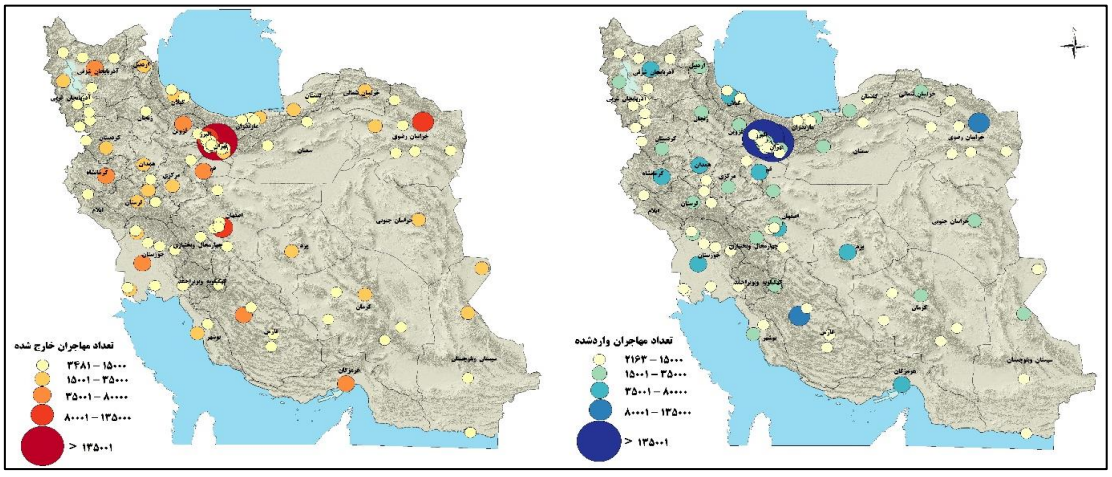


شکل(۶) نمایش شماتیکی از شیوه عمل مدل تابش و مدل جاذبه

یافته‌ها

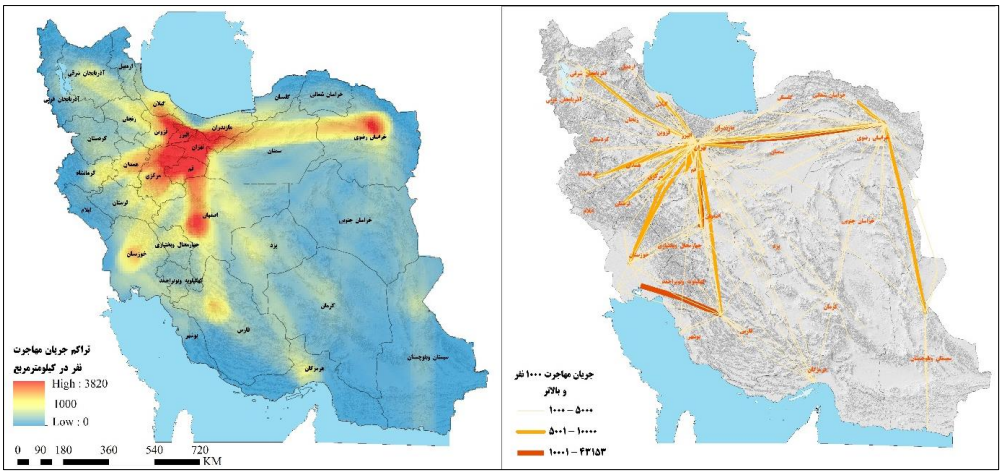
وضعیت جریان‌های مهاجرت بین شهری

توزیع فضایی تعداد مهاجران واردشده و خارج شده در شهرهای ۱۰۰ هزار نفر و بالاتر در شکل(۷) ارائه شده است. کلانشهرهای تهران، کرج، مشهد، شیراز و اصفهان به ترتیب با ۳۶۵,۶، ۱۳۵,۶، ۱۲۹,۵، ۹۹,۷، ۷۹,۸ هزار نفر بیشترین تعداد مهاجران وارد شده را داشته اند. در مقابل، بیشترین تعداد مهاجران خارج شده به ترتیب مربوط به کلانشهرهای تهران، مشهد، اصفهان، کرج و شیراز است که ۳۶۹,۳، ۱۱۴، ۱۰۲,۸، ۸۶,۶ و ۷۲,۳ هزار نفر خارج شده اند.



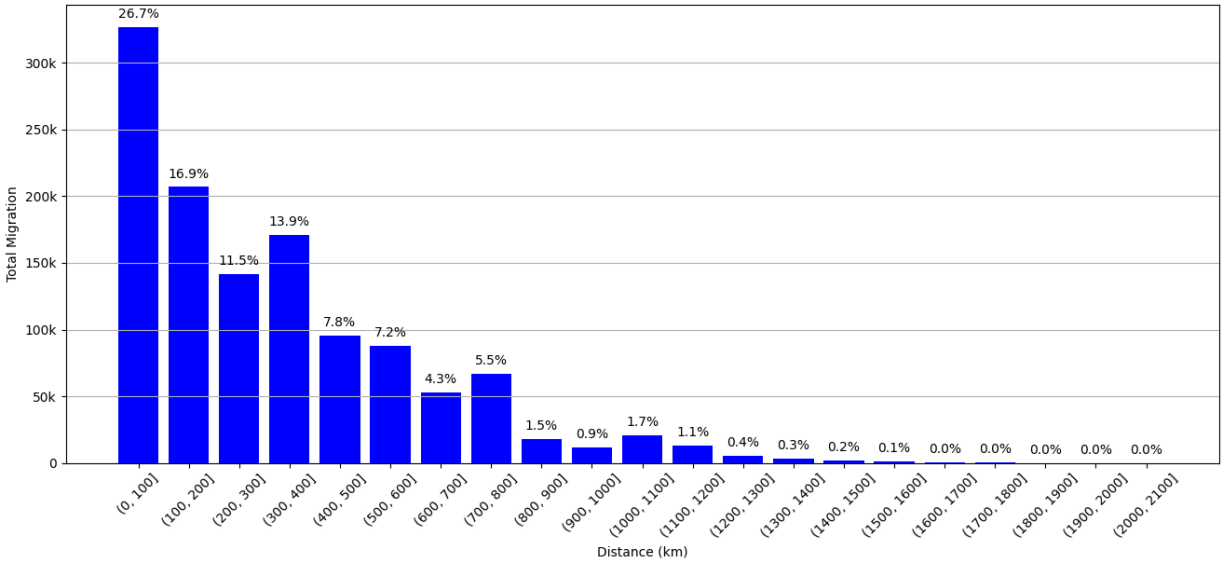
شکل(۷) توزیع فضایی تعداد مهاجران وارد شده و تعداد مهاجران خارج شده در شهرهای ۱۰۰ هزار نفر و بیشتر

همانطور که شکل(۸) نشان می‌دهد کانون اصلی جذب جریان‌های مهاجرت بین شهری واقع در استان‌های تهران و البرز است. علاوه بر این کانون بزرگ، جریان جمعیتی بزرگی نیز بین سایر مراکز شهری از جمله شیراز- بندرماهشهر، زابل- مشهد شکل گرفته است.



شکل(۸) توزیع فضایی جریان‌های مهاجرت بین شهری و تراکم جریان مهاجرت بین شهری

فاصله یکی از عوامل مهم در انگیزه افراد برای مهاجرت است که در هر دو مدل در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نمودار(۱) ۲۶,۷ درصد از جریان مهاجرت بین شهری در فاصله ۱۰۰ کیلومتر و کمتر رخ داده است و فاصله ۲۰۰ کیلومتر و کمتر به صورت تجمعی ۴۳,۶ درصد را شامل می‌شود. همانطور که نمودار مذکور نشان می‌دهد با افزایش فاصله از تعداد مهاجران کاسته شده است که نشان می‌دهد جریان‌های مهاجرتی فواصل طولانی سهم بسیار کمتری دارند.



نمودار(۱) تعداد و سهم مهاجران بر اساس فاصله

مدل جاذبه

برای برآورد پارامترهای مدل جاذبه از رگرسیون پواسن و رگرسیون با توزیع دوجمله‌ای منفی استفاده شد. ابتدا با توجه به نوع داده و توزیع آن از رگرسیون پواسن استفاده شد که باتوجه به پارامترهای برازش مدل، نامناسب بودن در برخی پارامترها از رگرسیون با توزیع دوجمله‌ای منفی استفاده شد. نتایج دو مدل در جدول (۱) ارائه شده است. لگاریتم

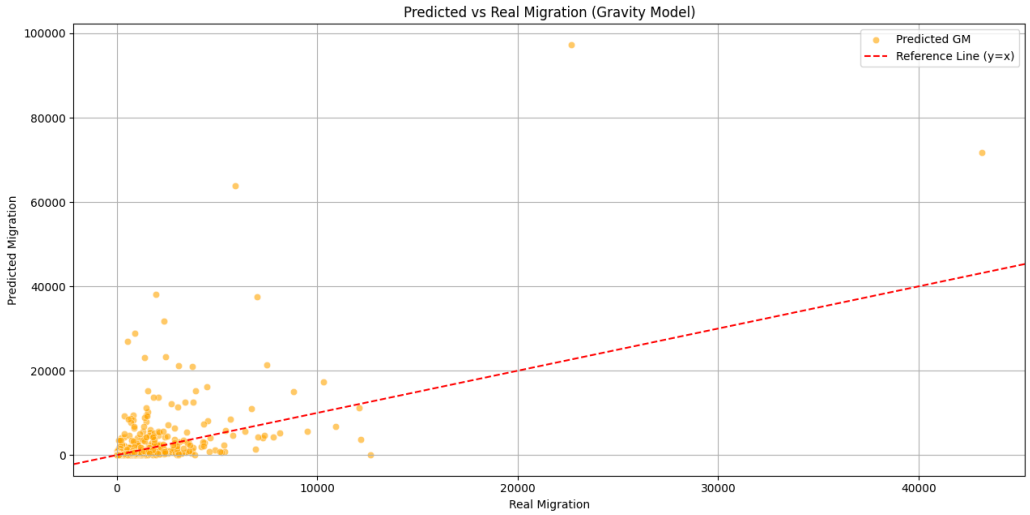
درست نمایی در رگرسیون با توزیع دوجمله‌ای منفی، بزرگتر از (منفی کمتر) مدل پواسن است که نشان می‌دهد مدل دوجمله‌ای منفی بهتر با داده‌ها تناسب دارد. پارامتر انحراف در مدل توزیع دوجمله‌ای منفی، کمتر است که نشان می‌دهد این مدل برازش بهتری دارد. شبه ضریب تعیین در مدل دوجمله‌ای منفی حدود ۹۴ درصد از تغییرات در جریان مهاجرت را توضیح می‌دهد که تناسب قوی اما واقعی تر در مقیاس با برازش کامل در مدل پواسن را نشان می‌دهد. باتوجه به عملکرد دو مدل، مدل دوجمله‌ای منفی بهتر از مدل پواسن عمل کرده است و برآورد بهتری از داده‌های مهاجرت را ارائه می‌دهد. ضریب لگاریتم اندازه جمیت مبدأ در رگرسیون با توزیع دوجمله‌ای منفی، کمی کمتر از رگرسیون پواسن است که رابطه مثبت و معنادار را با مهاجرت نشان می‌دهد، به طوری که جمعیت بیشتر در مبدأ جریان مهاجرت را افزایش می‌دهد. ضریب لگاریتم اندازه جمعیت در مقصد در رگرسیون با توزیع دوجمله‌ای منفی، بالاتر از رگرسیون پواسن است و معنادار نیز می‌باشد. ضریب لگاریتم جمعیت در مقصد بالاتر از ضریب لگاریتم جمعیت در مبدأ می‌باشد که جمعیت مقصد تأثیر قوی تری بر جریان‌های مهاجرت نسبت به جمعیت مبدأ دارد که با مدل جاذبه که در آن مقاصد بزرگتر، مهاجران بیشتری را جذب می‌کنند، سازگاری دارد. لگاریتم فاصله جغرافیایی در رگرسیون پواسن با توزیع دوجمله‌ای منفی، قوی تر از رگرسیون پواسن است و رابطه آن منفی و معنادار می‌باشد که نشان می‌دهد فاصله جغرافیایی اثر بازدارندگی بیشتری بر مهاجرت در مدل دوجمله‌ای منفی دارد.

جدول(۱) نتایج مدل‌های رگرسیونی

متغیر	رگرسیون پواسن				رگرسیون پواسون با توزیع دوجمله‌ای منفی			
	coef	Std err	z	|P>|z	coef	Std err	z	|P>|z
لگاریتم طبیعی اندازه جمعیت در مبدأ	۰,۸٦٦۳	۰,۰۰۱	۱۳٤۹,۰۷۹	۰,۰۰۰	۰,۸٥٦٥	۰,۰۱۲	٦۸,٥۷٥	۰,۰۰۰
لگاریتم طبیعی اندازه جمعیت در مقصد	۰,۹۲٥٦	۰,۰۰۱	۱٤۷۷,۰۷۳	۰,۰۰۰	۱,۰۳٥۸	۰,۰۱۲	۸۲,۹٥۸	۰,۰۰۰
لگاریتم طبیعی فاصله جغرافیایی	-۰,٦٦۹۸	۰,۰۰۱	-۹۹٦,٤۲۸	۰,۰۰۰	-۱,۰۹۱۳	۰,۰۱۳	-۸٥,۸٥۹	۰,۰۰۰
لگاریتم درستنمایی	-٦۷٦۸۱۰				-٤۲۲٦۸			
انحراف	۱۳۱۱۳۰۰				۱٤۳۸۸			
شبه ضریب تعیین	۱,۰۰۰				۰,۹٤۱۲			

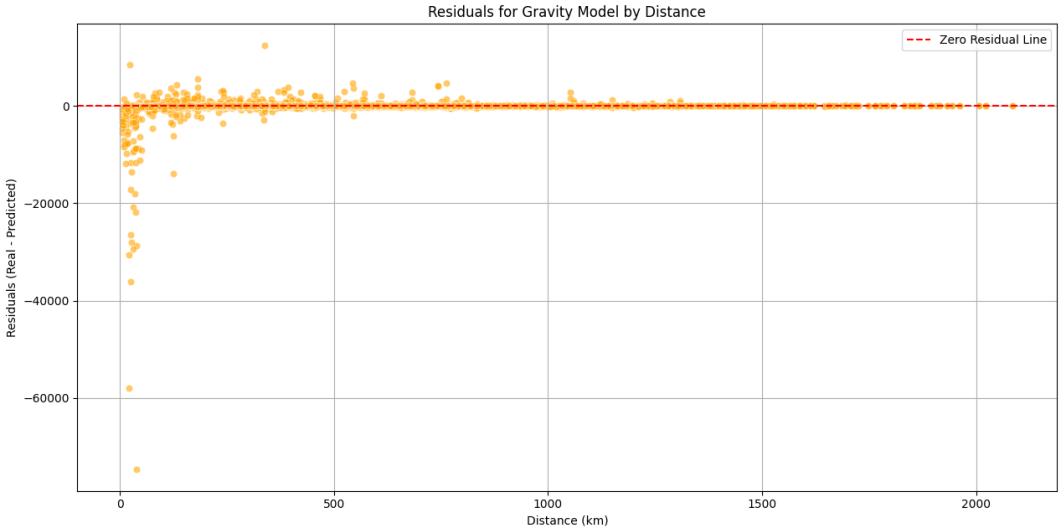
در نمودار(۱)، توزیع تعداد مهاجران پیش‌بینی‌شده توسط مدل جاذبه نمایش داده شده است. مطابق این نمودار، نقاطی که پایین خط مرجع قرار گرفته‌اند، نشان‌دهنده مواردی هستند که مدل جاذبه جریان‌های مهاجرتی را کم‌برآورد کرده است. در مقابل، نقاطی که بالای خط مرجع قرار دارند، مواردی را نشان می‌دهند که مدل جاذبه جریان‌های مهاجرتی را بیش‌برآورد کرده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، تعداد قابل‌توجهی از نقاط توسط مدل جاذبه بیش‌برآورد شده‌اند. این الگو می‌تواند ناشی از تأثیر عوامل ساختاری مانند توزیع فضایی نامتوازن شهرها، تمرکز جمعیت در اطراف کلان‌شهرها، و سرریز جمعیتی در نواحی با فاصله کوتاه باشد.

به‌ویژه، بیش‌برآوردهای مدل جاذبه غالباً مربوط به مقادیر بالای ۱۰ هزار نفر بوده است که این امر عمدتاً به کلان‌شهرها مرتبط است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل جاذبه برای پیش‌بینی جریان‌های مهاجرتی به کلان‌شهرها مانند تهران، مشهد، تبریز و اصفهان دچار بیش‌برآوردی شدید شده است؛ زیرا مدل جاذبه، با توجه به پارامترهای اصلی خود که جمعیت و فاصله را در نظر می‌گیرد، جریان‌های مهاجرتی از شهرهای کوچک و مجاور به این کلان‌شهرها را بیش از حد واقعی برآورد می‌کند. این در حالی است که جریان‌های مهاجرت معکوس (از کلان‌شهرها به شهرهای کوچک‌تر) اغلب شدیدتر هستند، اما توسط مدل جاذبه به درستی برآورد نمی‌شوند.



نمودار (۱) توزیع تعداد مهاجران پیش بینی شده مدل جاذبه

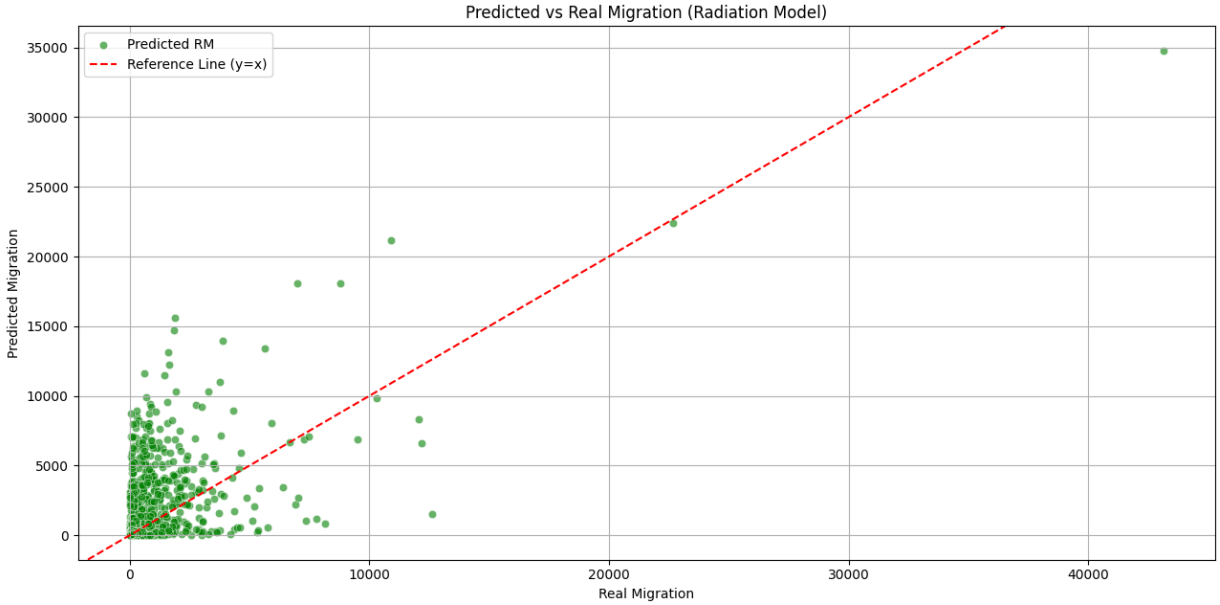
همانطور که نمودار(۲) نشان می‌دهد مدل جاذبه در پیش‌بینی جریان‌های مهاجرتی در فواصل کوتاه عملکرد مناسبی نداشته است، زیرا در این محدوده‌ها، جریان‌های مهاجرتی به شدت بیش‌برآورد شده‌اند، در حالی که در فواصل دورتر، میزان کم‌برآوردی مدل شدت کمتری دارد. این الگو می‌تواند به ساختار فضایی چندمرکزی شهرها در ایران مرتبط باشد. کلان‌شهرهایی مانند تهران، مشهد، تبریز و اصفهان به دلیل تمرکز بالای امکانات اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، به کانون‌های جذب جمعیت تبدیل شده‌اند. در اطراف این کلان‌شهرها، شهرهای کوچکتری (شهرهای حاشیه ای) شکل گرفته‌اند که به عنوان مراکز جذب جمعیت‌های سرریز از کلان‌شهرها عمل می‌کنند. برای مثال، در شعاع ۵۰ کیلومتری شهر تهران ، ۱۴ شهر با جمعیتی بیش از ۱۰۰ هزار نفر وجود دارد که جریان‌های مهاجرتی متراکمی را در این محدوده ایجاد کرده‌اند (یا به عبارتی سوپاپ کلانشهرها). ساختار چندمرکزی شهرها، تعاملات اقتصادی، اجتماعی و مهاجرتی را در فواصل کوتاه افزایش داده و باعث شکل‌گیری خوشه‌های شهری در اطراف کلان‌شهرها شده است. این ویژگی، جریان‌های مهاجرتی در فواصل نزدیک را پیچیده‌تر کرده و منجر به خطاهای مدل جاذبه در پیش‌بینی دقیق این جریان‌ها شده است. از سوی دیگر، در فواصل دورتر، این ساختار فضایی تأثیر کمتری داشته و مدل جاذبه نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد.



نمودار (۲) توزیع مقادیر باقیمانده در مدل جاذبه بر اساس فاصله

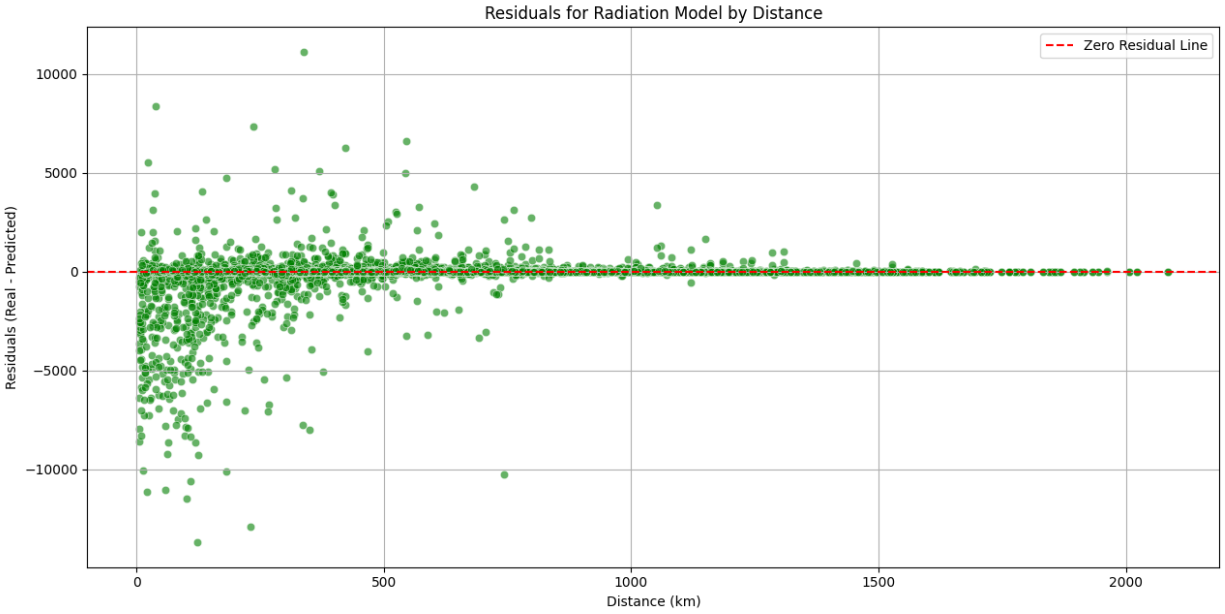
مدل تابش

توزیع تعداد مهاجران پیش بینی شده توسط مدل تابش در نمودار(۳) نشان داده شده است. همانطور نمودار مذکور نشان می‌دهد سهم قابل توجهی از داده‌ها بیش برآورد شده است. تعداد نقاط دارای بیش برآورد بالای ۱۰ هزار نفر کمتر است. باتوجه به ماهیت مدل تابش که فرصت‌های موجود در شعاع مبدأ و مقصد را در نظر می‌گیرد، بهتر و مناسبتر مهاجران خارج شده را بین مقاصد بالقوه تخصیص داده است.



نمودار (۳) توزیع تعداد مهاجران پیش بینی شده توسط مدل تابش

همانطور که نمودار(۴) نشان می‌دهد مدل تابش، مشابه مدل جاذبه، مهاجرت‌های فواصل کوتاه را به خوبی پیش بینی نکرده است، با این حال با افزایش فاصله دقت پیش بینی بهتر شده است.



نمودار (۴) توزیع مقادیر باقیمانده در مدل تابش بر اساس فاصله

مقایسه عملکرد مدل‌ها

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های همبستگی، میانگین قدر مطلق خطا(MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا(RMSE) استفاده شد که نتایج آن در جدول(۲) ارائه شده است.. عملکرد دو مدل جاذبه و تابشی در پیش‌بینی جریان‌های مهاجرتی نتایج متفاوتی به دنبال داشته است که نشان‌دهنده تفاوت در نحوه رفتار این مدل‌ها در پیش بینی جریان مهاجرت است. مدل جاذبه، که یکی از مدل‌های رایج در تحلیل جریان‌های مهاجرتی است، با ضریب همبستگی ۰,۶۹ ارتباط نسبتاً خوبی میان مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی برقرار کرده است. این نشان می‌دهد که این مدل توانسته است الگوهای کلی جریان مهاجرت را به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی کند. این مدل معمولاً بر اساس ویژگی‌هایی مانند جمعیت و فاصله میان مبدأ و مقصد، جریان مهاجرت را پیش‌بینی می‌کند.

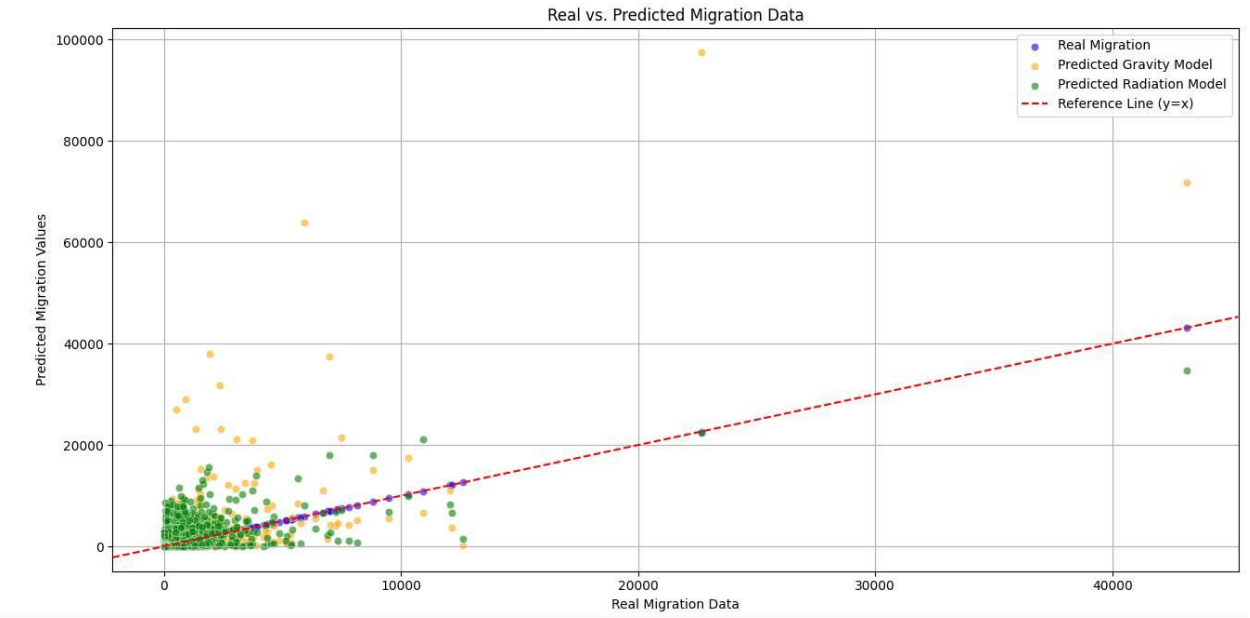
جدول (۲) مقایسه عملکرد دو مدل جاذبه و تابش

شاخص‌ها	مدل جاذبه	مدل تابش
ضریب همبستگی	۰,٦۹	۰,٦٤
میانگین قدرمطلق خطا(MAE)	۱۵۷,۷٤	۱۸۸,۷۳
ریشه میانگین مربعات خطا(RMSE)	۱٤۲۹,۳۰	۸٤۹,۷۳

با این حال، اگرچه مدل جاذبه در پیش بینی الگوهای کلی موفق بوده است، ولی در پیش‌بینی مقادیر مهاجرتی برای مقادیر بسیار زیاد (مثلاً جریان‌های مهاجرت به کلان‌شهرها)، دچار بیش‌برآورد شده است. این مشکل در داده‌ها با مقدار RMSEبرابر ۱۴۲۹,۳۰ است. RMSE بالا نشان‌دهنده این است که مدل جاذبه برای پیش‌بینی مقادیر با دامنه وسیع، دقت کمتری دارد و خطاهای زیادی را برای مقادیر دور از میانگین به همراه دارد. این مشکل به ویژه در پیش‌بینی جریان‌های مهاجرت به کلان‌شهرهایی مانند تهران، مشهد، تبریز و اصفهان که دارای جمعیت زیاد هستند، بروز می‌کند. مدل جاذبه به‌دلیل در نظر گرفتن فاصله و جمعیت، جریان‌های مهاجرتی به این مناطق را بیش از حد پیش‌بینی می‌کند، در حالی که واقعیت نشان می‌دهد که جریان‌های مهاجرت از مناطق کوچک‌تر به این کلان‌شهرها نسبت به آنچه مدل پیش‌بینی می‌کند، کمتر است.

در مقابل، مدل تابش با ضریب همبستگی ۰,۶۴ ارتباط ضعیف‌تری نسبت به مدل جاذبه در پیش بینی کلی الگوهای مهاجرت دارد. این مدل کمتر توانسته است رفتار کلی جریان مهاجرت را مشابه داده‌های واقعی شبیه‌سازی کند. با این حال، مدل تابش در کاهش خطاهای بزرگ عملکرد بهتری داشته و توانسته است RMSE کمتری به میزان ۸۴۹,۷۳ تولید کند. این مقدار پایین‌تر RMSE نشان می‌دهد که مدل تابش در پیش‌بینی مقادیر استثنایی/ پرت (که ممکن است به دلیل جمعیت زیاد یا مهاجرت به مقصدهای خاص رخ دهد) دقت بیشتری دارد. به عبارت دیگر، مدل تابش کمتر دچار بیش‌برآورد می‌شود و پیش‌بینی‌هایش برای مقادیر دور از میانگین، دقیق‌تر است.

اگرچه میانگین قدرمطلق خطا (MAE) در مدل تابشی بالاتر (۱۸۸,۷۳) از مدل جاذبه (۱۵۷,۷۴) است، ولی این مقدار بیانگر این است که مدل تابشی در پیش‌بینی مقادیر معمولی (یعنی مقادیر مهاجرتی که نه خیلی کم و نه خیلی زیاد هستند) دقت کمتری دارد. این مسئله نشان می‌دهد که مدل تابش خطاهای بیشتری در پیش‌بینی‌های عادی دارد، اما در مورد جریان‌های مهاجرتی شدیدتر و در مقیاس‌های بزرگ‌تر، عملکرد بهتری دارد.



نمودار(۵) مقایسه مقادیر پیش بینی شده توسط مدل جاذبه و تابش

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی جریان‌های مهاجرت، در زمینه سیاستگذاری مهاجرت، برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، انتشار بیماری، بهداشت، مسکن، مدیریت شهری و توسعه اقتصادی کاربردهای گسترده‌ای دارد. تاکنون مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی جریان‌های مهاجرت ارائه شده است که در این پژوهش از دو مدل جاذبه و مدل تابش برای پیش بینی جریان مهاجرت بین شهری ایران استفاده شد.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که حجم قابل توجهی از جریان‌های مهاجرتی بین شهری در فواصل ۱۰۰ کیلومتر و کمتر بوده است که سهم آن حدود ۲۶,۷ درصد از کل جریان‌های مهاجرتی بین شهری بوده است و با افزایش فاصله از تعداد مهاجران کاسته شده است. راونشتاین اشاره می‌کند که «بخش عمده‌ای از مهاجران ما تنها مسافت کوتاهی را طی می‌کنند». در این جمله به‌طور ضمنی اشاره شده است که تعداد کمتری از مهاجران به مسافت‌های طولانی‌تر سفر می‌کنند و بنابراین، فاصله تأثیری بازدارنده بر رفتار مهاجرت دارد(Stillwell et al., 2016). بر اساس نتایج مدل جاذبه، فاصله جغرافیایی رابطه منفی و معنادار داشته است، که اثر اصطکاکی بر مهاجرت دارد. در مدل تابش نیز احتمال مهاجرت به صورت غیرمستقیم با افزایش فاصله کاهش می‌یابد و به طور مستقیم با تعداد فرصت‌های مداخله‌گر افزایش پیدا می‌کند.

مدل جاذبه نشان داد که با افزایش جمعیت در شهرهای مبدا و مقصد، حجم مهاجرت افزایش می‌یابد و در مقابل، فاصله جغرافیایی میان شهرها تأثیر منفی بر مهاجرت دارد. تحلیل‌های رگرسیونی با استفاده از رگرسیون دوجمله‌ای منفی نشان داد که این روش، نسبت به رگرسیون پواسون، عملکرد بهتری در برازش داده‌ها دارد. در این مدل، پارامترهای مربوط به جمعیت در مقصد تأثیر قوی‌تری نسبت به جمعیت مبدا بر جریان مهاجرت داشته‌اند. مدل‌های جاذبه و تابش هر کدام نقاط قوت و ضعفی برای پیش بینی جریان مهاجرت دارند. از مقایسه این دو مدل می‌توان نتیجه گرفت که هر یک از این مدل‌ها برای شرایط خاصی مناسب‌تر هستند. مدل جاذبه برای پیش‌بینی الگوهای کلی مهاجرت و جریان‌های مهاجرتی در مقیاس وسیع‌تر عملکرد بهتری دارد و توانایی پیش بینی روندهای کلی مهاجرت را دارد. اما در پیش‌بینی

جریان‌های مهاجرت به کلان‌شهرها و مقادیر بزرگ‌تر دچار بیش‌برآورد می‌شود و خطاهای زیادی دارد. در مقابل، مدل تابش با وجود ضریب همبستگی پایین‌تر، در پیش‌بینی مقادیر استثنایی/ پرت و کاهش خطاهای بزرگ موفق‌تر است و در پیش‌بینی‌های دقیق‌تر برای جریان‌های مهاجرتی از نقاط دورتر به مراکز بزرگ، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. بنابراین، انتخاب مدل مناسب به هدف تحلیل بستگی دارد:

- اگر هدف پیش بینی الگوهای کلی و پیش‌بینی جریان‌های مهاجرتی در سطح گسترده باشد، مدل جاذبه مناسب‌تر است.
- اگر هدف کاهش خطاهای بزرگ و پیش‌بینی دقیق‌تر جریان‌های مهاجرتی به کلان‌شهرها و مقادیر استثنایی باشد، مدل تابشی عملکرد بهتری خواهد داشت.

این مقایسه نشان می‌دهد که برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر، ممکن است نیاز به ترکیب ویژگی‌های هر دو مدل وجود داشته باشد تا هرکدام در حوزه خود بیشترین دقت را داشته باشند.

مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که هر دو مدل جریان‌های مهاجرتی فواصل کم را بیش برآورد می‌کنند و در برآورد جریان‌های مهاجرت شهری فواصل طولانی عملکرد بهتری دارد؛ اما یافته‌های سیمینی و همکاران(۲۰۱۲) نشان داد که مدل تابش جریان‌های مهاجرتی فواصل طولانی را بهتر از مدل جاذبه برآورد می‌کند. کلوگه و شو[1] (۲۰۲۱) عملکرد دو مدل جاذبه و تابش در زمینه مهاجرت‌های داخلی دو کشور ایالات متحده آمریکا و مکزیک مقایسه کردند، یافته‌های آنها نشان داد که مدل تابش به طورکلی عملکرد نسبتاً خوبی دارد و حتی در مقایسه با مدل جاذبه، برای مهاجرت‌های با فواصل کم بهتر عمل می‌کند. با این حال، مدل تابش به دلیل ویژگی خاصی که دارد، یعنی کاهش سریع اندازه جریان مهاجرت با افزایش فاصله، مهاجرت‌های فواصل طولانی را به طورقابل توجهی کم برآورد می‌کند، به ویژه مهاجرت‌هایی که مقصد آن‌ها بیش از چند صد کیلومتر فاصله دارند. برخلاف جریان‌های رفت‌وآمد، که در چنین فاصله‌های بزرگی بسیار کم هستند، مهاجرت‌های فواصل طولانی فراتر از ۳۰۰ کیلومتر (۵۰۰ کیلومتر) ۲۲٪ (۱۹٪) از تمام جریان‌های مهاجرت مشاهده‌شده در ایالات متحده آمریکا و ۲۶٪ (۲۲٪) در مکزیک را تشکیل می‌دهند. بنابراین، کم برآوردی جریان‌های مهاجرتی توسط مدل تابش، نقطه ضعف جدی برای آن به شمار می‌رود؛ همانطور که ذرات در یک فرآیند تابشی به شدت توسط ماده اطراف جذب می‌شوند، مدل به طورمشابه فرض می‌کند که جابه جایی‌های فواصل طولانی سریع تر از آنچه که در واقعیت اتفاق می‌افتد کاهش می‌یابد. این جذب سریع، باعث می‌شود که مدل نتواند به درستی مهاجرت‌های فواصل طولانی را برآورد کند.

یافته‌های ماسوچی و همکاران(۲۰۱۳) در انگلستان و ولز برای جریان‌های رفت و برگشت، نشان داد که مدل تابش برای شهرهای بزرگ کم برآورد می‌کند. به طورکلی، مدل جاذبه در برآورد جریان‌های مهاجرت رفت و برگشت به ویژه در فواصل کوتاه، بهتر از مدل تابش عمل می‌کند. با این حال، مدل تابش در فواصل طولانی یا سطح ملی خوب عمل می‌کند.

اگرچه مدل تابش در پیش‌بینی انواع مختلف جابجایی، مانند رفت‌وآمد، مهاجرت و حمل‌ونقل کالا در ایالات متحده بسیار دقیق بود، اما مطالعات بعدی نشان داد که در کشورهای دیگر به خوبی کار نمی‌کند. تطابق ضعیف بین جریان‌های پیش بینی شده و واقعی در کشورهای دیگر نشان داد که مدل تابش نمی تواند به طور قابل اعتمادی جریان‌های مهاجرت را در همه جا پیش بینی کند. برای بهبود عملکرد مدل تابش، تلاش‌های مختلفی از طریق معرفی پارامترهای اضافی، فرمول‌بندی مجدد مدل به شکل عملی‌تر و توسعه مدل‌های جایگزین انجام شده است(Kotsubo, & Nakaya, 2021).

1. Kluge & Schewe

یافته‌های این پژوهش، مشابه هر پژوهش دیگری دارای محدودیت‌هائی است. اول، در مدل سازی، تنها جریان‌های مهاجرتی شهرهای بالای ۱۰۰ هزار نفر در نظر گرفته شد که می‌تواند نتایج پژوهش را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی، جریان‌های مهاجرتی همه شهرها بررسی شود. دوم، باتوجه به پیچیدگی پدیده‌ای مانند مهاجرت‌های انسانیدر بین شهری، در هر دو مدل از تعداد جمعیت به عنوان جذابیت و فرصت مکان‌ها استفاده شد که این شاخص به خوبی نمی تواند ماهیت پیچیده و چندبعدی علل و انگیزه‌های مهاجرت را نشان دهد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی شاخص‌های اقتصادی- اجتماعی و خدمات در مدل در نظر گرفته و گنجانده شود؛ به خصوص در کلانشهرها که هزینه‌های زندگی مانند هزینه مسکن، حمل و نقل درون شهری، آموزش، و بهداشت بالا است، سرریزهای مهاجرتی آن وارد شهرهای کوچکتر و مجاور آن می‌شود، به همین دلیل همانطور که مشاهده کردیم در جریان مهاجرتی کلانشهرها و شهرهای مجاور تا کنون به خوبی عمل نکرده اند.

References

International Information Processing Company, Naghsh Click (2019). Report on the status and patterns of migration in the territory over the last three decades (as one of the determinants of social issues). Unpublished report.

Akwawua, S., & Pooler, J. A. (2001). The development of an intervening opportunities model with spatial dominance effects. Journal of Geographical Systems, 3, 69-86.

Cascetta, E., Pagliara, F., & Papola, A. (2007). Alternative approaches to trip distribution modelling: a retrospective review and suggestions for combining different approaches. Papers in regional Science, 86(4), 597-620.

Cascetta, E., Pagliara, F., & Papola, A. (2007). Alternative approaches to trip distribution modelling: a retrospective review and suggestions for combining different approaches. Papers in regional Science, 86(4), 597-620.

de Valk, H. A., Acostamadiedo, E., Guan, Q., Melde, S., Mooyaart, J., Sohst, R. R., & Tjaden, J. (2022). How to predict future migration: Different methods explained and compared. Introduction to Migration Studies, 463.

Fotheringham, A. S. (2001). Spatial interaction models. International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences.

Gibson, J. G. (1975). The intervening opportunities model of migration: A critique. Socio-Economic Planning Sciences, 9(5), 205-208.

Hong, I., Jung, W. S., & Jo, H. H. (2019). Gravity model explained by the radiation model on a population landscape. PloS one, 14(6), e0218028.

iDMC. (2022). The state-of-the-art on Drought displacement modelling. Report.
https://www.internal-displacement.org/publications/drought-displacement-modelling/

Kang, C., Liu, Y., Guo, D., & Qin, K. (2015). A generalized radiation model for human mobility: spatial scale, searching direction and trip constraint. PloS one, 10(11), e0143500.

Kluge, L., & Schewe, J. (2021). Evaluation and extension of the radiation model for internal migration. Physical Review E, 104(5), 054311.

Kong, L., Zhou, X., Duan, M., Yang, X., Zhou, C., & Liao, Y. (2022). A dataset of a proxy variable for the poultry trade flows in China. Scientific Data, 9(1), 690.

Kotsubo, M., & Nakaya, T. (2021). Kernel-based formulation of intervening opportunities for spatial interaction modelling. Scientific Reports, 11(1), 950.

Li, F., Feng, Z., Li, P., & You, Z. (2017). Measuring directional urban spatial interaction in China: A migration perspective. PloS one, 12(1), e0171107.

Liu, E., & Yan, X. (2019). New parameter-free mobility model: Opportunity priority selection model. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 526, 121023.

Liu, Y., Wang, S., Wang, X., Zheng, Y., Chen, X., Xu, Y., & Kang, C. (2024). Towards semantic enrichment for spatial interactions. Annals of GIS, 1-16.

Luo, M., & Chen, Y. (2024). Simulating inter-city population flows based on graph neural networks. Geocarto International, 39(1), 2331223.

Marshall, J. M., Wu, S. L., Sanchez C, H. M., Kiware, S. S., Ndhlovu, M., Ouédraogo, A. L., ... & Ferguson, N. M. (2018). Mathematical models of human mobility of relevance to malaria transmission in Africa. *Scientific reports*, *8*(1), 7713.

Masucci, A. P., Serras, J., Johansson, A., & Batty, M. (2013). Gravity versus radiation models: On the importance of scale and heterogeneity in commuting flows. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, *88*(2), 022812.

Morefield, P. (2022). *Using Zero-inflated Regression and the Homophily Principle to Model Migration for Population Projections* (Doctoral dissertation, George Mason University).

Prieto-Curiel, R., Ali, O., Dervić, E., Karimi, F., Omodei, E., Stütz, R., ... & Holovatch, Y. (2024). The diaspora model for human migration. *PNAS nexus*, *3*(5), pgae178.

Ren, M., Lin, Y., Jin, M., Duan, Z., Gong, Y., & Liu, Y. (2020). Examining the effect of land-use function complementarity on intra-urban spatial interactions using metro smart card records. *Transportation*, *47*, 1607-1629.

Rodrigue, J. P. (2024). *The geography of transport systems*. Routledge.

Sen, A., & Smith, T. E. (2012). *Gravity models of spatial interaction behavior*. Springer Science & Business Media.

Simini, F., González, M. C., Maritan, A., & Barabási, A. L. (2012). A universal model for mobility and migration patterns. *Nature*, *484*(7392), 96-100.

Song, B., Yan, X. Y., Tan, S., Sai, B., Lai, S., Yu, H., ... & Lu, X. (2022). Human mobility models reveal the underlying mechanism of seasonal movements across China. *International Journal of Modern Physics C*, *33*(04), 2250054.

Stillwell, J., Bell, M., Ueffing, P., Daras, K., Charles-Edwards, E., Kupiszewski, M., & Kupiszewska, D. (2016). Internal migration around the world: comparing distance travelled and its frictional effect. *Environment and Planning A*, *48*(8), 1657-1675.

Stouffer, S. A. (1960). Intervening opportunities and competing migrants. *Journal of regional science*, *2*(1), 1-26.

Wajdi, N., Adioetomo, S. M., & Mulder, C. H. (2017). Gravity models of interregional migration in Indonesia. *Bulletin of Indonesian Economic Studies*, *53*(3), 309-332.

Wang, H., Zhao, P., & Yan, X. Y. (2023). Quantifying the overall characteristics of urban mobility considering spatial information. *arXiv preprint arXiv:2308.00975*.

Wang, J. (2016). Economic geography: spatial interaction. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology: People, the Earth, Environment and Technology*, 1-4.

Wesolowski, A., O'Meara, W. P., Eagle, N., Tatem, A. J., & Buckee, C. O. (2015). Evaluating spatial interaction models for regional mobility in sub-Saharan Africa. *PLoS computational biology*, *11*(7), e1004267.

Wilson, A. G. (1971). A family of spatial interaction models, and associated developments. *Environment and Planning A*, *3*(1), 1-32.

Yan, X. Y., Zhao, C., Fan, Y., Di, Z., & Wang, W. X. (2014). Universal predictability of mobility patterns in cities. *Journal of The Royal Society Interface*, *11*(100), 20140834.

Zhang, L., Cheng, J., & Jin, C. (2019). Spatial interaction modeling of OD flow data: Comparing geographically weighted negative binomial regression (GWNBR) and OLS (GWOLSR). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(5), 220.

Zhang, L., Luo, L., Hu, L., & Sun, M. (2020). An SVM-Based Classification Model for Migration Prediction of Beijing. *Engineering Letters*, *28*(4).

Zheng, W., Kuang, A., Wang, X., & Chen, J. (2020). Measuring network configuration of the Yangtze River middle reaches urban agglomeration: based on modified radiation model. *Chinese Geographical Science*, *30*, 677-694.