



Morphological Analysis of Yazd Historic Fabric via Voronoi Geometry

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Ali Khaleghi babaei¹
Shaghayegh nasertorabi²
Hossien Kalantari
khalilabad^{3*}

How to cite this article

Ron

URL: <http://>

ABSTRACT

Aims: Rapid urbanization has significantly transformed urban spatial structures and increased the complexity of analyzing historic urban fabrics. The historic fabric of Yazd, one of the most valuable examples of traditional Iranian cities, contains an underlying spatial order that is not readily visible within its seemingly organic form. This study aims to analyze the morphological structure of Yazd's historic fabric using the Voronoi geometry model.

Methods: This applied, descriptive-analytical research was conducted through library studies, spatial data analysis, and Voronoi diagram modeling. Four prominent urban elements—the Jameh Mosque of Yazd, Meydan-e Vaqt-o-Sa'at, the Six-Windcatcher Water Reservoir, and the Tomb of the Twelve Imams—were selected as reference points for generating Voronoi cells and examining spatial influence.

Findings: The results show that the selected elements create distinct spatial territories within the historic fabric. Voronoi diagrams reveal patterns of centrality, proximity, and spatial hierarchy among urban elements. Variations in cell size and configuration reflect differences in their functional and spatial importance. The analysis also indicates correspondence between Voronoi boundaries and the historic street network, highlighting the relationship between spatial organization and movement patterns.

Conclusion: The findings demonstrate that the Voronoi geometry model effectively reveals the hidden spatial order of Yazd's historic fabric. The Jameh Mosque and the Six-Windcatcher Water Reservoir play the most significant roles in overall spatial organization, while the other elements function mainly at the neighborhood scale. Therefore, the Voronoi model can serve as an effective tool for spatial analysis, conservation, and planning in historic urban environments.

Keywords: Urban morphology; Voronoi geometry; Iranian Islamic identity; historical texture of Yazd city; spatial organization; traditional architecture; timeless values of Iranian architecture.

CITATION LINKS

1- Phd Student, Department of Architecture, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2- Phd Student, Department of Architecture, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

3- Professor, Department of Architecture, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran; Academic Staff Member of Jihad Daneshgahi (Corresponding Author).

*Correspondence

Address: Department of Architecture, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Email:
kalantari2005@yahoo.com

Article History

Received:
Accepted:
Published:

[1]. Kaba A. Explaining Africa's rapid population growth, 1950 to 2020: trends, factors, implications, and recommendations....[3]. Pourmohammadi MR, et al. Foundations of urban morphology. Tabriz: University of.. [6]. Bagheri B, Majedi H, Habib F. Analyzing the role of structural morphological...[7]. Pourmohammadi MR, Sadr Mousavi MS, Jamali S. An analysis of...[8]. Hillier B, Hanson J. *The social logic of space*. Cambridge: Cambridge.. [9]. Iranmanesh N, Pourjafar MR, Ziyari K, Khatibi MR. Urban morphology knowledge....[10]. Abedini A, Khojasteh Maghal F, Koorehpaz-Saied H, Asgari F...[11]. Goharian A, Daneshjoo Kh, Mahdavejad M, Yeganeh M. Voronoi geometry...[12]. Çelik T. Architectural design method suggestion with machine...[13]. Bahraminejad F, Babaki K. Application of Voronoi diagrams...[14]. Negm R. The concept of Voronoi diagram and its impact on the formation...[15]. Batty M. *The new science of cities*. Cambridge...[16]. Porta S, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets...[17]. Hakim BS. *Arabic-Islamic cities: building and planning principles*...[19]. Samadi A, Arbabi Sabzevari A, Joudaki H, Amirazodi T, Adibi...[20]. Pourahmad A, Kalantari Khalilabad H. *Techniques and experiences*...[21]. Kalantari Khalilabad H, Derakhshani N. *Sustainable physical*.....



تحلیل مورفولوژیک بافت تاریخی شهر یزد با استفاده از مدل هندسه ورونوی

اطلاعات مقاله چکیده

نوع مقاله: تحقیق بنیادی

نویسندگان

علی خالقی بابائی^۱

شقایق ناصرترابی^۲

حسین کلانتری خلیل آباد*^۳

اهداف: رشد شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در شهرهای تاریخی ایران، موجب دگرگونی‌های عمیق کالبدی و فضایی شده و تحلیل ساختار درونی این بافت‌ها را با پیچیدگی‌های جدیدی مواجه ساخته است. بافت تاریخی شهر یزد به‌عنوان یکی از ارزشمندترین نمونه‌های شهرهای سنتی ایران، واجد نظم درونی است که در ظاهر ارگانیک آن به‌راحتی قابل تشخیص نیست. پژوهش با هدف تحلیل مورفولوژیک ساختار فضایی بافت تاریخی یزد، از مدل هندسه ورونوی به‌عنوان ابزاری تحلیلی بهره گرفته است.

روش‌ها: پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی-تحلیلی بوده و با اتکا بر مطالعات کتابخانه‌ای، تحلیل نقشه‌ها و داده‌های مکانی، و مدلسازی دیاگرام‌های ورونوی انجام شده است. عناصر شاخص شامل مسجد جامع یزد، میدان وقت‌الساعت، آب‌انبار شش‌بادگیری و بقعه دوازده امام به‌عنوان نقاط پایه انتخاب شدند.

یافته‌ها: تحلیل‌های فضایی مبتنی بر دیاگرام‌های ورونوی نشان داد که توزیع و قلمرو نمود عناصر شاخص در بافت تاریخی یزد الگوی مشخصی از مرکزیت و همسایگی را شکل می‌دهد. تفاوت در ابعاد و ساختار سلول‌ها بیانگر نقش‌های متفاوت فضایی عناصر و وجود سلسله‌مراتب کالبدی در مقیاس‌های گوناگون بافت است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که سلول‌های ورونوی، قلمروهای فضایی متمایز و سلسله‌مراتب عملکردی عناصر شاخص را آشکار ساخته و نقش محوری مسجد جامع و آب‌انبار شش‌بادگیری را در سازمان فضایی کل بافت تأیید می‌کنند. انطباق مرزهای ورونوی با شبکه معابر تاریخی بیانگر وجود نظم پنهان مبتنی بر منطق فاصله-نزدیکی است. مدل هندسه ورونوی ابزاری کارآمد برای تبیین علمی ساختار فضایی و پشتیبانی از برنامه‌ریزی و حفاظت بافت‌های تاریخی به‌شمار می‌رود.

کلید واژگان: مورفولوژی شهری؛ هندسه ورونوی؛ هویت اسلامی ایرانی، بافت تاریخی شهر یزد، سازمان فضایی؛ معماری سنتی، ارزش‌های بی‌زمان معماری ایرانی

۱. دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.
۲. دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.
۳. استاد جهاددانشگاهی و هیات علمی گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران (نویسنده مسئول).

نویسنده مسئول *

kalantari2005@yahoo.com

تاریخ مقاله

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

تاریخ انتشار:

ارجاع دهی

URL: <http://>

مقدمه

رشد جمعیت در دهه‌های اخیر، به‌ویژه پس از جنگ جهانی دوم، تأثیر قابل توجهی بر الگوی گسترش شهرها گذاشته است. افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، فشار مضاعفی بر فضاهای شهری وارد کرده و سبب تغییرات کالبدی، اجتماعی و فضایی گسترده‌ای شده است [۱]. شهرهای امروز با چالش‌هایی همچون توسعه بی‌ضابطه، مصرف بی‌رویه زمین، و کاهش کیفیت محیط‌زیست مواجه‌اند. این مسائل نه تنها ساختار فضایی شهرها را دگرگون کرده، بلکه تحلیل و شناخت مورفولوژی شهری را نیز پیچیده‌تر ساخته است. در ایران نیز روند توسعه شتابان شهری سبب بروز مشکلات متعددی شده است. بافت‌های تاریخی شهرها که حامل هویت، اصالت و ارزش‌های فرهنگی هستند، بیش از دیگر بخش‌ها تحت تأثیر این تغییرات قرار گرفته‌اند. شهر یزد به عنوان یکی از مهم‌ترین شهرهای تاریخی ایران، بافتی منسجم، پیوسته و ارزشمند دارد که بررسی و تحلیل علمی ساختار آن ضروری است. چنانکه کلانتری خلیل‌آباد [۲] اشاره می‌کند، شناخت لایه‌های شکل‌گیری بافت‌های تاریخی و تحلیل عناصر ساختاری آنها، شرط لازم برای برنامه‌ریزی آگاهانه و حفاظت مؤثر از این میراث ارزشمند است. مورفولوژی شهری به‌عنوان دانشی میان‌رشته‌ای، با بررسی شکل، ساختار و فرآیندهای تحول شهر، ابزاری مهم برای فهم پیچیدگی‌های کالبدی-فضایی شهرهای تاریخی فراهم می‌آورد. این دانش از اواخر قرن نوزدهم شکل گرفت و در ایران نیز پژوهشگران متعددی، از جمله پورمحمدی و همکاران [۳] اهمیت آن را در تحلیل ساختارهای کهن و معاصر برجسته کرده‌اند. در این میان، استفاده از مدل‌ها و ابزارهای دقیق تحلیل فضایی می‌تواند به شناخت عمیق‌تر الگوهای شکل‌گیری بافت‌های تاریخی کمک کند. یکی از این ابزارها، مدل هندسه ورونوی است؛ روشی ریاضی برای تقسیم‌بندی فضا بر اساس نزدیک‌ترین فاصله به یک مجموعه نقاط مشخص. سلول‌های ورونوی امکان تحلیل الگوهای توزیع عناصر شهری، رابطه محلات با یکدیگر، شبکه دسترسی، سلسله‌مراتب فضا و چگونگی سازمان‌یابی عناصر کالبدی را فراهم می‌کنند. در سال‌های اخیر، برخی از محققان کاربرد این مدل در تحلیل بافت‌های تاریخی و مطالعه ساختار فضایی

شهرهای سنتی مورد توجه قرار داده‌اند. کلانتری خلیل‌آباد نیز در مطالعات خود بر لزوم بهره‌گیری از ابزارهای دقیق تحلیل فضایی همچون ورونوی برای فهم عمیق‌تر بافت‌های تاریخی تأکید کرده است. با توجه به اهمیت بافت تاریخی یزد و ضرورت شناخت علمی ساختار آن، این پژوهش به دنبال تحلیل مورفولوژیک این بافت با استفاده از مدل هندسه ورونوی است. روش مذکور می‌تواند الگوهای پنهان و ساختارهای بنیادین سازمان فضایی این بافت را آشکار سازد و در نتیجه مبنایی برای برنامه‌ریزی، حفاظت و احیای آن فراهم آورد. بنابراین پرسش جامع این پژوهش چنین است: مدل هندسه ورونوی چگونه می‌تواند ساختار فضایی و الگوهای شکل‌گیری بافت تاریخی شهر یزد را با دقت و عمق بیشتری تبیین و آشکار کند؟

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی - تحلیلی است و با رویکردی مبتنی بر تحلیل مورفولوژیک بهره‌گیری از مدل‌های هندسی، به‌ویژه دیگرام‌های ورونوی به تبیین ساختار فضایی بافت تاریخی شهر یزد می‌پردازد. در گام نخست، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و اسنادی، مبانی نظری مرتبط با مورفولوژی شهری، مفهوم دیگرام‌ها، گونه‌شناسی آن‌ها و اصول هندسه ورونوی گردآوری شد. همچنین تاریخچه، ویژگی‌ها و ساختار کالبدی بافت تاریخی شهر یزد بر اساس منابع معتبر، به‌ویژه آثار پژوهشگران برجسته در حوزه ساختار شهری و تحلیل فضایی، بررسی گردید [۴].

در گام دوم، نقشه‌ها، تصاویر هوایی و داده‌های مکانی مرتبط با بافت تاریخی یزد جمع‌آوری و پس از آماده‌سازی، به‌عنوان ورودی مدل‌سازی مورفولوژیک به‌کار گرفته شد. تحلیل هندسی مبتنی بر مدل ورونوی انجام و نتایج به‌دست‌آمده با ساختار واقعی بافت تاریخی تطبیق داده شد تا میزان تناسب و هم‌خوانی آن‌ها مشخص شود [۵].

جامعه آماری پژوهش را بافت تاریخی شهر یزد شامل محلات فهادان، تل‌یزد و لُب‌خندق تشکیل می‌دهد. از میان این محدوده، چهار عنصر اصلی که بیشترین تأثیر را بر سازمان فضایی دارند، به‌عنوان نقاط پایه در تولید دیگرام‌های ورونوی انتخاب شده‌اند:

فضایی، نحوه استقرار عناصر شاخص و روابط میان فضاهای شهری نیز می‌پردازد. در این چارچوب، نظریه‌پردازانی همچون موراتوری و کانینگام در مکتب ایتالیایی، بر تداوم تاریخی فرم شهر و نقش عناصر بنیادین در شکل‌گیری ساختار فضایی تأکید کرده‌اند (در شکل شماره ۱ تعاریف و نظریه‌پردازان این حوزه قابل مشاهده است). همچنین در مطالعات مرتبط با شهرهای اسلامی و سنتی ایران، سازمان فضایی شهر بر پایه سلسله‌مراتب عملکردی، مرکزیت عناصر مذهبی و ارتباط میان فضاهای عمومی و شبکه معابر تحلیل شده است. در شهرهای تاریخی ایران، عناصری همچون مسجد جامع، میدان، بازار و آب‌انبارها نه تنها عملکرد کالبدی، بلکه نقش سازمان‌دهنده فضایی و اجتماعی داشته‌اند و به‌عنوان هسته‌های شکل‌دهنده ساختار شهری عمل کرده‌اند. از این منظر، مطالعه مورفولوژی بافت تاریخی یزد مستلزم توجه هم‌زمان به ساختار کالبدی، نظام فضایی و روابط عملکردی میان عناصر شاخص شهری است. (شکل ۱)

در رویکردهای نوین مورفولوژی شهری، شهر نه صرفاً به‌عنوان مجموعه‌ای از فرم‌های کالبدی، بلکه به‌مثابه یک «نظام سازمان فضایی» تحلیل می‌شود؛ نظامی که در آن روابط میان عناصر، میزان دسترسی، مرکزیت فضایی و الگوهای حرکت شهری، بنیان شکل‌گیری ساختار شهر را تعیین می‌کنند. هیلبر و هسنس در نظریه «نحو فضا» بیان می‌کنند که ساختار فضایی شهرها واجد منطقی درونی است که از طریق شبکه ارتباطی، عمق فضایی و میزان هم‌پیوندی فضاها قابل تحلیل است [۸]. بر این اساس، عناصر شاخص شهری همچون مسجد جامع، میدان و بازار، به دلیل جایگاه فضایی و میزان دسترسی بالا، نقش هسته‌های سازمان‌دهنده جریان‌های حرکتی و تعاملات اجتماعی را بر عهده دارند. این دیدگاه به‌ویژه در تحلیل شهرهای تاریخی و اسلامی اهمیت دارد؛ زیرا ساختار این شهرها بر پایه هم‌پیوندی تدریجی محلات، سلسله‌مراتب فضایی و ارتباط میان مراکز مذهبی، اقتصادی و اجتماعی شکل گرفته است. در چنین بستری، مدل هندسه ورونوی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل، منطق فاصله-نزدیکی و قلمرو نفوذ عناصر فضایی را به‌صورت هندسی آشکار سازد.

- مسجد جامع یزد
- میدان وقت‌الساعت
- آب‌انبار شش‌بادگیری
- بقعه دوازده امام

معیار انتخاب این عناصر شامل موقعیت فضایی، نقش عملکردی، ارزش تاریخی و اهمیت کالبدی آنها در ساختار کلی بافت بوده است. پس از مکان‌یابی دقیق نقاط بر روی نقشه پایه، ساختار کالبدی محیط پیرامون آنها شامل شبکه معابر، کارکرد فضاهای مجاور و سازمان فضایی مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس موقعیت این عناصر، دیاگرام‌های ورونوی تولید و الگوهای حاصل با ساختار واقعی بافت تاریخی تطبیق داده شد تا نظم نهفته و روابط سلسله‌مراتبی بافت آشکار شود. در مرحله پایانی، نتایج به‌دست‌آمده از مدل ورونوی از منظرهای مورفولوژیک، سلسله‌مراتبی و سازمان فضایی تحلیل شد. این تحلیل‌ها امکان استخراج منطق شکل‌گیری بافت و الگوهای کالبدی حاکم بر سازمان فضایی یزد را فراهم کرد.

مبانی نظری پژوهش

مورفولوژی شهری: مورفولوژی شهری به صورت یک دانش سازمان یافته و توجه به نیروهای متنوعی که در شکل‌گیری یک شهر دخیل‌اند، یکی از مهم‌ترین رویکردهای کالبدی به شکل شهر است که از اواخر قرن نوزدهم میلادی شکل می‌گیرد. مورفولوژی شهری جریانی عمده در مطالعه شکل شهر در جغرافیای شهری است. واژه مورفولوژی به معنای علم فرم است که کار آن بررسی شکل، فرم، ساختار خارجی یا شیوه مرتب شدن به عنوان شیء مورد مطالعه یا طبقه‌بندی است [۶]. تعاریف مختلفی از سوی صاحبه نظران رشته‌های مرتبط با آن ارائه گردید برای ورود به بحث مهم‌ترین این تعاریف در پی می‌آید: مورفولوژی شهری مطالعه فرم شهرها در طول زمان است، مورفولوژی شهری به بیان ساده، مطالعه فرم شهرها است. مورفولوژیست‌های شهری درباره چپستی این رشته توافق دارند، اما در این که فرم شهرها چگونه باید مطالعه شود اختلاف نظر هست. مورفولوژی شهری به معنای طرح‌ها، ساختمان‌ها، کاربری، خیابان‌ها، نقشه‌ها و چشم‌اندازهای شهری است [۷].

مورفولوژی شهری در رویکردهای معاصر، صرفاً به مطالعه فرم کالبدی محدود نمی‌شود، بلکه به بررسی منطق درونی سازمان

ردیف	تعاریف	نظریه پرداز	سال
1	مورفولوژی شهری چگونگی برپایی، برافراشتگی و گشوده شدن عناصر سکونتگاهی را تحلیل می‌کند. واژه‌ی برپایی، رابطه با زمین و واژه‌ی برافراشتگی رابطه با آسمان را معرفی می‌کند. واژه‌ی گشوده شدن نیز به معنی تعامل فضایی با محیط یا همان رابطه‌ی درون و برون است.	Shulz	1979
2	مورفولوژی شهری به معنای «طرح‌ها، ساختمان‌ها، کاربری، خیابان‌ها، نقشه‌ها و چشم‌اندازهای شهری» است.	مدنی‌پور به نقل از گردون	1387-1984
3	مورفولوژی شهری بررسی نظام‌مند فرم، شکل، نقشه، ساختار و کارکردهای بافت مصنوع شهرها و منشاء و شیوه‌های تکامل این بافت در طول زمان است.	مدنی‌پور به نقل از کلارک، اسمال و ویتریک، گودال	1987-1986-1985-1387
4	مورفولوژی شهری «مطالعه‌ی بافت فیزیکی (یا ساخته شده‌ی) فرم شهر، مردم و فرآیندهای شکل‌دهنده‌ی شهر است.»	Jones and Larkham	1991
5	مورفولوژی شهری رشته‌ای است که فرآیند ساخت شهر و نتایج یا محصولات آن را بررسی می‌کند.	Moudon	1998
6	مورفولوژی شهری مطالعه‌ی فرم شهرها در طول زمان است.	Scheer	2002
7	مورفولوژی شهری به بیان ساده، مطالعه‌ی فرم شهرهاست. مورفولوژیست‌های شهری درباره‌ی چیستی این رشته توافق دارند، اما در این که فرم شهرها چگونه باید مطالعه شود اختلاف نظر هست.	Gauthier and Gilliland	2006

شکل ۱. تعاریف مختلف صاحب‌نظران رشته‌های مختلف، [۸]

باید ساخته شود و آنچه ساخته شده است را مورد بررسی قرار می‌دهد [۱۰].

در میان این مکاتب، رویکردهای مبتنی بر تحلیل سازمان فضایی و سلسله‌مراتب عناصر شهری، اهمیت ویژه‌ای در مطالعه بافت‌های تاریخی دارند. این رویکردها شهر را به‌مثابه یک نظام فضایی پویا در نظر می‌گیرند که در آن، نحوه استقرار عناصر شاخص، روابط همسایگی، قلمروهای نفوذ و شبکه ارتباطی معابر، ساختار کلی شهر را شکل می‌دهد. در بافت‌های تاریخی ایران نیز، سازمان فضایی شهرها بر پایه نوعی نظم درونی مبتنی بر مرکزیت و اصل فاصله-نزدیکی شکل گرفته است؛ به‌گونه‌ای که عناصر مذهبی، خدماتی و اجتماعی در تعامل با شبکه معابر و محلات، سلسله‌مراتب فضایی مشخصی را پدید آورده‌اند. پژوهش حاضر نیز با بهره‌گیری از مدل هندسه ورونویی، درصدد تبیین همین روابط فضایی و آشکارسازی منطق پنهان سازمان کالبدی بافت تاریخی یزد است. (جدول ۱)

مکاتب مورفولوژی شهری: دانش مورفولوژی شهری در دهه‌های اخیر در چند مکتب ارائه شده است که معمولاً مکتب بریتانیایی، مکتب ایتالیایی، مکتب فرانسوی (مطابق جدول شماره) اشاره می‌شود. در دهه اخیر یک مکتب که مختلطی از رویکردهای گوناگون است تشکیل شده است که تحت عنوان ترکیبی از ISUF، رویکردهای مختلف شکل‌شناسی شهری را ارائه می‌دهند [۹]. این تقسیم‌بندی از این جهت قابل اهمیت است که تحلیل راجع به ریخت‌شناسی شهری در زمینه رشته‌هایی نظیر معماری و طراحی شهری بدون ارجاع به مکاتب خاصی که در ارتباط با شیوه‌های گوناگون مطالعات هستند، غیر ممکن است. با عنایت به این سه مکتب اهداف نهایی مطالعات ریخت‌شناسانه شهری می‌تواند در سه جنبه اهداف توصیفی - تبیینی: عموماً باهدف رسیدن به یک تئوری ساخت شهر؛ اهداف تجویزی: معمولاً باهدف ارائه یک تئوری برای طراحی شهر و اینکه شهر چگونه باید ساخته شود؛ و نهایتاً اهداف انتقادی: که عموماً تفاوت و تشابهات بین آنچه

جدول ۱. مکاتب مورفولوژی شهری [۱۰]

مکتب انگلیسی	مطالعه فرم شهر با اهداف توصیفی و تبیینی برای رسیدن به یک تئوری ساخت شهر. توجه به اینکه شهر چرا و چگونه ساخته می‌شود. متخصصین این مکتب عمدتاً از سنت کانزن ^۲ و وایتهند ^۳ پیروی می‌کنند.
مکتب ایتالیایی	مطالعه فرم شهر با اهداف تجویزی برای ارائه یک تئوری برای طراحی شهر. توجه به اینکه شهر چگونه باید ساخته شود. متخصصین این مکتب عمدتاً از سنت گونه‌شناسانه موراتوری، کانیگیا و رسی پیروی می‌کنند.
مکتب فرانسوی	مطالعه فرم شهر برای فهم تأثیر تئوری‌های گذشته بر فرایند ساختن شهر و بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های تئوری‌های تجویزی. آنچه باید ساخته شود و آنچه در عمل ساخته شده است. چهره‌های اصلی این مکتب پانه رای، کاتکس و هنری لوفور هستند.

روابط عملکردی و دسترسی تدریجی شکل گرفته‌اند، تحلیل ورونوی می‌تواند نظم پنهان و منطق درونی سازمان فضایی را آشکار سازد.

نمودار ورونوی: نمودار ورونوی یک ابزاری است، که پتانسیل زیبایی شناسی آن تا حد زیادی ناشناخته مانده است. یکی از کاربرد های هنری قبلی آن تولید الگوهای فراکتال طبیعی با استفاده از نمودار ورونوی در یک سری از مراحل بازگشتی می باشد. از این رو نمودارهای ورونوی به عنوان یک ابزار طراحی جذاب و غیر تکراری که دارای کیفیت پارامتری که ممکن است بیشتر تطبیقی باشد تا به صورت یک سیستم مدولار عادی، پیشنهاد می شوند. از ویژگی های جالب ساتارهای ورونوی، می توان به مفهوم ذاتی روابط فضایی، مجاورت ها و همسایگی ها اشاره نمود. در کل این سلول های ورونوی در بردارنده هم ارزی مستقیم هندسی هستند. این ویژگی نشان دهنده کاربرد نمودار ورونوی در مدل های پارامتری روابط فضایی و نتیجتاً در برنامه های مختلف معماری و طراحی شهری است. معماران و طراحان می توانند با پتانسیل های خلاقانه نمودار ورونوی، به هندسه های پیچیده سلولی نوظهور دست یابند [۱۳].

در سال های اخیر، دیاگرام های ورونوی در مطالعات مورفولوژی شهری و تحلیل ساختار فضایی شهرهای تاریخی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ زیرا این مدل قادر است روابط فاصله‌ای، قلمروهای عملکردی و میزان نفوذ عناصر شهری را به صورت هندسی و قابل سنجش بازنمایی کند. در تحلیل بافت های تاریخی، سلول های ورونوی می‌توانند چگونگی توزیع عناصر شاخص، الگوی همسایگی، مراتب فضایی و منطق سازمان یابی شبکه معابر را آشکار سازند. از این منظر، مدل ورونوی صرفاً

هندسه ورونوی: هندسه ورونوی یکی از انواع شناخته شده هندسه را تشکیل می‌دهد. نمودارهای ورونوی برای اولین بار در قرن هفدهم، با هدف توصیف شکل‌گیری ساختارهای طبیعی، معرفی شدند. تقریباً اولین نمایش‌های گرافیکی نمودارهای ورونوی در کتاب اصول فلسفه رنه دکارت در سال ۱۶۴۴ به وقوع پیوست [۱۱]. به‌طور مشخص‌تر، در دوره‌های بعدی، مفهوم ورونوی به طور مستقل در زمینه‌های مختلف توسعه یافت و با نام‌های گوناگونی شناخته شد، مانند تبدیل محور میانی در زیست‌شناسی، میدان ویگنر-سایترز (Wigner-Seitz field) در شیمی، و چندضلعی‌های تیسن (Thiessen polygons) در هواشناسی و جغرافیا. نمودار ورونوی از سال ۱۸۵۰، زمانی که دیریکله (Dirichlet) از این مفهوم در ریاضیات استفاده کرد، به‌طور رسمی با نام موزاییک دیریکله شناخته شد و بعدها در سال ۱۹۰۸، زمانی که گنورگی ورونوی از این نمودار طبق یک الگوریتم استفاده کرد، همچنین به نام‌های کاشی‌کاری ورونوی، خوشه‌بندی ورونوی یا نمودار ورونوی نامیده شد [۱۲].

مبنای اصلی دیاگرام‌های ورونوی بر مفهوم «نزدیک‌ترین همسایگی» و سازمان‌یابی فضا بر اساس فاصله استوار است. در این مدل، هر نقطه از فضا به نزدیک‌ترین عنصر شاخص تعلق می‌گیرد و در نتیجه، قلمروهای فضایی بر اساس منطق فاصله-نزدیکی شکل می‌گیرند. این ویژگی سبب شده است که مدل ورونوی در تحلیل ساختارهای فضایی شهری، به‌ویژه در بررسی قلمرو نفوذ عناصر شهری، سلسله‌مراتب فضایی و الگوهای مرکزیت، کاربرد گسترده‌ای پیدا کند. در بافت‌های تاریخی، که شبکه معابر و توزیع عناصر شهری عمدتاً بر پایه

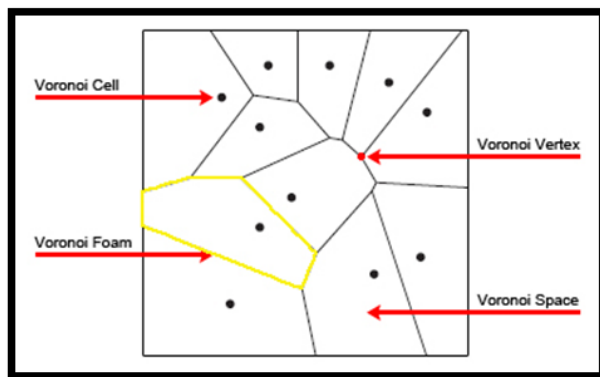
فضای مورد نظر توزیع شده‌اند. شکل و اندازه سلول‌ها بسیار متغیر و نامنظم است، که الگوهای طبیعی‌تری را شبیه‌سازی می‌کند. نمودار ورونویی خوشه‌ای که در این نوع، نقاط به صورت گروه‌بندی شده در قالب خوشه‌ها توزیع می‌شوند [۱۴]. (شکل ۲)

مطالعات متعددی در سال‌های اخیر، از مدل‌های هندسی و به‌ویژه دیاگرام‌های ورونوی برای تحلیل ساختار فضایی بافت‌های تاریخی و شهرهای سنتی استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مدل ورونوی در شناسایی مرکزیت فضایی، تحلیل قلمرو عملکردی عناصر شاخص و تبیین الگوهای همجواری و دسترسی، کارآمدی قابل توجهی دارد. در برخی مطالعات انجام‌شده بر روی بافت‌های تاریخی خاورمیانه و شهرهای اسلامی، این مدل توانسته است ارتباط میان شبکه معابر، ساختار محلات و موقعیت عناصر مذهبی و خدماتی را آشکار سازد. بنابراین، بهره‌گیری از هندسه ورونوی در تحلیل بافت تاریخی یزد، در امتداد رویکردهای نوین تحلیل مورفولوژیک و سازمان فضایی شهرهای تاریخی قابل تبیین است. (شکل ۳)

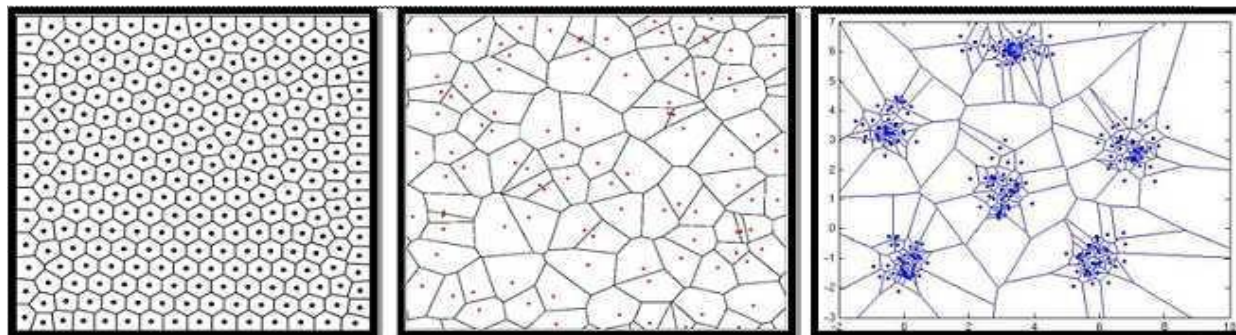
یک ابزار هندسی نیست، بلکه روشی تحلیلی برای فهم روابط فضایی و ساختار درونی شهر به شمار می‌رود.

اجزاء و انواع دیاگرام های ورونوی: نمودار ورونویی از مجموعه عناصر زیر تشکیل شده است: سایت: نقطه‌ای که نمودار ورونویی بر اساس آن ایجاد می‌شود. لبه: یک خط عمودی یا یک خط مستقیم که دو مرکز (سایت) را به هم متصل می‌کند. گره: نقطه‌ای که در آن لبه‌های چندضلعی‌ها (سلول‌ها) یکدیگر را قطع می‌کنند. سلول: منطقه‌ای در داخل چندضلعی‌های محدب که فاقد حفره یا نفوذ است. مرز ورونویی: اینها چندضلعی‌های محدبی هستند که فضای ورونویی را دربرمی‌گیرند [۱۴]. شکل شماره ۱۲ اجزاء دیاگرام های ورونوی را به شکل کشیده است.

انواع نمودارهای ورونویی بر اساس نحوه تولید و توزیع شبکه نقاط (سایت‌ها) تفاوت پیدا می‌کنند و به سه نوع اصلی (مطابق شکل شماره ۳) تقسیم می‌شوند: نمودار ورونویی منظم که در این نوع، نقاط (سایت‌ها) به طور مساوی در یک شبکه مربعی، شش‌ضلعی (هگزگونال) یا ماریچی توزیع شده‌اند. نمودار ورونویی تصادفی که در این نوع، نقاط به صورت تصادفی در



شکل ۲. اجزاء دیاگرام ورونوی [۱۲]



شکل ۳. انواع دیاگرام ورونوی [۱۴]

اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی قابل توجه است. شبکه معابر، ارتباط میان محله‌ها و روابط فضایی بر اساس قلمروهای عملکردی عناصر شاخص شکل گرفته و نشان‌دهنده نظم درونی بافت است. در چارچوب نظری پژوهش حاضر، تحلیل بافت تاریخی یزد با ترکیب مورفولوژی شهری و مدل هندسه ورونوی انجام می‌شود. مدل ورونوی با تفکیک فضا بر اساس فاصله از نقاط شاخص، امکان آشکارسازی نظم پنهان، قلمروهای عملکردی و سلسله‌مراتب فضایی بافت تاریخی را فراهم می‌کند و زمینه‌ای علمی برای ارائه راهبردهای حفاظت و مدیریت بافت تاریخی فراهم می‌نماید [۲۴]. (شکل ۴)

ساختار فضایی شهرهای تاریخی ایران، به‌ویژه شهرهای کویری، متأثر از اصول شهرسازی اسلامی-ایرانی و شرایط اقلیمی شکل گرفته است. در این شهرها، عناصر شاخصی همچون مسجد جامع، میدان، بازار، آب‌انبار و گذرهای اصلی، علاوه بر نقش عملکردی، واجد نقش ساختاری در سازمان فضایی شهر هستند. به اعتقاد پژوهشگران حوزه شهر اسلامی، مرکزیت فضایی در این شهرها عمدتاً بر محور نهادهای مذهبی و اجتماعی سازمان می‌یابد و شبکه معابر به‌صورت تدریجی و سلسله‌مراتبی پیرامون این عناصر توسعه پیدا می‌کند [۱۷]. همچنین پژوهش‌های مرتبط با شهرهای تاریخی ایران نشان می‌دهد که نظام فضایی این شهرها مبتنی بر اصل همجواری، قلمروهای عملکردی و پیوند میان فضاها عمومی و نیمه‌عمومی بوده است [۲۵]. در این چارچوب، بافت تاریخی یزد را می‌توان نمونه‌ای از یک نظام فضایی منسجم دانست که در آن روابط فاصله‌ای و قلمرو نفوذ عناصر شاخص، در شکل‌گیری ساختار کالبدی و عملکردی شهر نقش تعیین‌کننده داشته‌اند. (شکل ۵)

چارچوب نظری این پژوهش بر پیوند میان مورفولوژی شهری و مدل هندسه ورونوی استوار است. بر اساس مبانی نظری مورفولوژی شهری و یافته‌های پژوهشی درباره ساختار و مدیریت بافت تاریخی یزد، سه اصل بنیادین برای تبیین ساختار فضایی این بافت در نظر گرفته شده است [۲۶].

اصل مرکزیت: سازمان فضایی بافت تاریخی یزد بر محور عناصر شاخص مذهبی، فرهنگی و خدماتی مانند مسجد جامع، میدان‌های قدیمی و آب‌انبارهای تاریخی شکل گرفته است. این عناصر، هسته‌های اولیه و سازمان‌دهنده شبکه معابر

در دهه‌های اخیر، استفاده از مدل‌های هندسی و تحلیل‌های مبتنی بر دیاگرام ورونوی در مطالعات شهری و معماری رشد قابل توجهی داشته است. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که این مدل در تحلیل ساختار فضایی، سازمان‌یابی عناصر شهری و روابط همجواری کارآمد است. برای نمونه، بتی [۱۵] از مدل‌های هندسی و سلولی برای تحلیل پیچیدگی ساختار شهرها و شبکه‌های فضایی استفاده کرده و نشان داده است که الگوهای فاصله‌ای در شکل‌گیری سازمان فضایی شهر نقش بنیادین دارند. همچنین پورتا [۱۶] در تحلیل شبکه‌های شهری، بر نقش مرکزیت فضایی و ارتباط میان ساختار معابر و عناصر شاخص شهری تأکید کرده‌اند. در حوزه شهرهای تاریخی و اسلامی نیز برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های هندسی و تحلیل‌های فضایی می‌توانند الگوهای پنهان سازمان فضایی و روابط عملکردی محلات را آشکار سازند [۱۷]. در مطالعات داخلی نیز پژوهشگران حوزه مورفولوژی شهری بر اهمیت تحلیل ساختار فضایی بافت‌های تاریخی ایران و نقش عناصر شاخص در شکل‌گیری نظم درونی شهر تأکید کرده‌اند [۱۷ و ۱۸]. بر این اساس، پژوهش حاضر در امتداد رویکردهای نوین تحلیل فضایی و مورفولوژیک، از مدل ورونوی برای بازخوانی ساختار فضایی بافت تاریخی یزد بهره می‌گیرد.

بافت تاریخی شهر یزد: بافت تاریخی شهر یزد با مساحت ۷۴۳ هکتار و حریم ۵,۰۰۰ هکتار در مرکز شهر قرار دارد و به عنوان یکی از شهرهای تاریخی جهان ثبت شده است [۱۹ و ۲۰]. مرکز اولیه شهر یزد در محله فهادان شکل گرفت و با وجود همجواری با ریگزارها و کویر شمالی، موقعیت مناسبی از نظر طبیعی داشته و در همسایگی آن سکونتگاه‌های متعددی مستقر شده‌اند [۲۱]. این بافت تاریخی شامل ۹ محله اصلی به نام‌های فهادان، گودال مصلی، گنبد سبز، گازارگاه، شش بادگیری، دولت‌آباد، شیخ داد، زرتشتی‌ها و پشت‌باغ می‌باشد که در شکل شماره ۴ قابل مشاهده است [۲۲ و ۲۳]. عناصر شاخص در این بافت شامل مسجد جامع یزد، میدان وقت‌الساعت، آب‌انبار شش بادگیر و بقعه دوازده امام هستند (شکل شماره ۵) که به عنوان هسته‌های سازمان‌دهنده فضایی عمل می‌کنند [۲۴]. بافت تاریخی یزد علاوه بر ارزش کالبدی و معماری، دارای هویت

تاریخی یزد، فرض بنیادی این پژوهش چنین است: ساختار فضایی بافت تاریخی یزد براساس نظم درونی ناشی از مرکزیت عناصر شاخص و قلمرو عملکردی آن‌ها شکل گرفته است؛ مدل هندسه ورونوی با بازنمایی این منطق، نواحی عملکردی، ارتباطی و ساختار فضایی بافت را به صورت علمی و قابل سنجش تبیین می‌کند.

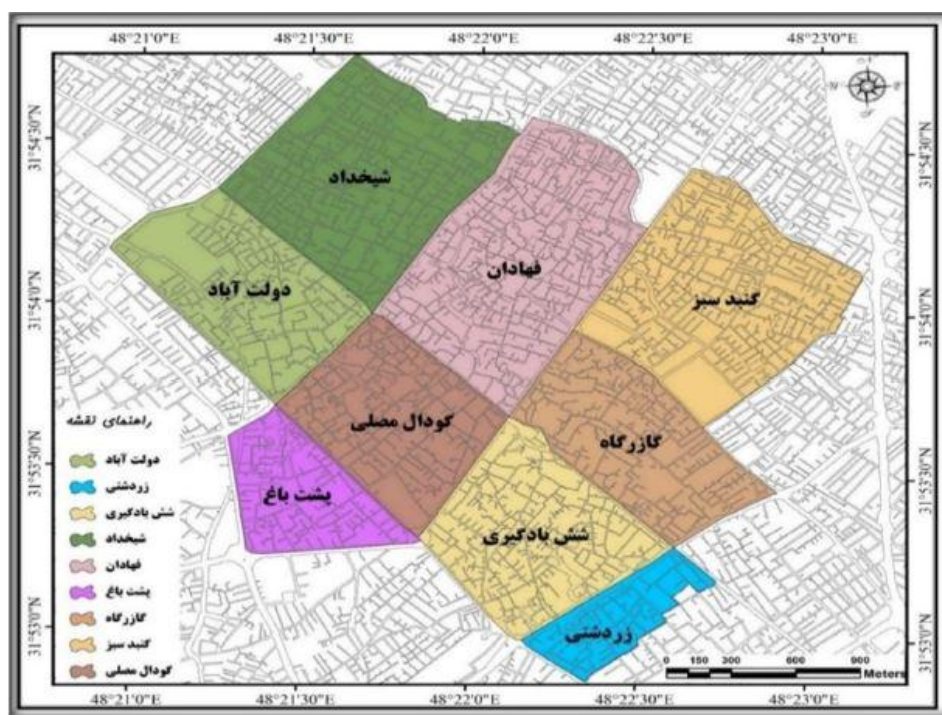
یافته ها

به منظور دستیابی به درکی عمیق تر از ساختار فضایی بافت تاریخی یزد، تحلیل دیاگرام‌های ورونوی صرفاً به خوانش هندسی سلول‌ها محدود نگردید، بلکه ویژگی‌های کالبدی، عملکردی و ارتباطی هر یک از عناصر شاخص نیز به صورت تطبیقی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، معیارهایی همچون وسعت نسبی سلول‌های ورونوی، میزان ارتباط آن‌ها با شبکه معابر اصلی و فرعی، تعداد و تراکم گره‌های حرکتی پیرامونی، نحوه توزیع کاربری‌های شهری، میزان هم‌پیوندی فضایی و موقعیت عناصر شاخص در ساختار کلی بافت تاریخی مورد تحلیل قرار گرفت.

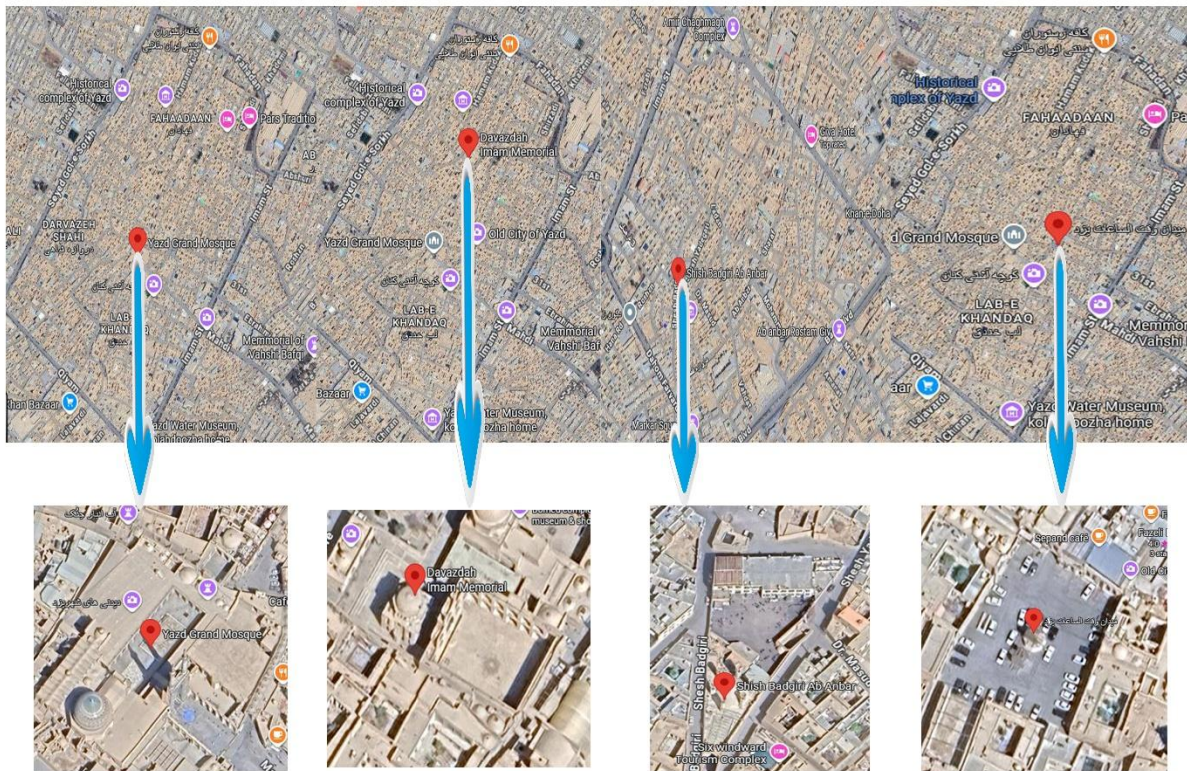
و توزیع فعالیت‌های شهری در محلات تاریخی هستند و نقش بنیادینی در انسجام فضایی بافت دارند [۲۶]. در مدل هندسی این پژوهش، همین عناصر به عنوان نقاط تولیدکننده سلول‌های ورونوی استفاده می‌شوند.

اصل قلمرو فضایی: هر عنصر شاخص در بافت، قلمرو عملکردی و کالبدی مشخصی ایجاد می‌کند که بر شکل‌گیری کاربری‌های پیرامونی، سلسله‌مراتب معابر و روابط فضایی محلات تأثیر می‌گذارد [۲۶]. این اصل نشان می‌دهد که بافت تاریخی، صرفاً مجموعه‌ای از عناصر پراکنده نیست، بلکه ساختاری مبتنی بر قلمروهای نفوذ عناصر شاخص دارد. مدل ورونوی در این پژوهش برای بازنمایی همین قلمروهای فضایی به کار گرفته می‌شود.

اصل تحلیل هندسی: دیاگرام ورونوی با تقسیم فضا بر اساس فاصله از نقاط شاخص، الگوی نفوذ، سلسله‌مراتب، و میزان تأثیر عناصر کلیدی را مشخص می‌کند و از این طریق به فهم بهتر ساختار درونی بافت کمک می‌نماید. بر اساس سه اصل فوق و با توجه به تحلیل‌های دکتر کلانتری از بافت



شکل ۴. بافت تاریخی شهر یزد [۱۷]



شکل ۵. جانمایی نقاط مورد مطالعه در بافت تاریخی شهر یزد (از چپ به راست: مسجد جامع یزد، بقعه دوازده امام، آب انبار شش بادگیر، میدان وقت الساعت)

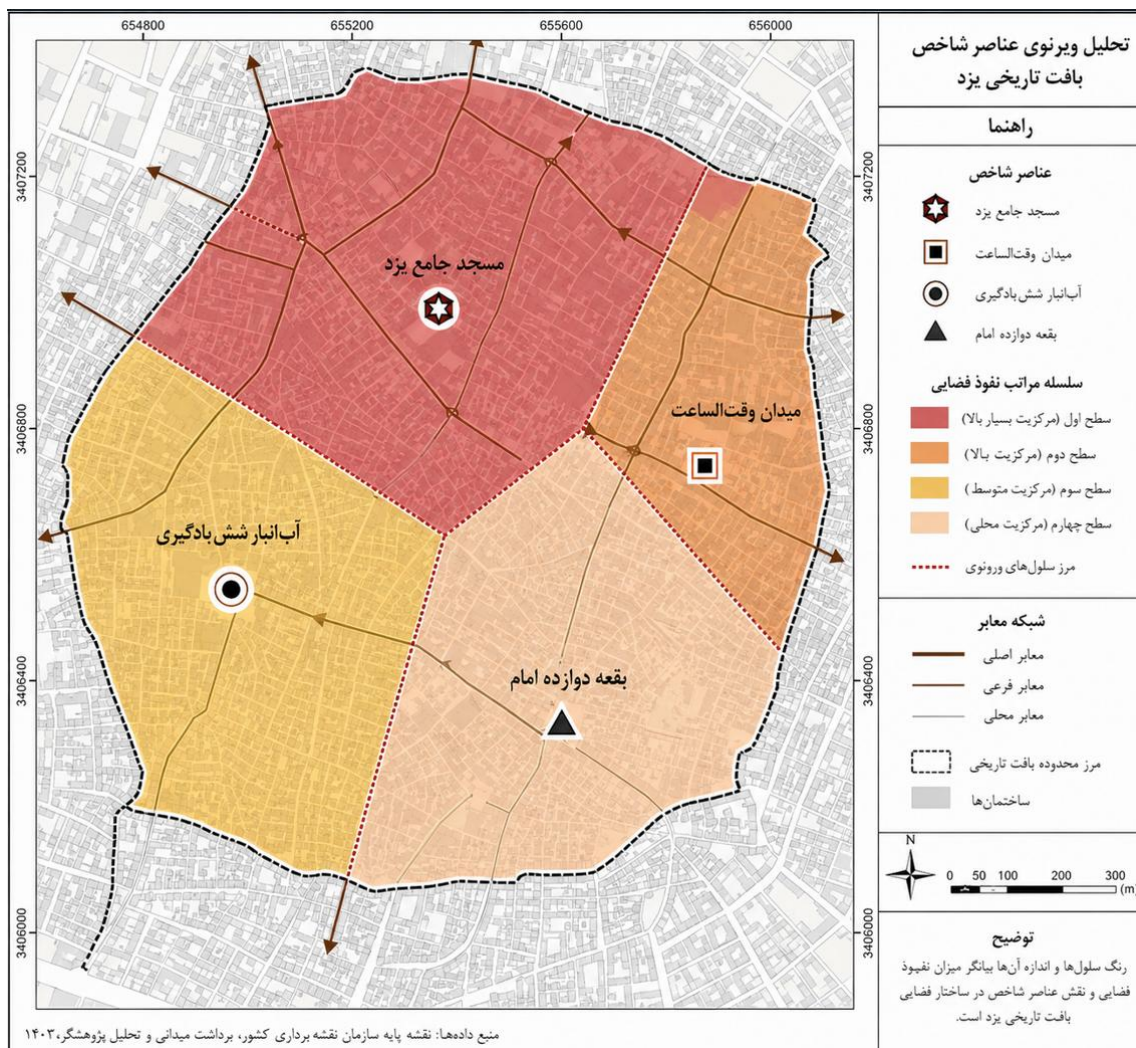
منظر، مدل ورونوی توانسته است فراتر از یک بازنمایی هندسی، منطق درونی سازمان فضایی بافت و نحوه توزیع مرکزیت‌ها در ساختار تاریخی شهر را آشکار سازد.

یافته‌های حاصل از مدل‌سازی هندسه ورونوی در محدوده بافت تاریخی یزد نشان می‌دهد که عناصر شاخص منتخب، هر یک قلمروهای فضایی مشخص و تفکیک‌پذیری را در سازمان فضایی بافت ایجاد کرده‌اند. نتایج اولیه بیانگر آن است که:

برجستگی مرکزیت مسجد جامع یزد
سلول ورونوی مربوط به مسجد جامع، بزرگ‌ترین گستره فضایی را به خود اختصاص داده و الگوی شعاع‌مانند قابل توجهی پیرامون آن شکل گرفته است (مطابق شکل ۶). این موضوع حاکی از نقش تاریخی و عملکردی این عنصر در هدایت شبکه معابر اصلی، پیوندهای محلات مجاور و استقرار فعالیت‌های مذهبی و اجتماعی در مقیاس محله دارد. (شکل ۶)

تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که تفاوت در ابعاد و ساختار سلول‌های ورونوی، صرفاً بیانگر تفاوت‌های هندسی نیست، بلکه بازتابی از سلسله‌مراتب فضایی و سازمان عملکردی بافت تاریخی یزد است. در واقع، هرچه میزان مرکزیت فضایی و نقش عملکردی یک عنصر در ساختار تاریخی شهر بیشتر باشد، قلمرو فضایی آن نیز گسترده‌تر و میزان ارتباط آن با شبکه معابر اصلی و فضاهای عمومی بیشتر خواهد بود. در این میان، مسجد جامع یزد و آب‌انبار شش‌بادگیری به دلیل جایگاه تاریخی، عملکرد مذهبی-اجتماعی و موقعیت فضایی خود، بیشترین سطح نفوذ و پیوند فضایی را در مقیاس کلان بافت تاریخی نشان می‌دهند؛ در حالی که میدان وقت‌الساعت و بقعه دوازده امام بیشتر در مقیاس محله‌ای و خردفضایی عمل می‌کنند.

این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که سازمان فضایی بافت تاریخی یزد مبتنی بر نوعی نظام سلسله‌مراتبی چندلایه است که در آن، عناصر شاخص شهری نقش هسته‌های سازمان‌دهنده قلمروهای فضایی و شبکه‌های حرکتی را بر عهده دارند. از این



شکل ۶. مقایسه سلول ورونوی مسجد جامع یزد با میدان وقت الساعت، بقعه ۱۲ امام و آب انبار شش بادگیر

کاربری های مهم تری از جمله موزه ها و بناهای تاریخی را در اطراف خود دارد. مطابق با شکل شماره ۹، آب انبار شش بادگیر در مقایسه با میدان وقت الساعت سازگاری بیشتری با بافت محله ای خود دارد.

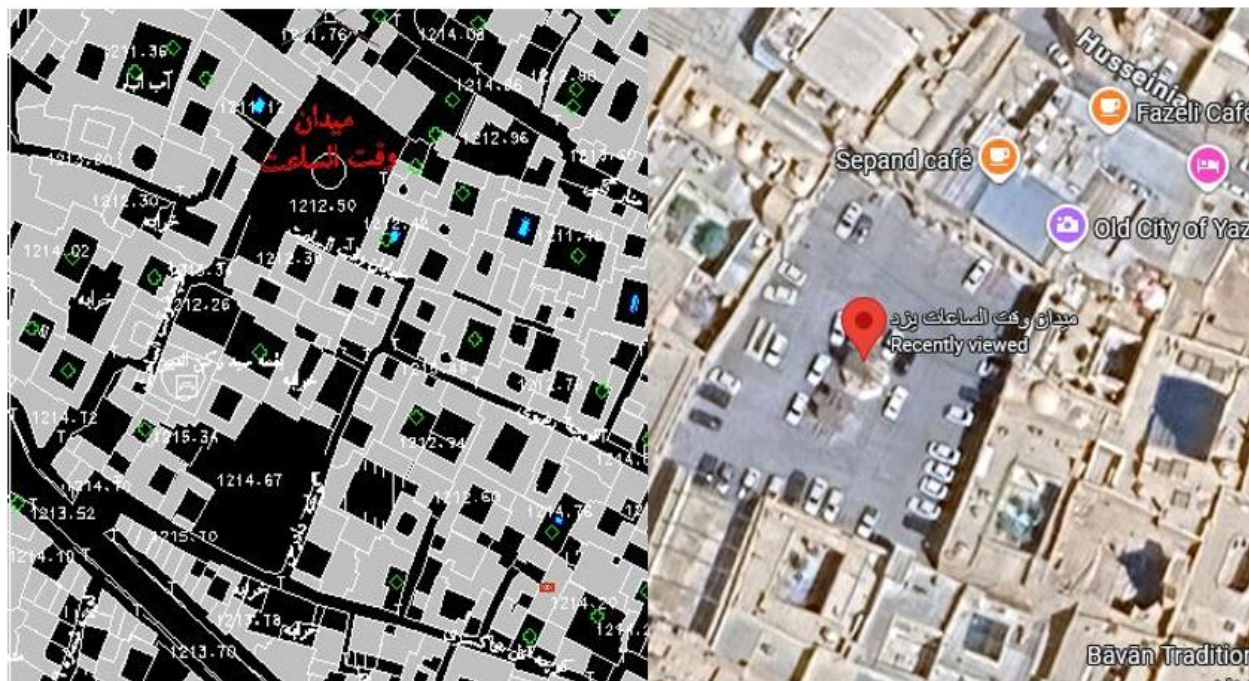
بررسی کیفی الگوهای حضور اجتماعی، نوع فعالیت‌ها و نحوه استفاده از فضاهای پیرامونی عناصر شاخص نشان می‌دهد که ساختار سلول‌های ورونوی ارتباط مستقیمی با عملکرد اجتماعی و نقش فضایی هر عنصر در بافت تاریخی دارد. در پیرامون مسجد جامع یزد و میدان وقت الساعت، به دلیل تمرکز فعالیت‌های مذهبی، گردشگری، تجاری و تعاملات اجتماعی، تراکم بیشتری از جریان‌های حرکتی و حضور انسانی مشاهده می‌شود. این موضوع سبب شده است که

تنوع قلمروهای عملکردی عناصر شاخص

میدان وقت الساعت دارای کوچک‌ترین سلول ورونوی است که عمدتاً با شبکه معابر خردمقیاس و کاربری‌های محله‌ای انطباق دارد. در مقابل، آب انبار شش بادگیری و بقعه دوازده امام قلمروهای منسجم‌تری را نشان می‌دهند که با نظم فضایی نیمه‌محله‌ای سازگار است. این تفاوت‌ها بیانگر نقش‌های سلسله‌مراتبی متفاوت عناصر شاخص در سازمان فضایی بافت است. (شکل ۷) مطابق با شکل شماره ۷، قلمروها و همسایگی های اطراف میدان را مقیاس های خرد محله ای اعم از رستوران ها و کافه ها تشکیل می دهند. مطابق شکل شماره ۸، کاربری ها و قلمروهای اطراف بقعه ۱۲ امام در مقایسه با میدان وقت الساعت انسجام بیشتری با بافت محله دارد و همچنین

دارند و شدت تمرکز فعالیت‌ها در مقایسه با مسجد جامع کمتر است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که قلمروهای ورونوی نه تنها بازتابی از موقعیت هندسی عناصر، بلکه بیانگر شدت عملکرد فضایی، نوع تعاملات اجتماعی و میزان مرکزیت هر عنصر در ساختار تاریخی شهر نیز هستند.

ساختار فضایی این محدوده‌ها از پویایی بیشتری برخوردار بوده و شبکه معابر و فضاهای عمومی در ارتباط مستقیم با عملکرد اجتماعی عناصر شکل گیرند. در مقابل، پیرامون بقعه دوازده امام و آب‌انبار شش‌بادگیری، الگوهای حضور اجتماعی بیشتر ماهیت محله‌ای و روزمره



شکل ۷. نمایش قلمروهای اطراف میدان وقت ساعت



شکل ۸. نمایش قلمروهای اطراف بقعه ۱۲ امام



شکل ۹. نمایش قلمروهای اطراف آب انبار شش بادگیر

تحلیل بصری شبکه حرکتی پیرامون مسجد جامع نشان می‌دهد که بیشترین تراکم و هم‌پیوندی معابر در محدوده قلمرو ورونوی این عنصر شکل گرفته است. تمرکز محورهای حرکتی در پیرامون مسجد جامع، بیانگر نقش این عنصر در هدایت جریان‌های فضایی و سازماندهی ارتباطات در مقیاس کلان بافت تاریخی است. همچنین انطباق مرزهای ورونوی با ساختار گذرهای اصلی نشان می‌دهد که سازمان فضایی بافت تاریخی یزد بر پایه نوعی منطق دسترسی و مرکزیت فضایی شکل گرفته و شبکه معابر تاریخی در تعامل مستقیم با قلمرو نفوذ عناصر شاخص توسعه یافته است.

بررسی تطبیقی میان مرز سلول‌های ورونوی و ساختار شبکه معابر تاریخی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از گذرهای اصلی و مسیرهای ارتباطی بافت تاریخی یزد در امتداد محورهای فضایی میان عناصر شاخص شکل گرفته‌اند. محور مسجد جامع-فهادان، گذرهای منتهی به میدان وقت‌الساعت و مسیرهای مرتبط با آب‌انبار شش‌بادگیری، بیشترین میزان انطباق را با مرزهای فضایی سلول‌های ورونوی دارند. این هم‌پوشانی فضایی بیانگر آن است که ساختار حرکتی و سازمان کالبدی بافت تاریخی یزد نه بر اساس رشد کاملاً تصادفی، بلکه مبتنی بر نوعی منطق فضایی و نظام فاصله-نزدیکی میان عناصر شاخص شکل گرفته است.

همچنین مشاهده می‌شود که فضاها پیرامون عناصر دارای مرکزیت بالاتر، واجد تنوع بیشتری از کاربری‌ها، تراکم بیشتر گره‌های حرکتی و حضور فعال‌تر فضاها عمومی هستند؛ در حالی که در محدوده عناصر محله‌ای، ساختار فضایی بیشتر بر سکون، همجواری و روابط اجتماعی خردمقیاس استوار است. این امر نشان می‌دهد که میان سازمان فضایی، رفتار اجتماعی و ساختار عملکردی بافت تاریخی یزد نوعی همبستگی درونی وجود دارد که مدل ورونوی توانسته است آن را به صورت فضایی و تحلیلی آشکار سازد.

۳-۴. هم‌خوانی مرزهای هندسی با مرزهای واقعی بافت
تطبیق مرزهای سلول‌های ورونوی با مسیرهای حرکتی اصلی نظیر محور مسجد جامع، گذر فهادان و محور دولت‌آباد نشان داد که شکل‌گیری شبکه معابر تاریخی با منطق فاصله-نزدیکی عناصر شاخص همخوانی دارد (شکل شماره ۱۰). این امر گواه وجود نظمی درونی در بافت است که در ظاهر ارگانیک آن پنهان مانده است. در شکل ۱۰، شدت و ضخامت خطوط بیانگر سلسله‌مراتب شبکه حرکتی بوده و فلش‌های جهت‌دار، تمرکز جریان‌های فضایی به سوی هسته مرکزی را نشان می‌دهند. هم‌پوشانی قلمرو ورونوی با محورهای اصلی حرکت، نقش مسجد جامع را به عنوان هسته سازمان‌دهنده ساختار فضایی بافت تاریخی آشکار می‌سازد.



شکل ۱۰. تحلیل تطبیقی قلمرو و رونوی مسجد جامع یزد با شبکه معابر و محورهای حرکتی هسته تاریخی شهر

فراهم می‌کرده‌اند. این مسئله مؤید آن است که شبکه معابر تاریخی یزد واجد نوعی عقلانیت فضایی درونی بوده و بر پایه روابط عملکردی، دسترسی تدریجی و مرکزیت عناصر شاخص سازمان یافته است. از این منظر، مدل ورونوی توانسته است منطق پنهان ساختار حرکتی بافت تاریخی را آشکار ساخته و پیوند میان فرم کالبدی و سازمان فضایی شهر را به صورت ملموس نشان دهد.

تطبیق الگوی ورونوی با روند تاریخی شکل‌گیری بافت
تحلیل تطبیقی میان الگوی سلول‌های ورونوی و روند تاریخی

در واقع، عناصر شاخص تاریخی از طریق ایجاد قلمروهای نفوذ فضایی، در هدایت و سازماندهی شبکه حرکتی و نحوه توزیع فعالیت‌ها نقش بنیادین داشته‌اند. این موضوع به‌ویژه در پیرامون مسجد جامع یزد قابل مشاهده است؛ جایی که تراکم معابر اصلی، گره‌های حرکتی و فضاهای عمومی در مقایسه با سایر بخش‌های بافت بیشتر بوده و نوعی تمرکز فضایی و عملکردی را پدید آورده است.

همچنین بررسی ساختار فضایی معابر نشان می‌دهد که گذرهای اصلی بافت عمدتاً در نقاطی شکل گرفته‌اند که بیشترین میزان دسترسی و ارتباط میان سلول‌های فضایی را

گره‌های مکمل را در سطح محله‌ای شکل می‌دهند. (شکل ۱۱)

مطابق با شکل شماره ۱۱، مسجد جامع و انبار شش بادگیر، نقش بیشتری در ساماندهی معابر و گذر‌هایی اطراف به عنوان سلول مرکزی در مقایسه با بقعه ۱۲ امام و میدان وقت ساعت دارند. در جدول شماره ۲، تحلیلی تطبیقی نمونه‌های موردی قابل مشاهده است.

آشکارسازی منطق پنهان سازمان فضایی

نتایج نشان می‌دهد که با وجود تراکم و پیچیدگی کالبدی بافت تاریخی یزد، سلول‌های ورونوی الگوی پنهانی از نظم عملکردی و کالبدی را نمایان می‌کنند. مطابق شکل شماره ۱۲، بافت به‌ظاهر ارگانیک، در لایه‌های زیرین خود، نظمی بر مبنای مرکزیت عناصر شاخص و قلمروهای طبیعی آن‌ها دارد.

در شکل ۱۲، بافت تاریخی یزد و مرزهای ورونوی نشان داده شده است. سلول‌های ورونوی الگویی از نظم پنهان را نمایان می‌کنند؛ نظمی که از مرکزیت عناصر شاخص نشأت گرفته است و نقاط نقش مهمی را در ساماندهی کاربری‌های اطراف دارند. (شکل ۱۲)

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های حاصل از تحلیل مورفولوژیک بافت تاریخی شهر یزد با استفاده از مدل هندسه ورونوی، امکان بازخوانی عمیق‌تری از ساختار فضایی این بافت را فراهم آورده است. بر اساس نتایج پژوهش، سلول‌های ورونوی تولیدشده پیرامون عناصر شاخص منتخب، به‌ویژه مسجد جامع یزد، گستره فضایی وسیع‌تری نسبت به سایر عناصر را دربر می‌گیرند. این امر نشان‌دهنده نقش محوری مسجد جامع به‌عنوان هسته ساختاری و سازمان‌دهنده اصلی شبکه معابر، فعالیت‌ها و روابط فضایی در مقیاس کل بافت تاریخی است. چنین یافته‌ای با نظریات مطرح‌شده در مورفولوژی شهری، به‌ویژه در مکتب ایتالیایی که در پیشینه آمده و رویکردهای مبتنی بر مرکزیت عناصر شاخص، همخوانی کامل دارد؛ جایی که عناصر مذهبی و عمومی به‌عنوان نقاط ثقل سازمان فضایی شهرهای تاریخی عمل می‌کنند. در مقابل، میدان وقت ساعت و بقعه دوازده امام با سلول‌های کوچک‌تر و قلمروهای محدودتر، نقش گره‌های مکمل را در سطح محله‌ای ایفا می‌کنند.

شکل‌گیری بافت تاریخی یزد نشان می‌دهد که توسعه فضایی شهر در طول زمان، ارتباط مستقیمی با موقعیت و نقش عناصر شاخص مذهبی، خدماتی و اجتماعی داشته است. بررسی نقشه‌های تاریخی و ساختار کنونی بافت نشان می‌دهد که هسته‌های اولیه استقرار شهری عمدتاً پیرامون عناصر مرکزی نظیر مسجد جامع، بازار و فضاهای خدماتی شکل گرفته و به‌تدریج محلات جدید در امتداد محورهای ارتباطی میان این عناصر توسعه یافته‌اند.

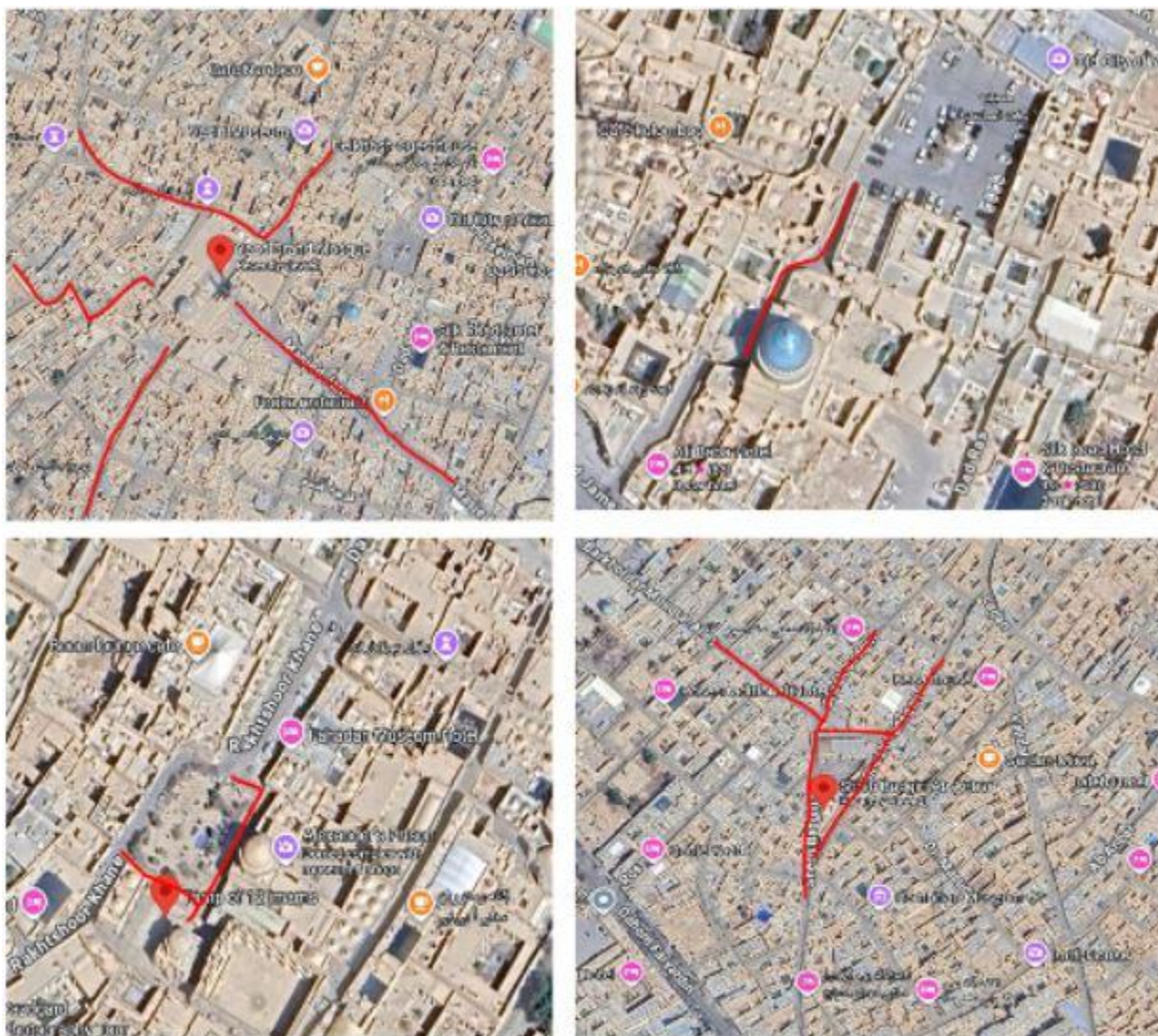
در این میان، مسجد جامع یزد به‌عنوان مهم‌ترین عنصر مذهبی-اجتماعی شهر، نقشی فراتر از یک بنای مذهبی داشته و به‌عنوان هسته مرکزی سازمان فضایی بافت تاریخی عمل کرده است. گستردگی سلول ورونوی این عنصر و ارتباط آن با مهم‌ترین محورهای حرکتی شهر، بیانگر نقش تاریخی مسجد جامع در ساماندهی روابط فضایی، تمرکز فعالیت‌ها و هدایت توسعه کالبدی بافت است. همچنین آب‌انبار شش‌بادگیری و میدان وقت ساعت نیز در مقیاس محله‌ای و میان‌محله‌ای، نقش عناصر پشتیبان و تقویت‌کننده ساختار فضایی را ایفا کرده‌اند.

مطالعه روند توسعه تاریخی بافت نشان می‌دهد که شکل‌گیری محلات و شبکه معابر، به‌صورت تدریجی و در تعامل با قلمرو نفوذ عناصر شاخص صورت گرفته است؛ به‌گونه‌ای که هر عنصر، محدوده‌ای از فعالیت‌ها، دسترسی‌ها و روابط اجتماعی را در پیرامون خود سازمان داده است. این امر بیانگر آن است که الگوی ورونوی صرفاً بازنمایی وضعیت موجود نیست، بلکه توانایی تبیین منطق تاریخی شکل‌گیری و تحول ساختار فضایی شهر را نیز داراست.

از منظر مورفولوژیک، این یافته‌ها نشان می‌دهد که ساختار به‌ظاهر ارگانیک بافت تاریخی یزد در واقع واجد نظمی درونی و سلسله‌مراتبی است که بر پایه مرکزیت فضایی، روابط عملکردی و منطق فاصله-نزدیکی میان عناصر شاخص شکل گرفته است.

سلسله‌مراتب فضایی معابر و گره‌های شهری

تحلیل گره‌های ورونوی نشان داد که مسجد جامع و آب‌انبار شش‌بادگیر بیشترین نقش را در ایجاد گره‌های حرکتی بر عهده دارند؛ در حالی که میدان وقت ساعت و بقعه دوازده امام



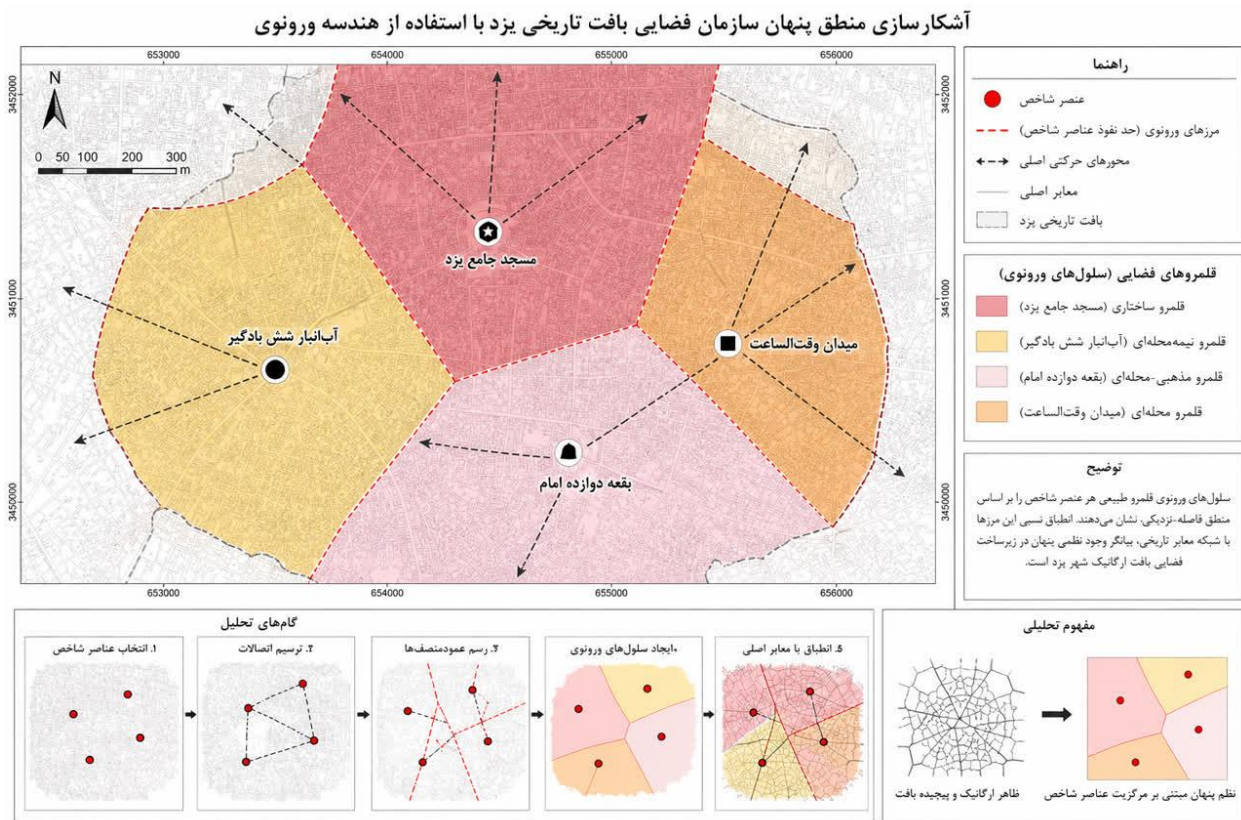
شکل ۱۱. مقایسه معابر و گره های اطراف مورد های مطالعه از راست بالا: میدان وقت الساعت، مسجد جامع، آب انبار شش بادگیر، بقعه ۱۲ امام

جدول ۲. تحلیل تطبیقی چهار مورد مطالعه

عناصر شاخص	وسعت نسبی سلول ورونوی	میزان ارتباط با معابر اصلی	مقیاس عملکردی	نقش فضایی
مسجد جامع یزد	بسیار گسترده	بسیار زیاد	فرامحله‌ای	هسته مرکزی سازمان فضایی
آب‌انبار شش‌بادگیری	گسترده	زیاد	محله‌ای-میانی	گره خدماتی و حرکتی
میدان وقت‌الساعت	محدود	متوسط	خردمحله‌ای	فضای تعامل اجتماعی
بقعه دوازده امام	متوسط	متوسط	محله‌ای	هسته فرهنگی-تاریخی

دولت‌آباد نشان می‌دهد که شبکه معابر تاریخی یزد نه به صورت تصادفی، بلکه بر اساس منطق فاصله-نزدیکی به عناصر شاخص شکل گرفته است. این هم‌خوانی میان مرزهای هندسی و ساختار واقعی بافت، مؤید وجود نظمی پنهان در دل بافتی است که در ظاهر ارگانیک و پیچیده به نظر می‌رسد. به بیان دیگر، ارگانیک بودن فرم بافت تاریخی یزد به معنای

سطح نخست، سطح ساختاری در مقیاس کل بافت که توسط مسجد جامع و آب‌انبار شش‌بادگیری هدایت می‌شود، و سطح دوم، سطح محله‌ای در مقیاس خرد که عناصر محلی‌تر نظیر میدان وقت‌الساعت و بقعه دوازده امام آن را سامان می‌دهند. از سوی دیگر، تطبیق مرزهای سلول‌های ورونوی با مسیرهای حرکتی اصلی نظیر گذر فهادان، محور مسجد جامع و محور



شکل ۱۲. نمایش نقاط مورد مطالعه و تطبیق آن با بافت ارگانیک تاریخی شهر یزد

تحلیل تطبیقی میان سلول‌های ورونوی، شبکه معابر تاریخی، الگوهای عملکردی و رفتارهای اجتماعی در بافت تاریخی یزد نشان می‌دهد که سازمان فضایی این بافت واجد نوعی انسجام چندلایه و نظام‌مند است که در آن ساختار کالبدی، جریان‌های حرکتی، قلمروهای عملکردی و تعاملات اجتماعی به‌صورت هم‌زمان و در ارتباط با یکدیگر عمل می‌کنند. در واقع، سلسله‌مراتب فضایی موجود در بافت نه‌تنها در مقیاس کالبدی و هندسی، بلکه در نحوه توزیع فعالیت‌ها، شدت حضور اجتماعی، تمرکز خدمات و سازماندهی فضاهای عمومی نیز قابل مشاهده است.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که عناصر شاخص تاریخی، به‌ویژه مسجد جامع یزد، صرفاً به‌عنوان بناهای منفرد عمل نکرده‌اند، بلکه در طول زمان به‌مثابه هسته‌های مولد سازمان فضایی، نقش بنیادینی در شکل‌گیری ساختار حرکتی، شبکه ارتباطی و تمرکز فعالیت‌های شهری ایفا کرده‌اند. همچنین تطبیق الگوی ورونوی با شبکه معابر و روند تاریخی توسعه شهر، نشان داد که ساختار بافت تاریخی یزد بر پایه نوعی منطق فضایی مبتنی بر مرکزیت، دسترسی و فاصله-نزدیکی شکل گرفته

فقدان نظم نیست، بلکه بیانگر نوعی نظم درونی مبتنی بر مرکزیت، عملکرد و قلمروهای نفوذ عناصر شاخص است. تحلیل گره‌های ورونوی نیز نشان داد که شدت تمرکز گره‌های حرکتی در پیرامون مسجد جامع و آب‌انبار شش‌بادگیری بیشتر است. این امر نقش این عناصر را به‌عنوان گره‌های حرکتی سطح بالا و نقاط جذب‌کننده جریان‌های حرکتی تأیید می‌کند. در مقابل، میدان وقت‌الساعت و بقعه دوازده امام عمده‌تاً در مقیاس محله‌ای عمل کرده و جریان‌های خردتر حرکتی را سامان می‌دهند.

چنین ساختاری، بیانگر هم‌زیستی دو نظام حرکتی کلان و خرد در بافت تاریخی یزد است که از طریق یک منطق فضایی منسجم به یکدیگر پیوند خورده‌اند. در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که مدل هندسه ورونوی توانسته است لایه‌های از سازمان فضایی بافت تاریخی یزد را آشکار سازد که در تحلیل‌های صرفاً توصیفی یا کالبدی کمتر قابل شناسایی است. این مدل با بازنمایی روابط فاصله‌ای، قلمروهای نفوذ و سلسله‌مراتب فضایی، ابزاری مؤثر برای تبیین ساختار درونی بافت‌های تاریخی به شمار می‌رود.

شکل‌گیری بافت تاریخی یزد را تبیین کند و به‌عنوان مبنایی برای تحلیل، حفاظت و برنامه‌ریزی این بافت ارزشمند مورد استفاده قرار گیرد.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدل هندسه ورونوی می‌تواند فراتر از یک ابزار صرفاً تحلیلی، به‌عنوان بستری کاربردی برای برنامه‌ریزی فضایی، حفاظت ساختاری و مدیریت تحولات بافت‌های تاریخی مورد استفاده قرار گیرد. شناسایی قلمروهای فضایی عناصر شاخص و تعیین میزان نفوذ و مرکزیت آن‌ها، این امکان را فراهم می‌سازد که برنامه‌ریزان شهری بتوانند حساس‌ترین بخش‌های بافت تاریخی را از منظر عملکرد فضایی، تمرکز حرکتی و پیوندهای اجتماعی شناسایی کنند. در این چارچوب، عناصر دارای مرکزیت بالاتر نظیر مسجد جامع یزد و محورهای مرتبط با آن، باید به‌عنوان هسته‌های راهبردی در سیاست‌های حفاظت، احیا و ساماندهی فضایی مورد توجه قرار گیرند؛ زیرا هرگونه مداخله نامتوازن در این محدوده‌ها می‌تواند ساختار ارتباطی و انسجام فضایی کل بافت تاریخی را تحت تأثیر قرار دهد.

همچنین تحلیل قلمروهای ورونوی نشان می‌دهد که حفاظت از بافت تاریخی نباید صرفاً محدود به حفاظت کالبدی بناهای منفرد باشد، بلکه لازم است روابط فضایی، شبکه معابر، توالی حرکتی و پیوند میان عناصر شاخص نیز به‌عنوان بخشی از میراث ساختاری شهر مورد حفاظت قرار گیرد. از این منظر، مدل ورونوی می‌تواند در تعیین حریم‌های عملکردی، اولویت‌بندی مداخلات شهری، کنترل تغییرات کالبدی و هدایت پروژه‌های بازآفرینی شهری مورد استفاده قرار گیرد. نتایج پژوهش همچنین نشان می‌دهد که عناصر شاخص تاریخی صرفاً واجد نقش کالبدی نیستند، بلکه به‌عنوان کانون‌های تعامل اجتماعی، حافظه جمعی و هویت فضایی شهر عمل می‌کنند. تمرکز جریان‌های حرکتی و فعالیت‌های اجتماعی در پیرامون مسجد جامع، میدان وقت‌الساعت و سایر عناصر شاخص، بیانگر آن است که سازمان فضایی بافت تاریخی یزد ارتباط مستقیمی با حیات اجتماعی و الگوهای تعامل شهری دارد. بنابراین تقویت پیوندهای فضایی میان این عناصر، می‌تواند به افزایش پویایی اجتماعی، ارتقای کیفیت فضاهای عمومی و تقویت حس تعلق مکانی در بافت تاریخی منجر شود.

است؛ منطقی که در ظاهر ارگانیک و پیچیده بافت به‌سادگی قابل تشخیص نیست.

از این منظر، مدل هندسه ورونوی توانسته است لایه‌ای عمیق‌تر از نظم فضایی و روابط درونی بافت تاریخی را آشکار سازد؛ لایه‌ای که در تحلیل‌های صرفاً کالبدی یا توصیفی کمتر قابل شناسایی است. بنابراین، این مدل را می‌توان ابزاری مؤثر برای تحلیل هم‌زمان ساختار کالبدی، نظام حرکتی، سازمان عملکردی و الگوهای اجتماعی در بافت‌های تاریخی دانست؛ ابزاری که علاوه بر ارزش تحلیلی، می‌تواند در برنامه‌ریزی شهری، حفاظت بافت تاریخی و مدیریت تحول فضایی شهرهای تاریخی نیز کاربرد داشته باشد.

خلاصه نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پژوهش حاضر با هدف تحلیل مورفولوژیک بافت تاریخی شهر یزد با بهره‌گیری از مدل هندسه ورونوی انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که ساختار فضایی این بافت، برخلاف ظاهر ارگانیک و پیچیده آن، از نظمی درونی و قابل شناسایی برخوردار است که ریشه در مرکزیت عناصر شاخص و قلمروهای فضایی آن‌ها دارد. تحلیل سلول‌های ورونوی بیانگر آن است که مسجد جامع یزد و آب‌انبار شش‌بادگیری به‌عنوان عناصر ساختاری، بیشترین تأثیر را بر سازمان فضایی، شبکه معابر و گره‌های حرکتی در مقیاس کل بافت دارند. در مقابل، میدان وقت‌الساعت و بقعه دوازده امام نقش گره‌های مکمل را در مقیاس محله‌ای ایفا می‌کنند. این یافته‌ها وجود یک سلسله‌مراتب فضایی دوسطحی را در بافت تاریخی یزد تأیید می‌کند که در آن سطوح کلان و خرد فضایی به‌صورت هماهنگ و پیوسته عمل می‌کنند. همچنین، انطباق مرزهای هندسی ورونوی با مسیرهای حرکتی و ساختار واقعی بافت نشان داد که الگوی شکل‌گیری شبکه معابر تاریخی مبتنی بر منطق فاصله-نزديکی و روابط عملکردی عناصر شاخص بوده است. بدین ترتیب، مدل هندسه ورونوی توانست به‌عنوان ابزاری تحلیلی، نظم پنهان و روابط بنیادین سازمان فضایی بافت تاریخی یزد را به‌صورت علمی و قابل سنجش آشکار سازد. در نهایت، پاسخ به پرسش اصلی پژوهش نشان می‌دهد که مدل هندسه ورونوی قادر است با دقت و عمق بیشتری نسبت به روش‌های سنتی، ساختار فضایی و الگوهای

ج) از تحلیل‌های مبتنی بر هندسه ورونوی و مدل‌های تحلیل فضایی در شناسایی گره‌های بحرانی، ارزیابی میزان دسترسی و تعیین اولویت‌های مداخله شهری استفاده شود.

د) به منظور تقویت حیات اجتماعی بافت تاریخی، پیوندهای فضایی میان فضاهای عمومی، عناصر مذهبی-فرهنگی و شبکه معابر تاریخی تقویت گردد و از گسست فضایی ناشی از مداخلات جدید جلوگیری شود.

د) در طرح‌های توسعه و نوسازی شهری، منطق تاریخی سازمان فضایی بافت و سلسله‌مراتب حرکتی آن حفظ شده و از مداخلات ناسازگار با ساختار فضایی تاریخی اجتناب گردد.

ه) پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، مدل هندسه ورونوی با سایر روش‌های تحلیل فضایی و تحلیل شبکه شهری تلفیق شود تا امکان تحلیل چندلایه ساختار فضایی و اجتماعی بافت‌های تاریخی فراهم گردد.

در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مدل هندسه ورونوی نه تنها ابزاری برای خوانش هندسی فرم شهر، بلکه روشی مؤثر برای فهم روابط پیچیده میان ساختار فضایی، نظام حرکتی، عملکرد اجتماعی و سازمان تاریخی شهرهای سنتی ایران است؛ موضوعی که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر در حوزه حفاظت، بازآفرینی و برنامه‌ریزی بافت‌های تاریخی قرار گیرد.

در این راستا، بازآفرینی مسیرهای تاریخی، تقویت پیاده‌راه‌های ارتباطی میان عناصر شاخص، کاهش مداخلات ناسازگار کالبدی و حفظ تداوم فضایی معابر تاریخی، از جمله راهبردهایی است که می‌تواند به حفظ انسجام فضایی و اجتماعی بافت کمک کند. همچنین بهره‌گیری از تحلیل‌های فضایی مبتنی بر مدل ورونوی در طرح‌های توسعه شهری، این امکان را فراهم می‌آورد که فرآیند تصمیم‌گیری شهری بر پایه شناخت دقیق‌تر از ساختار درونی و منطق فضایی بافت تاریخی انجام گیرد و از مداخلات گسسته و مخرب جلوگیری شود.

پیشنهاد‌های کاربردی

بر اساس نتایج پژوهش حاضر، پیشنهاد‌های زیر برای برنامه‌ریزی، حفاظت و مدیریت بافت تاریخی یزد ارائه می‌شود:

الف) در تهیه طرح‌های حفاظت و بازآفرینی بافت تاریخی، علاوه بر بناهای شاخص، شبکه ارتباطی و قلمروهای فضایی پیرامون آن‌ها نیز به‌عنوان بخشی از ساختار تاریخی شهر مورد توجه قرار گیرد.

ب) محورهای حرکتی منتهی به مسجد جامع یزد، میدان وقت‌الساعت و سایر عناصر مرکزی، به‌عنوان ستون فقرات فضایی بافت تاریخی، در اولویت ساماندهی، بهسازی و تقویت کیفیت محیطی قرار گیرند.

تشکر و قدردانی: موردی وجود ندارد.

تاییدیه های اخلاقی: موردی وجود ندارد.

تعارض منافع: موردی وجود ندارد.

سهم نویسندگان مقاله: حسین کلانتری: مشارکت در تدوین محتوا و بازبینی نتایج، روش شناسی و انجام اصلاحات، سهم مشارکت ۵۰ درصد، علی خالقی بابائی: تدوین مقاله، مشارکت در تفسیر و بازبینی، سهم مشارکت: ۳۰ درصد، شقایق ناصرترابی: تدوین منابع و تصاویر، مشارکت در بازبینی: سهم مشارکت: ۲۰ درصد منابع مالی: موردی وجود ندارد.

References

- [1]. Kaba A. Explaining Africa's rapid population growth, 1950 to 2020: trends, factors, implications, and recommendations. *Sociology Mind*. 2020;10:226–268. <https://doi.org/10.4236/sm.2020.104015>
- [2]. Kalantari Khalilabad H. Structural analysis of historical fabrics with an emphasis on morphological foundations. *Journal of Urban Studies*. 2018;12(3):47–65. [Persian].
- [3]. Pourmohammadi MR, et al. Foundations of urban morphology. Tabriz: University of Tabriz Publications; 2011. [Persian]. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161283_6315be8fc648a7edaa4a079dbde0ecab.pdf
- [4]. Kalantari Khalilabad H. Spatial-physical analysis of key elements in the historical fabric of Yazd. *Journal of Urban Arts and Architecture*. 2015;(12):47–65. [Persian].
- [5]. Kalantari Khalilabad H. Principles of applying geometric models in the analysis of historical fabrics. Yazd Urban Studies Center; 2016. [Persian].
- [6]. Bagheri B, Majedi H, Habib F. Analyzing the role of structural morphological characteristics in urban physical development using the space syntax method. *Geographic Space*. 2020;20(72):1–18. [Persian]. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-1066-fa.html>
- [7]. Pourmohammadi MR, Sadr Mousavi MS, Jamali S. An analysis of urban morphology schools. *Journal of Geography and Territorial Spatial Planning*. 2011;2(5). [Persian]. <https://civilica.com/doc/794800>
- [8]. Hillier B, Hanson J. *The social logic of space*. Cambridge: Cambridge University Press; 1984. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511597237>
- [9]. Iranmanesh N, Pourjafar MR, Ziyari K, Khatibi MR. Urban morphology knowledge and its application in reading urban fabric (case study: Qazvin). *Scientific-Research Quarterly of Environment Planning*. 2023;(61). [Persian]. <https://sanad.iau.ir/fa/Article/988207?FullText=FullText>
- [10]. Abedini A, Khojasteh Maghal F, Koorehpaz-Saied H, Asgari F. The impacts of urban morphology on thermal comfort: Urmia case study. *Urban Science* (Danesh-e-Shahrsazi). 2024;8(2):61–82. <https://doi.org/10.22124/upk.2024.25907.1899>
- [11]. Goharian A, Daneshjoo Kh, Mahdaveinejad M, Yeganeh M. Voronoi geometry for building facade to manage direct sunbeams. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2022;31. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.31.2.30800>
- [12]. Çelik T. Architectural design method suggestion with machine learning technologies based on Voronoi diagram principle. *Periodica Polytechnica Architecture*. 2023;54. <https://doi.org/10.3311/PPar.21643>
- [13]. Bahraminejad F, Babaki K. Application of Voronoi diagrams as a tool for architectural and urban design. In: *International Conference on Engineering, Art, and Environment*. 2014. [Persian]. <https://civilica.com/doc/372666/>
- [14]. Negm R. The concept of Voronoi diagram and its impact on the formation of scenic design. *International Design Journal*. 2021;11. <https://doi.org/10.21608/idj.2021.152352>
- [15]. Batty M. *The new science of cities*. Cambridge (MA): MIT Press; 2013. <https://doi.org/10.1257/jel.52.3.805>
- [16]. Porta S, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets: a dual approach. *Physica A*. 2006;369(2):853–866. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.12.063>
- [17]. Hakim BS. *Arabic-Islamic cities: building and planning principles*. London: Kegan Paul International; 1986. <https://www.jstor.org/stable/23063716>
- [18]. Kalantari Khalilabad H. Spatial-physical analysis of key elements in the historical fabric of Yazd. *Journal of Urban Art and Architecture*. 2015;12:47–65. [Persian].
- [19]. Samadi A, Arbabi Sabzevari A, Joudaki H, Amirazodi T, Adibi Saadinejad F. Reading the key drivers affecting urban poverty reduction in historical fabrics. *Future City Visions*. 2024;5(3):99–115. [Persian]. <http://jvfc.ir/article-1-260-fa.html>
- [20]. Pourahmad A, Kalantari Khalilabad H. Techniques and experiences of urban historical fabric restoration planning. Tehran: Jihad-e-Daneshgahi

- Publications; 2005. [Persian].
<https://ketab.ir/book/04d69f1f-bb5d-489e-bca5-b8e78f0cd98d>
- [21]. Kalantari Khalilabad H, Derakhshani N. Sustainable physical-social strategies in historical neighborhoods (Oudlajan case). *Urban Studies Quarterly*. 2014;3(10). [Persian].
https://urbstudies.uok.ac.ir/article_8762.html
- [22]. Saraei MH, Alian M. Measurement and evaluation of neighborhood sustainability in the historical fabric of Yazd. *Spatial Planning and Geomatics*. 2015;19(1):79-108. [Persian].
<https://www.magiran.com/p1423810>
- [23]. Khalilabad H, Pourahmad A. Management and planning for the revitalization of the historical district of Yazd. *Geographical Research Quarterly*. 2005;(54):77-92. [Persian].
https://journals.ut.ac.ir/article_17771.html
- [24]. Kalantari Khalilabad H, et al. Investigating the role of social capital in reducing earthquake risk in Yazd historical fabric. *Journal of Iranian Urban Studies*. 2012;(9). [Persian].
<https://profile.acecr.ac.ir/kalantari/fa/articlesInPublications/225>
- [25]. Ardalan N, Bakhtiar L. *The sense of unity: the Sufi tradition in Persian architecture*. Chicago: University of Chicago Press; 1973.
<https://books.google.com/books?id=g7A3jwEACAAJ>
- [26]. Kalantari Khalilabad H, Hataminejad H. Planning for the restoration of the historic fabric of Yazd. Tehran: Faragostar Publications; 2005. [Persian].
<https://lib.ui.ac.ir/dl/search/default.aspx?Term=84142&Field=0&DTC=1>

