دوقلوی دیجیتال؛ گامی نوین به سمت هوشمندسازی شهر در زمینهٔ برنامه‌ریزی، طراحی، و مدیریت شهری

نمونهٔ موردی: محلهٔ نارمک شهر تهران[1]

فرشاد شریعت‌پور[2]

مصطفی بهزادفر[3]

استاد دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران

دریافت: ۲۲ خرداد ۱۴۰۰
پذیرش: ۲۵ بهمن ۱۴۰۰
(صفحهٔ ۱۰۶- ۹۳)

کلیدواژگان: مدل‌سازی رویه‌ای، مدل‌سازی سه‌بعدی شهری، دوقلوی دیجیتال، سیتی‌انجین، تهران هوشمند.

چکیده

شهر تهران در سال‌های آینده، با توجه به رشد جمعیت و پیچیدگی‌های روزافزون، با چالش‌های گوناگون روبه‌رو خواهد شد، بنابراین وظایف مدیریت شهری پیچیده‌تر می‌شود. اغلب ابزارها و روش‌های موجود در زمینهٔ شهرسازی مبتنی بر رویکردهای ایستا هستند و تعداد محدودی از ذی‌نفعان را در تصمیم‌گیری‌های مربوطه درگیر می‌کنند. در همین خصوص یکی از اصلی‌ترین ملزومات رسیدن به شهر هوشمند در اختیار داشتن یک مدل دیجیتالی از شهر است که در دنیا تحت عنوان «دوقلوی دیجیتال» تعریف شده است. تغییروتحول دیجیتال باعث روشن‌تر و قابل‌فهم‌تر شدن بخش‌های بیشتری از روند برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری، و طراحی برای عموم مردم می‌شود. یک رویکرد مهم برای این تغییروتحولاتْ دوقلوی دیجیتال شهر تهران است. در همین راستا، هدف اصلی این مقاله معرفی و طرح کردن مفهوم دوقلوی دیجیتال به‌مثابهٔ یک ضرورت در عصر شهرهای هوشمند و همچنین دستیابی به نحوهٔ پیاده‌سازی این مفهوم در شهر تهران است.

ابزار اصلی روش تحقیق این مقاله نرم‌افزار سیتی‌انجین است. در این پژوهش بخشی از شهر تهران به یک مدل دیجیتالی تبدیل شده که با مفهوم دوقلوی دیجیتال همسوست. برای رسیدن به این مهم، از الگوریتم‌های مدل‌سازی رویه‌ای در محیط نرم‌افزار سیتی‌انجین استفاده شده است. در ابتدا، برای تولید دوقلوی دیجیتال تهران یک دیتابیس از داده‌های توصیفی جمع‌آوری شده است. سپس این داده‌های توصیفی با برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار سیتی‌انجین مدل‌سازی شده‌اند. این دوقلوی دیجیتال تهران با سطح جزئیات مختلف، در سطح برنامه‌ریزی شهری، طراحی شهری و مدیریت شهری به‌صورت کُد هوشمند برنامه‌نویسی شده است که، با اعمال هر تغییری در داده‌های وضع موجود، مدل‌ها و گزارش‌های موجود از سطح شهر به‌صورت بلادرنگ تغییر خواهد کرد و با داده‌های جدید به‌روز خواهد شد.

مقدمه

در طول دو تا سه دههٔ گذشته، درنتیجهٔ شهرنشینی، عناصر شهری ازجمله ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها پیچیده‌تر شده‌اند. این پیچیدگی منجر به اتخاذ فناوری‌های قوی‌تر مانند استفاده از گرافیک سه‌بعدی برای پیش‌بینی تأثیرات فعلی و آتی توسعهٔ شهری شده‌است. به همین دلیل، طراحان و برنامه‌ریزهای شهری باید چارچوب‌هایی

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد نگارندهٔ اول است با عنوان *فناوری طراحی باهمستان هوشمند با تکیه بر الگوریتم مدل‌سازی رویه‌گرا با استفاده از نرم‌افزار CityEngine* که به راهنمایی نگارندهٔ دوم و دکتر مهشید قربانیان در تاریخ تیرماه سال ۱۳۹۸ در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران دفاع شده است.

۲. نویسندهٔ مسئول، پژوهشگر دکتری شهرسازی دانشگاه هنر تهران
Farshad_shariatpour@alumni.iust.ac.ir
3. behzadfar@iust.ac.ir

پرسش‌های تحقیق

۱. کپی دیجیتالی از شهر چیست؟

۲. این کپی دیجیتالی از شهر چه دستاوردهایی در برنامه‌ریزی، طراحی، و مدیریت شهری به‌همراه دارد؟

انعطاف‌پذیر برای انطباق با انواع تغییرات در طول زمان ایجاد کنند. در مواجهه با این پیچیدگی‌ها، جامعهٔ برنامه‌ریزی و طراحی شهری مفاهیمی مثل «شهر دیجیتال»، «شهر سبز»، و «شهر هوشمند» را پیشنهاد کرده‌اند که ارتباط نزدیکی با مدل‌سازی و شبیه‌سازی سه‌بعدی شهری دارند.

در عصر دیجیتال مفاهیم جدیدی مثل «دادهٔ بزرگ»[۴]، «هوش مصنوعی»[۵]، «پردازش ابری»[۶]، و «یادگیری ماشین»[۷] به‌طور فزاینده‌ای توسعه یافته‌اند و آخرین مفهوم اضافه‌شده به این مفاهیم جدید، در حوزهٔ شهر، «دوقلوی دیجیتال» است.[۸] علاوه‌براین، با پیشرفت داده‌ها و فناوری‌های مکانی سه‌بعدی، قابلیت‌های بیشتری برای برنامه‌ریزان و طراحان شهری فراهم شده است.[۹] فناوری مدل‌سازی سه‌بعدی شهر، با ویژگی‌های هندسی خود و اطلاعات مرتبط، می‌تواند تا حد زیادی در کنترل مؤثر منابع شهری، انتخاب منطقی برای توسعهٔ فضایی شهر، و انجام مدیریت صحیح به برنامه‌ریزی شهری کمک کند.[۱۰] به‌طورکلی، فناوری‌های دیجیتال و کاربردهای آنها برای حاکمیت هوشمندتر و پایدارتر شهرها شامل تجربهٔ شهروندان و حمایت از یک فرایند برنامه‌ریزی و طراحی هوشمند از اهمیت بسیاری برخوردار است. در اینجا، دوقلوی دیجیتال ظرفیت مقابله با چالش‌های پیچیده برای شهرها را دارد. دوقلوی دیجیتال مفهومی است که در آن یک دنیای مجازی براساس مدل‌سازی سه‌بعدی ایجاد و به دنیای واقعی متصل می‌گردد و داده‌های واقعی در فضای مجازی استفاده می‌شوند و به دنیای واقعی بازمی‌گردند.[۱۱] همچنین تبادل اطلاعات جامع را ممکن می‌کند و می‌تواند شامل مدل‌ها، شبیه‌سازی‌ها، و الگوریتم‌هایی باشد که همتای خود در دنیای واقعی را توصیف می‌کنند، این الگوریتم‌ها ازجمله شامل ویژگی‌ها و رفتار آن در دنیای واقعی است. همچنین برای افزایش درک زندگی واقعی می‌تواند در واقعیت مجازی[۱۲] اجرا و به کار گرفته شود[۱۳].

پیشرفت‌های جدید در علم و فناوری رایانه مسیرهای جدیدی را به سوی فرایندهای هوشمندتر، خودکار، و بهینه‌تر باز می‌کند. بنابراین، با استفاده از توسعهٔ سریع فناوری، می‌توان برای شهر نمونهٔ دیجیتالی از آن را خلق کرد. در همین خصوص، در این پژوهش پاسخ به این سؤال مورد نظر است که، کپی دیجیتالی از شهر چیست و این کپی دیجیتالی از شهر چه دستاوردهایی در برنامه‌ریزی، طراحی، و مدیریت شهری به‌همراه دارد؟ به این منظور در این

4. Big Data
5. Artificial Intelligence
6. Cloud Computing
7. Machine Learning

۸. نک:
M. Batty, "Digital Twins".

۹. نک:
T. Agius, et al, "Three-dimensional Rule-based City Modelling to Support Urban Redevelopment

۱۰. نک:
N. Steino, et al, "Parametric Design Strategies for Collaborative and Participatory Urban Design". Process".

۱۱. نک:
S. Yang & H. Kim, "Urban Digital Twin Applications as a Virtual Platform of Smart City".
12. Virtual Reality

۱۳. نک:
F. Dembski, et al, "Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: the Case Study of Herrenberg, Germany".

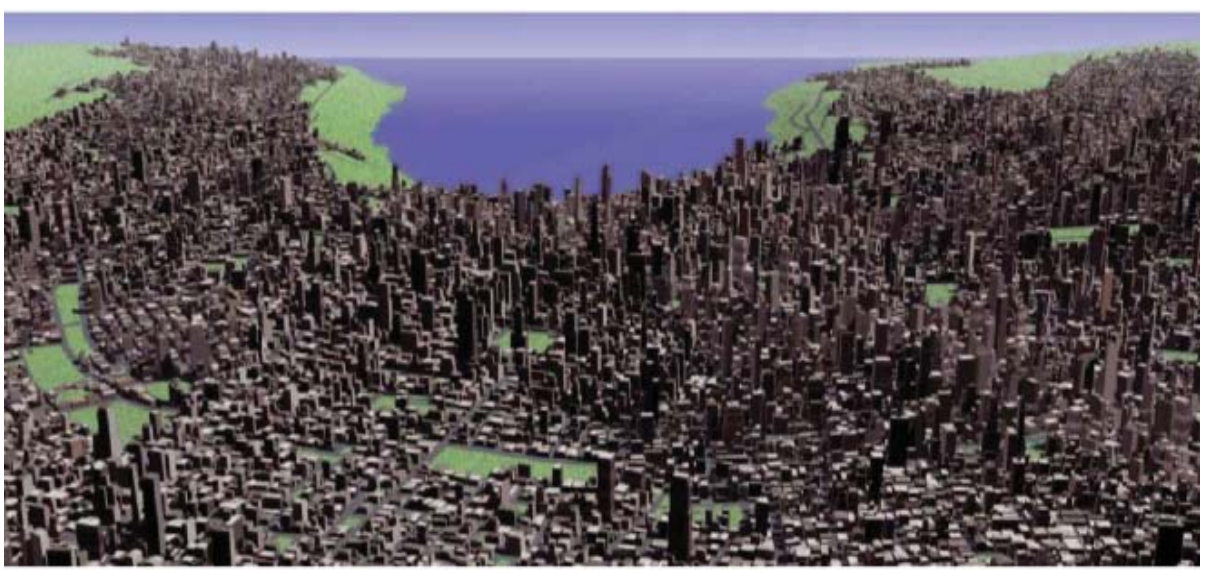
مقاله با تأکید بر ارزش و ضرورت وجود دادهٔ درست و واقعی به‌مثابهٔ ماهیت مهم و انکارناپذیر شهرهای هوشمند، رهیافتی برای پیاده‌سازی شهر هوشمند در جهت برنامه‌ریزی، طراحی، و مدیریت بهتر شهرها جستجو می‌شود و درواقع «دوقلوی دیجیتال» گامی نوین و پاسخی مناسب برای شروع حرکت در این مسیر نوآورانه قلمداد می‌گردد.

امروزه الزاماتی برای مدل‌های سه‌بعدی در مقیاس شهر وجود دارد. بنابراین باید دنبال ابزارها و روش‌هایی بود که دستیابی به این مهم را ممکن می‌کنند. برای همین منظور، هدف اصلی از این پژوهش تمرکز روی معرفی و طرح کردن مفهوم دوقلوی دیجیتال به‌مثابهٔ یک ضرورت در عصر شهرهای هوشمند و همچنین پیاده‌سازی راه عملی رسیدن به این مفهوم در شهر تهران است. یکی از این فناوری‌ها روش مدل‌سازی رویه‌ای[۱۴] است که در بنیان نرم‌افزار سیتی‌انجین[۱۵] نهفته است. روش مدل‌سازی مورد استفاده در این نرم‌افزار بسیار سریع است و می‌تواند داده‌های کمّی و توصیفی از شهر را با برنامه‌نویسی به مدل‌های سه‌بعدی تبدیل و به برنامه‌ریزی، طراحی، و مدیریت شهری در حوزهٔ عمل کمک شایانی کند. ما با استفاده از همین روش مدل‌سازی و با استفاده از برنامه‌نویسی، یک دوقلوی دیجیتالی از شهر تهران را توسعه داده‌ایم که در زمینهٔ برنامه‌ریزی شهری، طراحی شهری، و مدیریت شهری می‌تواند کمک‌کننده باشد.

۱. ادبیات موضوع

۱. ۱. مدل‌سازی رویه‌ای

مدل‌سازی رویه‌ای روشی است که به‌طور گسترده در زمینهٔ تکنولوژی گرافیک رایانه‌ای[۱۶] استفاده می‌شود. واژهٔ «مدل‌سازی رویه‌ای» به معنای ایجاد فرایند برنامه‌نویسی در مدل‌سازی است، به‌طوری‌که قوانین را می‌توان توسط رایانه مدل‌سازی کرد. این روش مدل‌سازی همهٔ روش‌های تولید محتوای سه‌بعدی الگوریتمی را پوشش می‌دهد و به جای روش‌های کار مدل‌سازی دستی‌محور[۱۷]، فرایند مدل‌سازی را با حداقل تداخل دستی مدل‌سازی می‌کند، بنابراین با روش یادشده می‌توان به اهداف مدل‌سازی خودکار[۱۸] دست یافت.[۱۹]



ت ۱. تولید شهر مجازی با ۲۶۰۰۰ ساختمان، مأخذ:
Y.I. Parish & P. Müller, "Procedural Modeling of Cities".

14. Procedural Modeling
15. CityEngine
16. computer graphics technology
17. manually
18. automated modeling
۱۹. نک: فرشاد شریعت‌پور، *فناوری طراحی باهمستان هوشمند با تکیه بر الگوریتم مدل‌سازی رویه‌گرا با استفاده از نرم‌افزار CityEngine*.

در مدل‌سازی رویه‌ای، با استفاده از مجموعه‌ای از قوانین و مقادیر پارامتری، مدل‌های سه‌بعدی تولید می‌شود.[۲۰] بیش از سی سال است که این روش یک موضوع تحقیقاتی فعال است و در مجموعهٔ گسترده‌ای از زمینه‌ها، مثل مدل‌سازی بافت‌ها، گیاهان، توپوگرافی زمین، و مناطق شهری کاربرد دارد[۲۱] و در بسیاری از صنایع برای ایجاد سریع محتوای سه‌بعدی استفاده می‌شود[۲۲]. به بهره‌گیری از روش مدل‌سازی رویه‌ای برای مقیاس شهر،[۲۳] در دو دههٔ اخیر توجه شد (ت ۱).

با ورود روش مدل‌سازی رویه‌ای به مقیاس شهر، برای استفاده از این روش مدل‌سازی در عناصر شهری به‌طور مستقل نیز مطالعات مختلفی شده است. به‌طور نمونه، مدل‌سازی ساختمان‌ها[۲۴]، نماهای شهری[۲۵]، خیابان‌ها[۲۶]، و چیدمان بلوک‌های شهری[۲۷] از اصلی‌ترین مطالعات مدل‌سازی رویه‌ای در زمینه‌های گوناگون شهری هستند. همچنین با توسعه و ادغام این روش با استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی[۲۸]، می‌توان به اهداف طراحی مولد[۲۹] در حوزهٔ برنامه‌ریزی و طراحی شهری دست یافت (ت ۲).

۱. ۲. مدل‌سازی سه‌بعدی شهری

امروزه استفاده از فناوری‌های مدل‌سازی دیجیتال سه‌بعدی در طراحی و تجزیه‌وتحلیل ساختمان‌ها بسیار گسترده است.[۳۰] طی دههٔ گذشته تعداد بیشتری از شهرها و حتی کشورها در سراسر جهان در حال ایجاد مدل‌های سه‌بعدی از محیط فیزیکی شهرهای خود شده‌اند. یکی از اصلی‌ترین اهداف مدل‌های سه‌بعدی شهرْ بصری‌سازی است.[۳۱] مدل‌های سه‌بعدی شهر برای ارزیابی تأثیر عوامل محیطی بر شهروندان ضروری است و با استفاده از شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌توان به این اثرات محیطی پی برد. بااین‌حال، دستیابی به مدل‌های سه‌بعدی، که به‌طور معمول شامل ساختمان‌ها[۳۲]، جاده‌ها، روگذرها، پل‌ها، و درختان هستند، در عمل پیچیده است و مدل‌سازی دستی آنها بسیار وقت‌گیر و خسته‌کننده است[۳۳]. به‌طورکلی، این مدل‌ها برای نمایش، کاوش، و تجزیه‌وتحلیل مناطق شهری استفاده می‌شوند. مدل‌های سه‌بعدی همچنین در حوزه‌های شهر هوشمند، برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها، ارتباطات از راه دور، مدیریت حوادث، خدمات املاک و مستغلات، آموزش، گردشگری، تشخیص تغییرات در طول زمان[۳۴]، واقعیت مجازی[۳۵]، واقعیت افزوده[۳۶]، بازی‌سازی، و فیلم‌سازی استفاده می‌شوند[۳۷]. می‌توان گفت رویکردها و نگاه‌های تجاری مختلفی برای تولید مدل‌های سه‌بعدی شهر مجازی وجود دارد.

مدل‌های سه‌بعدی شهری نقشی اساسی در تعیین وضعیت موجود شهر و شبیه‌سازی آینده‌های احتمالی جانشین دارند.[۳۸] اخیراً چالش‌های قابل‌توجه زمان و محاسباتی مدل‌سازی در مقیاس شهر، با پیشرفت تکنولوژیکی و پردازش داده‌ها، کاهش چشمگیری داشته[۳۹] و پایهٔ فناورانه را برای طراحی و توسعهٔ شهرهای هوشمند فراهم کرده است[۴۰] (ت ۳).

استفاده از مدل‌های سه‌بعدی شهر در حال تغییر از حالت تجسم به موارد استفادهٔ پیچیده است که آنها به‌مثابهٔ نقشه‌های پایهٔ سه‌بعدی عمل می‌کنند.[۴۱] مدل شهر سه‌بعدی

۲۰. نک:
X. Zhang, et al, "Automatic Deep Inference of Procedural Cities from Global-scale Spatial Data".

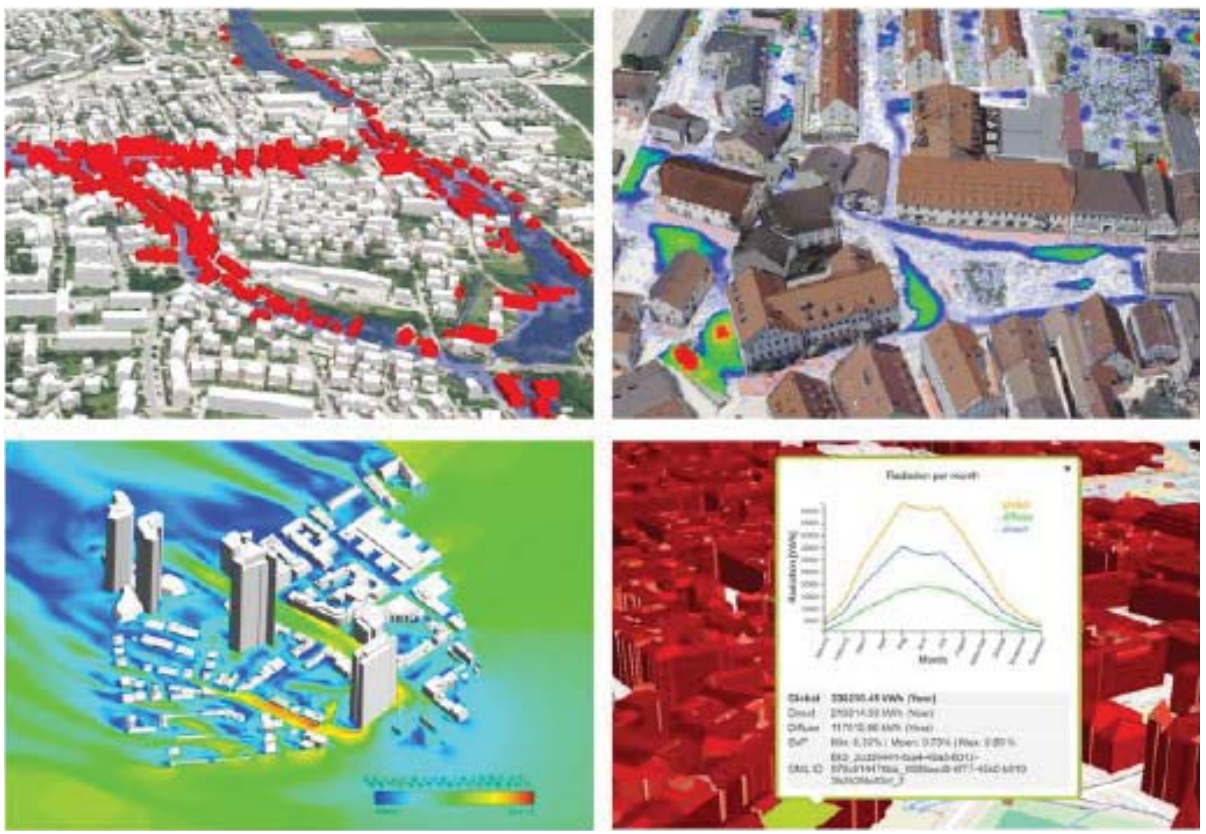
۲۱. نک:
R.M. Smelik, et al, "A Survey on Procedural Modelling for Virtual Worlds".

ت ۲. ایجاد الگوریتم‌های مولدی در مدل‌سازی ساختمان با استفاده از روش رویه‌ای در نرم‌افزار سیتی‌انجین، مأخذ:
F. Roumpani, *The Role of Procedural Cities in the Future of Planning: An Integrated Method.*

دیجیتال یک اکوسیستم دیجیتالی بزرگ را تشکیل می‌دهد که از چندین منبع دادهٔ پیوسته تشکیل شده است.[۴۲] علاوه بر اهداف تجسم بصری، مدل‌های سه‌بعدی شهری نیز می‌توانند با کاربرد حاملان اطلاعات استفاده شوند. آن‌ها از نظر بصری آسان‌فهم‌تر هستند، بنابراین امکان توانایی درک اطلاعات دقیق‌تر از گرافیک دوبعدی را فراهم می‌کنند. بصری‌سازی سه‌بعدی به تسهیل بازخورد افکار عمومی و ایجاد آگاهی عمومی کمک می‌کند. درواقع، با ادغام داده‌های GIS با فرایند مدل‌سازی سه‌بعدی، مدل‌های شهری قابلیت دربرگیری و انتقال اطلاعات به کاربران را خواهند داشت[۴۳].

۱. ۳. شهر هوشمند و دوقلوی دیجیتال

شهر هوشمند ازجمله واژگانی است که تعاریف مختلفی از آن شده‌است. واژهٔ هوشمند، که در زبان انگلیسی به دو صورت Smart و Intelligent رایج است، به بخشی از واژگان شهرسازی تبدیل شده است که اشاره به استفادهٔ هوشمندانه و دقیق‌تر از فناوری اطلاعات[۴۴] دارد.[۴۵] شهر هوشمند شهری است که زیرساخت‌های فیزیکی، زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، زیرساخت‌های اجتماعی و زیرساخت کسب‌وکار شهر را به‌منظور تقویت هوش جمعی به هم وصل می‌کند.[۴۶] مفهوم شهر هوشمند فناوری اطلاعات و ارتباطات و دستگاه‌های مختلف فیزیکی و حسگرهای متصل به شبکهٔ اینترنت اشیا[۴۷] را برای



ت ۳. نمونه‌های کاربردی با استفاده از مدل شهر مجازی و مدل شهر سه‌بعدی، مأخذ:
Z. Yao, et al, "3DCityDB-a 3D Geodatabase Solution for the Management, Analysis, and Visualization of Semantic 3D City Models Based on CityGML".

۲۲. نک:
M. Lipp, et al, "Local Editing of Procedural Models".

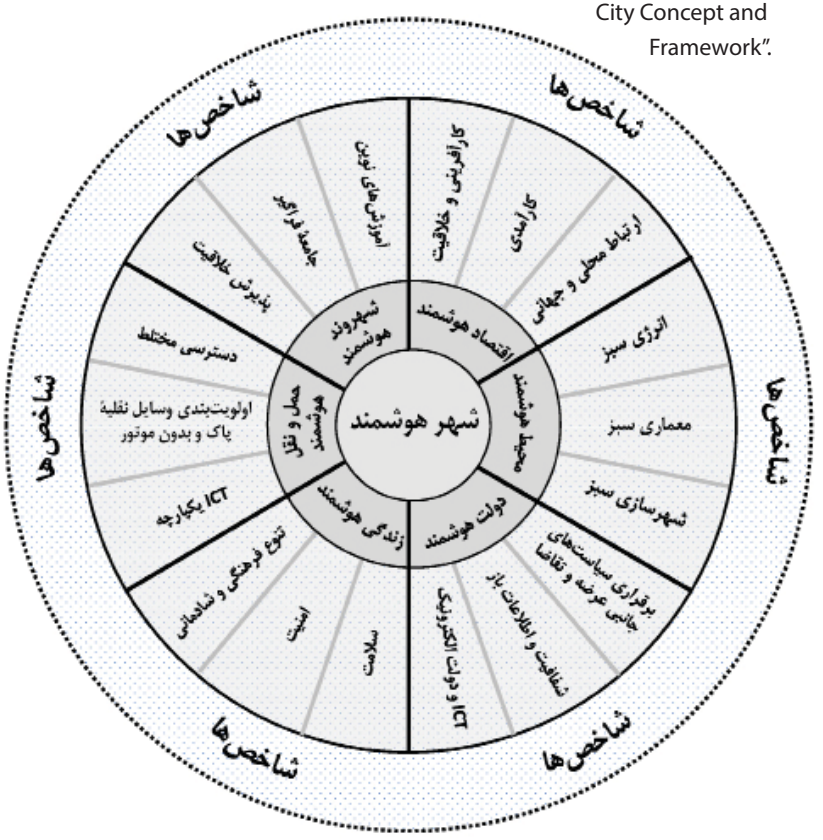
۲۳. نک:
Y.I. Parish & P. Müller, "Procedural Modeling of Cities".

۲۴. نک:
P. Müller, et al, "Procedural Modeling of Buildings"; Wonka, et al, "Instant Architecture"; I. Martin & G. Patow, "Ruleset-rewriting for Procedural Modeling of Buildings"; M. Bhatt, et al, "Design and Deployment of Photo2Building".

۲۵. نک:
F. Bao, et al, "Procedural Facade Variations from a Single Layout"; P. Müller, et al, "Image-based Procedural Modeling of Facades"; C.H. Shen, et al, "Adaptive Partitioning of Urban Facades"; H. Zhang, et al, "Layered Analysis of Irregular Facades via Symmetry Maximization".

بهینه‌سازی کارایی خدمات شهری و ارتباط بهتر با شهروندان ادغام می‌کند.[۴۸] به‌طورکلی می‌توان ارتباط بین عناصر و اجزای شهر هوشمند را در قالب مفهومی شکل «ت ۴» نمایش داد و این نتیجه را گرفت که همهٔ لایه‌ها و ساختارهای شهر هوشمند باید در ارتباطی معنادار با همدیگر عمل کنند. با توجه به اینکه شهرهای هوشمند حاوی سیستم‌های پیچیده‌ای هستند که ممکن است چندین ذی‌نفع، برنامه، حسگر، و دستگاه‌های اینترنت اشیا را درگیر کنند، زیرساخت‌های داده‌های مکانی می‌توانند نقش مهمی در ایجاد قابلیت همکاری بین سیستم‌ها و سیستم عامل‌ها داشته باشند، تا بتوانند چنین داده‌های ناهمگنی را پیوند دهند و استفاده کنند.[۴۹] ایجاد زیرساخت داده‌های مکانی که حسگرهای مختلف، دستگاه‌های اینترنت اشیا، ابزارهای شبیه‌سازی، و مدل‌های سه‌بعدی شهر را در یک چارچوب عملیاتی مشترک ادغام کنند، امکان‌پذیر است.[۵۰] یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین زیرساخت‌های داده‌های مکانی در جهان رویکرد دوقلوی دیجیتال است.

اصطلاح «دوقلوی دیجیتال» ابتدا در صنعت برای نمایش مجازی از آنچه تولید می‌شده[۵۱] و یک مدل انطباقی از یک سیستم فیزیکی پیچیده است[۵۲]. دوقلوهای دیجیتال برآمده از مفهوم دیجیتالی کردن عناصر، فرایندها، و سیستم‌های موجودات فیزیکی به‌منظور ایجاد مدل‌های شبیه‌سازی دیجیتال زنده به‌منزلهٔ بستر مشترک برای رشته‌های انسانی است[۵۳] و می‌تواند فرایند همکاری را برای همهٔ ذی‌نفعان فراهم کند[۵۴]. اگرچه تحقیقات در مورد دوقلوی دیجیتال شهری هنوز در مراحل ابتدایی است، اما پیش‌بینی می‌شود که دوقلوی دیجیتال شهر به‌طور دقیق بر عملکردها و فرایندهای شهر اثر بگذارد تا ادراک، نگهداری، و مدیریت آن را افزایش دهد.[۵۵] پیشرفت‌های فناوری‌های محاسباتی، اطلاعاتی، و ارتباطی باعث تولد و تکامل دوقلوهای دیجیتال شده است. یک دوقلوی دیجیتال مجموعه‌ای از ساختارهای اطلاعات مجازی است که برای توصیف کامل یک محصول فیزیکی بالقوه یا موجود طراحی شده‌اند[۵۶] و نقطهٔ شروع جدیدی برای ساختن شهر هوشمند امروزی هستند[۵۷]. شهرهای هوشمند در زمان تغییرات آب‌وهوایی[۵۸] و «کووید ۱۹»[۵۹] به دوقلوی دیجیتال نیاز دارند[۶۰] و در بسیاری از کشورها و دولت‌ها شهرهای هوشمند را راهحلی برای مسائل شهری همچون رشد جمعیت و کاهش منابع می‌دانند. چالش‌های متعددی هنگام ایجاد یک شهر هوشمند به‌وجود می‌آید. دوقلوهای دیجیتال، همراه با اینترنت اشیا، سیستم‌های بی‌سیم نسل پنجم[۶۱]، بلاک‌چین[۶۲]، محاسبات مشارکتی[۶۳]، شبیه‌سازی[۶۴]، و فناوری‌های هوش مصنوعی،



ت ۴. مدل مفهومی شهر هوشمند، مأخذ:
S.S. Govada, et al, "Smart City Concept and Framework".

۲۶. نک:
G. Chen, et al, "Interactive Procedural Street Modeling"; Galin, et al, "Procedural Generation of Roads".

پتانسیل زیادی در تغییر الگوی حاکمیت شهری کنونی به سمت شهرهای هوشمند عرضه می‌کنند.[۶۵] بهره‌برداری شهرهای هوشمند از دوقلوهای دیجیتال مستلزم شبیه‌سازی در سیستم‌های مختلف زیرساختی در مدیریت جامعه است.[۶۶] این دوقلوی دیجیتالی چشم‌اندازهای جدیدی را برای برنامه‌ریزی شهری باز می‌کند[۶۷] و با ترکیب با هوش مصنوعی می‌تواند در حمل‌ونقل شهری هوشمند کاربرد باشد[۶۸]، به‌طوری‌که داده‌ها از طریق سنسورهای اینترنت اشیا جمع‌آوری می‌شوند و تجزیه‌وتحلیل آنها براساس یادگیری عمیق[۶۹] صورت می‌پذیرد. برنامه‌ریزی هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی[۷۰] روندی بزرگ در ساختن شهر هوشمند است.[۷۱] دوقلوهای دیجیتالی، به‌خاطر استفاده از پیشرفت‌های فناوری سنجش، پردازش و انتقال داده را ممکن می‌کنند و جدا از حوزهٔ تحلیل شهری، در حوزهٔ علوم اجتماعی محاسباتی[۷۲] نیز استفاده می‌شوند.[۷۳] مسائل ملی و اجتماعی به‌طور فزاینده‌ای رایج می‌شوند، اما روش‌های سنتی سیاست‌گذاری دیگر کارآمد نیستند. بنابراین، سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد[۷۴] به‌مثابهٔ یک پارادایم جانشین در حال ظهور است. فناوری دوقلوی دیجیتال یکی از ابزارهای پشتیبانی دیجیتال برای فرایند جدید سیاست‌گذاری مبتنی بر داده[۷۵] است[۷۶].

نمونه‌هایی از دوقلوی دیجیتال برای کاربردهای گوناگون در دنیا انجام شده است (ت ۵) که به بررسی آنها از نگاه طراحی، برنامه‌ریزی، و مدیریت شهری می‌پردازیم:

دوقلوی دیجیتالی دوبلین[۷۷]: ایجاد یک محیط مجازی تعاملی از طریق دوقلوی دیجیتال برای شبیه‌سازی تأثیر ساخت‌وسازهای جدید در شهر و ایجاد مشارکت شهروندان در طرح.[۷۸]

دوقلوی دیجیتال برای مقاومت در برابر سیل در هلسینکی[۷۹]: ایجاد دوقلوی دیجیتال برای کمک به شهرها تا برای بلایای طبیعی برنامه‌ریزی کنند و به رویدادهای آب‌وهوایی که می‌توانند باعث سیل و خسارات گسترده شوند، واکنش بهتری نشان دهند.[۸۰]

ت ۵. دوقلوی دیجیتال با کاربردهای گوناگون در طراحی، برنامه‌ریزی، و مدیریت شهری:
الف) شبیه‌سازی تأثیر ساخت‌وساز جدید در دوبلین،
ب) شبیه‌سازی سیل در هلسینکی،
پ) مدیریت زیرساخت‌ها در پارک علمی هنگ‌کنگ،
د) شبیه‌سازی بخشی از سئول،
مأخذ: منابع مربوطه در متن.

۲۷. نک:
M. Lipp, et al, "Interactive Modeling of City Layouts Using Layers of Procedural Content".
28. programming languages
29. generative design
۳۰. نک:
S. Eleftheriadis, et al, "Life Cycle Energy Efficiency in Building Structures"; W. Zhu, *3D Modeling of City Building and Lifecycle Simulation*.
۳۱. نک: شریعت‌پور، همان.
۳۲. نک:
P.G. Cheng, et al, "Research and Implementation of 3d City Batch Rapid Modelling Method".
۳۳. نک:
H. Ledoux, et al, "3dfier: Automatic Reconstruction of 3D City Models".
۳۴. نک:
J.G. Singla & K. Padia, "A Novel Approach for Generation and Visualization of Virtual 3D City Model Using Open Source Libraries".

دوقلوی دیجیتالی پارک علمی هنگ‌کنگ[۸۱]: دوقلوی دیجیتالی ایجادشده یک مدل سه‌بعدی هوشمند و پویاست که خیابان‌ها، ساختمان‌ها، و فضاهای عمومی را نشان می‌دهد؛ برای کنترل و مدیریت زیرساخت‌ها و همچنین راهی برای دسترسی به اسناد ساختمانی است.[۸۲]

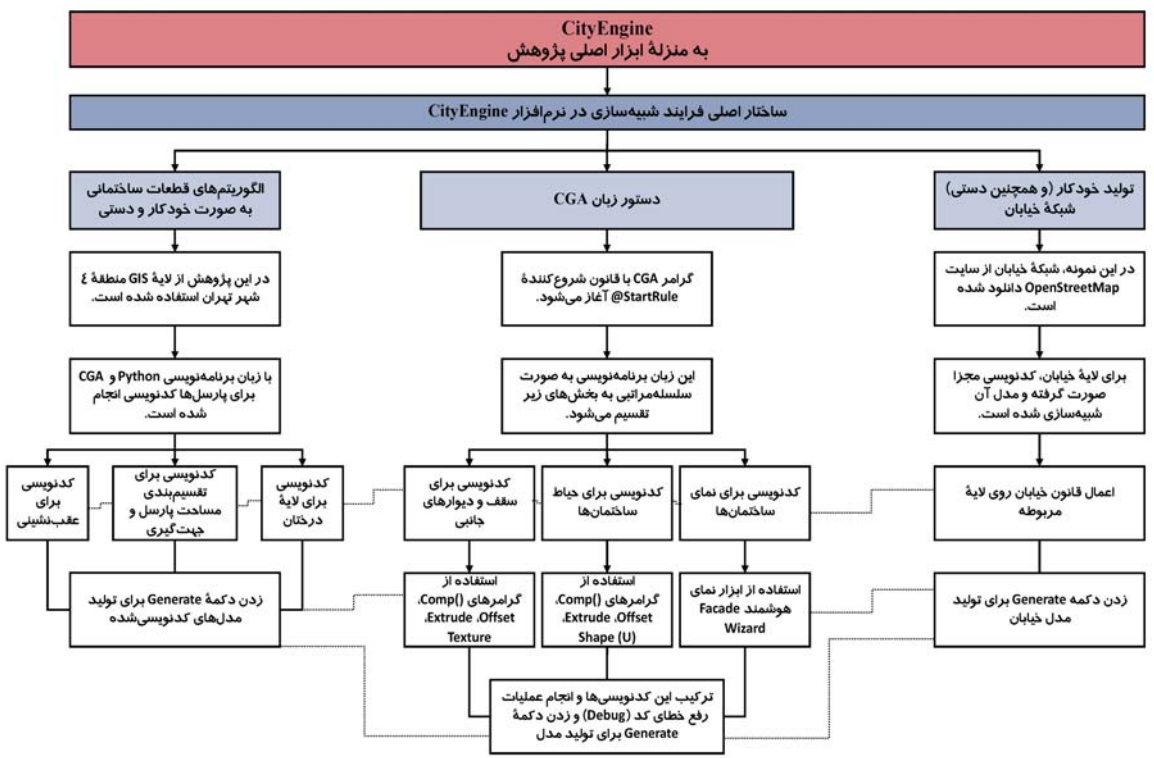
دوقلوی دیجیتال سئول[۸۳]: ایجاد دوقلوی دیجیتال می‌تواند مشکلات مختلف شهری را از طریق شبیه‌سازی با تلفیق اطلاعاتی، مانند مدیریت و محیط زیست در فضای مجازی، حل کند.[۸۴]

۲. روش‌شناسی

در این مطالعه رویکرد روش‌شناختی کاربردی-توسعه‌ای برای شبیه‌سازی مدل شهر تهران (محلهٔ نارمک) استفاده شده‌است. این مدل شامل داده‌های مبتنی بر GIS است که کاربر می‌تواند داده‌های دو و سه‌بعدی و ویژگی‌های کامل مدل‌ها را در لحظه[۸۵] مشاهده کند. هدف اصلی در الگوریتمِ نوشته‌شده در این مطالعه، شبیه‌سازی محیطی هوشمند از تهران است که با توسعه‌هایی در آینده، می‌تواند الگویی برای دوقلوی دیجیتال تهران باشد.

با استفاده از نرم‌افزار ArcMap پایگاه دادهٔ توصیفی ایجاد گردیده و با استفاده از نرم‌افزار سیتی‌انجین، به‌منزلهٔ ابزار اصلی تحقیق، فرایند شبیه‌سازی انجام شده است. در این پژوهش برای مدل‌سازی ساختمان‌ها از زبان‌های برنامه‌نویسی پایتون[۸۶] و CGA استفاده شده‌است. در «ت ۶» ساختار کلی روش‌شناسی پژوهش مشاهده می‌شود.

برای ایجاد مدل سه‌بعدی از ساختمان‌های نارمک تهران انواع داده‌های زیر برای انجام فرایند شبیه‌سازی هوشمند



ت ۶. ساختار کلی روش‌شناسی پژوهش، طرح و تدوین: نگارندگان.

۳۵. نک:
J. Steuer, "Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence". 36. Augmented Reality;

نک:
R.T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality".

۳۷. نک:
X. Luan, et al, "Research and Development of 3D Modeling".

۳۸. نک:
H. Rua, et al, "Digital Models–Proposal for the Interactive Representation of Urban Centres"; F. Biljecki, et al, "Applications of 3D City Models: State of the Art Review".

۳۹. نک:
J.D.M. Arnold & D. Lafreniere, "Creating a Longitudinal, Data-driven 3D Model of Change over Time in a Postindustrial Landscape Using GIS and CityEngine".

۴۰. نک:
M. Buyukdemircioglu & S. Kocaman, "Reconstruction and Efficient Visualization of Heterogeneous 3D City Models".

جمع‌آوری شدند:

ـ مجموعه داده‌های مکانمند از پارسل‌های ساختمان و جدول مشخصات با پارامترهای ضروری (مثل پارامتر تعداد طبقات) برای شبیه‌سازی

ـ داده‌های OSM برای شبکهٔ خیابان‌ها

ـ نقشهٔ ارتفاعی (DEM)

ـ عکس هوایی زمین‌مرجع

ـ مدل سه‌بعدی درختان از کتابخانهٔ شرکت ESRI

ـ جمع‌آوری تصاویر نمای ساختمان‌های محدودهٔ مورد مطالعه

ـ جمع‌آوری تصاویر سقف ساختمان‌ها از گوگل ارث[۸۷] به‌وسیلهٔ پردازش تصویر

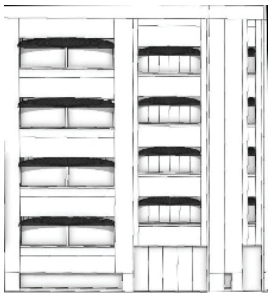
برای انجام این کار از روش مدل‌سازی رویه‌ای موجود در هستهٔ اصلی نرم‌افزار سیتی‌انجین استفاده شده است. همهٔ این داده‌های متنوع برای ایجاد محتوای سه‌بعدی محدودهٔ مورد مطالعه ترکیب شدند (جدول ۱).

مرحلهٔ آماده‌سازی داده‌ها شامل انتخاب سیستم مختصات برای داده‌ها، ایجاد بانک نمای ساختمان‌ها، محاسبهٔ پارامترهای ضروری، ساده‌سازی پارسل‌ها، و ایجاد نقطه‌ها برای لایهٔ پوشش گیاهی می‌شود. در «جدول ۲» نمونه‌ای از بانک نماها آورده شده است.

جدول ۱ (راست). داده‌های واردشده به نرم‌افزار سیتی‌انجین، تدوین: نگارندگان.

منبع	نوع داده	داده
ArcGIS 10.6	SHP	پارسل‌های ساختمانی
OpenStreetMap	OSM	شبکهٔ خیابان
تدقیق شده با نقشه تصویر پایه	SHP	مکان پوشش گیاهی
نقشه‌های پایه ArcGIS	JPEG	نقشهٔ تصویر پایه (Imagery base map)
نقشه‌های پایه ArcGIS	TIFF	نقشهٔ ارتفاعی (Height map)
کتابخانه مدل‌های سه‌بعدی شرکت Esri	OBJ	مدل سه‌بعدی پوشش گیاهی
انبار مدل‌های سه‌بعدی SketchUp	OBJ	مدل سه‌بعدی عناصر خاص مثل، مسجد، اتومبیل‌ها، و ...

جدول ۲ (چپ). نمونه‌هایی از نماهای ساختمانی عکس‌برداری‌شده، تدوین: نگارندگان.

انواع نما	نمای شبیه‌سازی‌شده در سیتی‌انجین	تصویر نمای دوبعدی
مستطیلی		
مربعی		
تراس‌دار		
دایره‌ای		

فرایند شبیه‌سازی با وارد کردن داده‌های خام به نرم‌افزار و ایجاد فایل‌های قانون آغاز شد. پس از آن، فایل‌های قانون ایجادشده بر روی پارسل‌های خام اعمال شدند و محتوای سه‌بعدی تولید شد که برای تولید مدل‌های سه‌بعدی از برنامه‌نویسی (زبان Python و CGA) در محیط نرم‌افزار سیتی‌انجین استفاده شده است. همان‌طور که می‌توان از حاصل نتایج به‌دست‌آمده مشاهده کرد، مدل‌سازی رویه‌ای می‌تواند برای مدل‌سازی محتوای سه‌بعدی مناطق شهری به کار رود (ت ۷ تا ۹). همچنین برنامه‌نویسی انجام‌شده برای این پژوهش در سطح جزئیات[۸۸] مختلفی نوشته شده است بنابراین می‌تواند در زمینه‌های برنامه‌ریزی شهری و طراحی شهری و مدیریت شهری بسیار کمک‌کننده باشد.

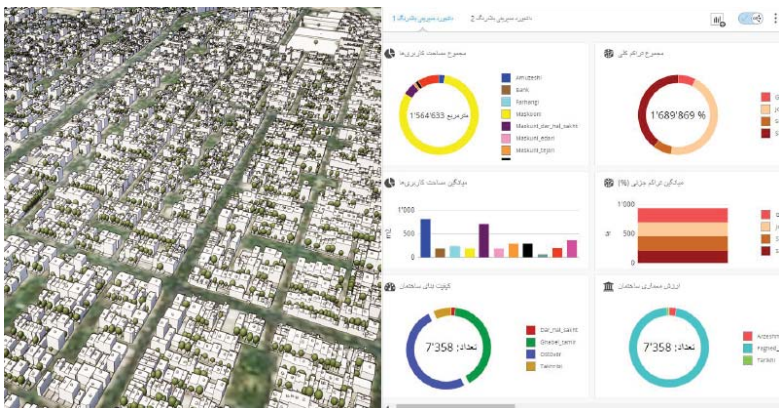
۳. تحلیل

تولید یک مدل دیجیتال از شهر متکی به وجود داده‌هاست، بنابراین یکی از اصلی‌ترین چالش‌های تولید این مدلْ دادهٔ درست قلمداد می‌شود. در شهرهای هوشمند دنیا، برای حل چالش شفافیت در داده‌های شهری و همچنین برای ایجاد یک پلتفرم یکپارچه برای شهروندان در جهت ایجاد همکاری و تعامل، داده‌های شهری به‌صورت باز[۸۹] در اختیار عموم قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین محدودیت این پژوهش پراکندکی، نبود، و کمبود داده‌های شهری در شهر تهران است، برای همین منظور، بعضی از داده‌ها به‌صورت میدانی برداشت شده است. اما با ایجاد یک پایگاه دادهٔ سه‌بعدی در قالب یک مدل دوقلوی دیجیتال از شهر تهران، همهٔ داده‌ها متصل به مدل سه‌بعدی به‌صورت یکپارچه وجود خواهند داشت. یکی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش پذیرفتن مدل دوقلوی دیجیتال از شهرها به‌مثابهٔ راهی عملی و به‌روز برای نزدیک شدن به مفهوم شهر هوشمند در زمینهٔ شهرسازی است که این امر مستلزم حمایت و پشتیبانی مدیریت شهری است؛ چراکه توسعه و گسترش این مدل در ابعاد متنوعی همچون مدیریت بحران، حمل‌ونقل شهری، گردشگری، و...، حتی در صنعت بازی‌سازی و فیلم‌سازی نیازمند حمایت مدیران شهری و مسئولان ذی‌ربط است. از دیگر محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به نبود داده‌های مربوط به خیابان‌های شهر تهران اشاره کرد؛ برای

۴۱. نک:
H. Eriksson & L. Harrie, "Versioning of 3D City Models for Municipality Applications: Needs, Obstacles and Recommendations".

۴۲. نک:
N. Lafioune & M. St-Jacques, "Towards the Creation of a Searchable 3D Smart City Model".

ت ۷ (پایین، راست). مدل سه‌بعدی نارمک تهران در سطح برنامه‌ریزی شهری،تدوین: نگارندگان.
ت ۸ (پایین، چپ). مدل سه‌بعدی نارمک تهران در سطح مدیریت شهری، تدوین: نگارندگان.
ت ۹ (بالا). مدل سه‌بعدی نارمک تهران در سطح طراحی شهری، تدوین: نگارندگان.



شبیه‌سازی لایهٔ خیابان‌ها از سایت Openstreetmap.org استفاده شده است. پژوهشگران تحقیق پیش رو امیدوار هستند که با اختیار قرار دادن داده‌های مکانی در آینده، دوقلوی دیجیتالی تهران غنی‌تر بشود و با توسعهٔ این رویکرد، لایه‌های بیشتری از آن شناسایی و زمینه‌های همکاری همهٔ رشته‌های مرتبط با شهر فراهم شود.

۴. نتیجه‌گیری

دوقلوی دیجیتال یک نمایش مجازی از دنیای واقعی و شامل اشیای فیزیکی، فرایندها، روابط، و رفتارهاست که برای نظارت، کنترل، و بهینه‌سازی عملکرد آن طراحی شده است. دوقلوی دیجیتال تهرانْ مدل مکانی و دیجیتالی این شهر برای موضوعات مختلف است. داده‌های مکانی شهری موجود می‌توانند به مدل سه‌بعدی هوشمندْ تبدیل و برای زمینه‌های گوناگون استفاده شوند. به‌طور مثال، دستاورد این پژوهش، تولید دوقلوی دیجیتال تهران، می‌تواند در زمینهٔ گردشگری مجازی، صنعت سینما، بازی‌سازی، برنامه‌ریزی شهری، طراحی شهری، و مدیریت شهری کاربردی باشد. با توسعهٔ این مدل بینش جدیدی از تحقیقات مختلفْ ایجاد و زمینه‌های همکاری و یکپارچه‌سازی بین رشته‌های مرتبط با حوزهٔ شهر فراهم می‌شود، این ارتباط می‌تواند در یک دنیای مجازی تعاملی مثل متاورس[۹۰] محقق گردد.

با در اختیار داشتن دوقلوی دیجیتال، در حوزهٔ برنامه‌ریزی شهری، دستاوردهای آن شامل استفاده از داده‌های بلادرنگ، شبیه‌سازی گزینه‌های برنامه‌ریزی، ایجاد بستری برای آزمایش و پیش‌بینی آنها، تحلیل داده‌های شهری به‌صورت یکپارچه و مکانمند، مقایسهٔ لحظه‌ای تغییرات کاربری حال و گذشته و آیندهٔ شهر، و برنامه‌ریزی برای سیستم‌های حمل‌ونقل است. در حوزهٔ طراحی شهری دستاوردهای آن شامل تجسم مدل فیزیکی شهر، تجربهٔ حضور مجازی در مدل‌های سه‌بعدی واقعی شهر، مدل‌سازی رفتارها در مدل سه‌بعدی، مسیریابی در فضای سه‌بعدی شهر و شبیه‌سازی نماهای شهری می‌شود و در حوزهٔ مدیریت شهری دستاوردهایی همچون یکپارچه‌سازی لایه‌های داده‌ای مختلف شهر (لایهٔ ساختمان‌ها، مبلمان، زیرساخت‌ها، پوشش گیاهی، و ...)، کنترل داده‌های شهری، مشارکت ذی‌نفعان به‌صورت تعاملی، مدیریت مخاطرات و بلاهای طبیعی مثل سیل و زلزله و ...، ایجاد داشبوردهای مدیریت داده، کنترل تحقق یا عدم تحقق ضوابط ساخت‌وساز شهری همچون تعداد طبقات و کاربری اراضی و ...، درگیر کردن شهروندان با مدل مجازی شهر، و پایش زیرساخت‌های شهری را می‌توان بیان کرد. دوقلوی دیجیتال با ترکیب شدن با فناوری‌های جدید مثل هوش مصنوعی (یادگیری عمیق و یادگیری ماشینی) می‌تواند به‌مثابهٔ مدلی ارتقایافته برای تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی، طراحی، و مدیریت شهری استفاده شود. درواقع ما، با خلق یک مدل مجازی از شهر، می‌توانیم قبل از اجرا، آزمایش کنیم، بنابراین می‌توانیم هم هزینه‌ها و هم احتمال شکست در دنیای واقعی را به حداقل برسانیم.

دوقلوی دیجیتال برای آزمایش سناریوهای مختلف در جهت برنامه‌ریزی آینده می‌تواند استفاده شود. این رویکرد فرصت‌های جدیدی را برای بحث و تصمیم‌گیری در حکمروایی خوب شهری فراهم می‌کند. شهرهای دارای دوقلوهای دیجیتال این امکان را دارند که پیشرفت قابل‌توجهی در مدیریت بلایای جامعه به‌وجود آورند، با ایجاد محیط مجازی از شهر، تعامل با شهروندان و جوامع را بهبود ببخشند، و این می‌تواند برای حرکت در مسیر شهرهای هوشمند تحول‌آفرین باشد. به بیان دیگر، دوقلوی دیجیتال تهران یک گام رو به جلو در زمینهٔ تهران هوشمند است. در آینده نیز می‌توان برای مقابله با چالش‌های مثل، پایش زیرساخت‌ها، تغییرات آب‌وهوایی، بحران‌های همه‌گیر، و یک رویکرد جامع‌نگر به هر چیز دیگری که آینده ممکن است به همراه داشته باشد، از آن بهره‌مند شد.

۴۳. نک: مهشید قربانیان و فرشاد شریعت‌پور، «کاربست فناوری مدل‌سازی اطلاعات شهر؛ رهیافتی نوین در مدیریت شهری هوشمند؛ موردکاوی: کوی کالاد تهران».

44. Information Technology (IT)

۴۵. نک:
S. Hodgkinson, "Is Your City Smart Enough? Digitally Enabled Cities and Societies Will Enhance Economic, Social, and Environmental Sustainability in the Urban Century".

۴۶. نک:
C. Harrison, et al, "Foundations for Smarter Cities".

47. Internet of Things (IoT)

۴۸. نک:
M. Peris-Ortiz, et al, "Sustainable Smart Cities".

۴۹. نک:
K. Chaturvedi, et al, "Securing Spatial Data Infrastructures for Distributed Smart City Applications and Services".

۵۰. نک:
D. Jovanović, et al, "Building Virtual 3D City Model for Smart Cities Applications".

۵۱. نک:
M. Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication".

منابع و مآخذ

شریعت‌پور، فرشاد. *فناوری طراحی باهمستان هوشمند با تکیه بر الگوریتم مدل‌سازی رویه‌گرا با استفاده از نرم‌افزار CityEngine*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۸.

قربانیان، مهشید و فرشاد شریعت‌پور. «کاربست فناوری مدل‌سازی اطلاعات شهر؛ رهیافتی نوین در مدیریت شهری هوشمند؛ موردکاوی: کوی کالاد تهران».*در مدیریت شهری و روستایی*، ش۵۹ (تابستان ۱۳۹۹)، ص۷–۲۵.

Agius, T. & S. Sabri & M. Kalantari. "Three-dimensional Rule-based City Modelling to Support Urban Redevelopment Process". In *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(10) (2018), p. 413.

Arnold, J.D.M. & D. Lafreniere. "Creating a Longitudinal, Data-driven 3D Model of Change over Time in a Postindustrial Landscape Using GIS and CityEngine". In *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 8(4) (2018), pp. 434-447.

Azuma, R.T. "A Survey of Augmented Reality". In *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4) (1997), pp. 355-385.

Bao, F. & M. Schwarz & P. Wonka. "Procedural Facade Variations from a Single Layout". In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(1) (2013), pp. 1-13.

Batty, M. "Digital Twins". In *Environment and Planning B*, 45 (2018), pp. 817-820.

Bentley Systems. "A Digital Replica for Hong Kong Science Park". In *DijiFyo*, 2019. Available at: https://www.dijifyo.com/a-digital-replica-for-hong-kong-science-park/ [Accessed 27/01/2022].

Bhatt, M. & R. Kalyanam & G. Nishida & L. He & C. May & D. Niyogi & D. Aliaga. "Design and Deployment of Photo2Building: A Cloud-based Procedural Modeling Tool as a Service". In *Practice and Experience in Advanced Research Computing*, 2020, pp. 132-138.

Biljecki, F. & J. Stoter & H. Ledoux & S. Zlatanova & A. Çöltekin. "Applications of 3D City Models: State of the Art Review". In *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4) (2015), pp. 2842-2889.

Buyukdemircioglu, M. & S. Kocaman. "Reconstruction and Efficient Visualization of Heterogeneous 3D City Models". In *Remote Sensing*, 12(13) (2020), pp. 2128-2153.

Charitonidou, M. "Urban Scale Digital Twins in Data-driven Society: Challenging Digital Universalism in Urban Planning Decision-making". In *International Journal of Architectural Computing*, 20(5) (2022), pp. 1-16. DOI:10.1177/14780771211070005

Chaturvedi, K. & A. Matheus & S.H. Nguyen & T.H. Kolbe. "Securing Spatial Data Infrastructures for Distributed Smart City Applications and Services". In *Future Generation Computer Systems*, 101(2019), pp. 723-736.

Chen, G. & G. Esch & P. Wonka & P. Müller & E. Zhang. "Interactive Procedural Street Modeling". In *ACM SIGGRAPH*, 2008, pp. 1-10.

Cheng, P.G. & A.L. He & Y.J. Nie & J. Wu & X.L. Li & Z.R. Li. "Research and Implementation of 3d City Batch Rapid Modelling Method". In *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2020), pp. 1107-1112.

Dembski, F. & U. Wössner & M. Letzgus & M. Ruddat & C. Yamu. "Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: the Case Study of Herrenberg, Germany". In *Sustainability,* 12(6) (2020), pp. 2307-2323.

Deng, T. & K. Zhang & Z.J.M. Shen. "A Systematic Review of a Digital Twin City: A New Pattern of Urban Governance toward Smart Cities". *In Journal of Management Science and Engineering*, 6(2) (2021), pp. 125-134.

Deren, L. & Y. Wenbo & S. Zhenfeng. "Smart City Based on Digital Twins". In *Computational Urban Science*, 1(1) (2021), pp. 1-11.

Dignan, J. "Smart Cities in the Time of Climate Change and Covid-19 Need Digital Twins". In *IET Smart Cities*, 2(3) (2020), pp. 109-110.

Du, J. & Q. Zhu & Y. Shi & Q. Wang & Y. Lin & D. Zhao. "Cognition Digital Twins for Personalized Information Systems of Smart Cities: Proof of Concept". In *Journal of Management in Engineering*, 36(2) (2020). DOI:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000740

Eleftheriadis, S. & D. Mumovic & P. Greening. "Life Cycle Energy Efficiency in Building Structures: A Review of Current Developments and Future Outlooks Based on BIM Capabilities". In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67(2017), pp. 811-825.

Eriksson, H. & L. Harrie. "Versioning of 3D City Models for Municipality Applications: Needs, Obstacles and Recommendations". In *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2) (2021), p. 55.

Ford, D.N. & C.M. Wolf. "Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management". In *Journal of Management in Engineering*, 36(4) (2020), 04020027-1-10.

Galin, E. & A. Peytavie & N. aréchal & E. Guérin. "Procedural Generation of Roads". In *Computer Graphics Forum*, Vol. 29, No. 2, Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2010, pp. 429-438.

Govada, S.S. & W. Spruijt & T. Rodgers. "Smart City Concept and Framework". In *Smart Economy in Smart Cities*, Springer, Singapore, 2017, pp. 187-198.

Grieves, M. "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication". In *White Paper*, 1(2014), pp. 1-7.

Harrison, C. & B. Eckman & R. Hamilton & P. Hartswick & J. Kalagnanam & J. Paraszczak & P. Williams. "Foundations for Smarter Cities". In *IBM Journal of Research and Development*, 54(4) (2010), pp. 1-16.

۵۲. نک:
A. Rasheed, et al, "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective".

۵۳. نک:
H. Lehner & L. Dorffner, "Digital geoTwin Vienna: Towards a Digital Twin City as Geodata Hub".

۵۴. نک:
Dembski, et al, ibid.

۵۵. نک:
E. Shahat, et al, "City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda".

۵۶. نک:
J. Du, et al, "Cognition Digital Twins for Personalized Information Systems of Smart Cities: Proof of Concept".

۵۷. نک:
L. Deren, et al, "Smart City Based on Digital Twins".
58. climate change
59. Covid-19

۶۰. نک:
J. Dignan, "Smart Cities in the Time of Climate Change and Covid-19 Need Digital Twins".
61. fifth-generation wireless systems
62. blockchain
63. collaborative computing
64. simulation

۶۵. نک:
T. Deng, et al, "A Systematic Review of a Digital Twin City".

۶۶. نک:
D.N. Ford & C.M. Wolf, "Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management".

۶۷. نک:
G. Schrotter & C. Hürzeler, "The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning".

۶۸. نک:
Z. Lv & S. Xie, "Artificial Intelligence in the Digital Twins: State of the Art, Challenges, and Future Research Topics".
69. deep learning
70. AI-cored smart planning

۷۱. نک:
X. Li, et al, "Big Data Analysis of the Internet of Things in the Digital Twins of Smart City Based on Deep Learning"; S.P. Ramu, et al, "Federated Learning Enabled Digital Twins for Smart Cities".
72. computational social sciences

۷۳. نک:
M. Charitonidou, "Urban Scale Digital Twins in Data-driven Society: Challenging Digital Universalism in Urban Planning Decision-making".
74. evidence-based policy making
75. data-driven policy making

۷۶. نک:
Y.J. Jung, et al, "Digital Twin Technology for Urban Policy Making".

Hodgkinson, S. "Is Your City Smart Enough? Digitally Enabled Cities and Societies Will Enhance Economic, Social, and Environmental Sustainability in the Urban Century". In *OVUM Report*, 2011, pp. 2-11.

Jovanović, D. & S. Milovanov & I. Ruskovski & M. Govedarica & D. Sladić & A. Radulović & V. Pajić. "Building Virtual 3D City Model for Smart Cities Applications: A Case Study on Campus Area of the University of Novi Sad". In *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(8) (2020), pp. 476-500.

Jung, Y.J. & I.Y. Cho & J.W. Lee & B.H. Kim & S.H. Lee & C.G. Lim, ... & J.H. Ann. "Digital Twin Technology for Urban Policy Making (A Case Study of Policy Digital Twin of Sejong City)". In *Electronics and Telecommunications Trends*, 36(2) (2021), pp. 43-55.

Lafioune, N. & M. St-Jacques. "Towards the Creation of a Searchable 3D Smart City Model". In *Innovation & Management Review*, 2020.

Ledoux, H. & F. Biljecki & B. Dukai & K. Kumar & R. Peters & J. Stoter & T. Commandeur. "3dfier: Automatic Reconstruction of 3D City Models". In *Journal of Open Source Software*, 6(57) (2021), pp. 2866-2870.

Lehner, H., & L. Dorffner. "Digital geoTwin Vienna: Towards a Digital Twin City as Geodata Hub". In *PFG – Journal of Photogrammetry Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(W) (2020).

Lipp, M. & D. Scherzer & P. Wonka & M. Wimmer. "Interactive Modeling of City Layouts Using Layers of Procedural Content". In *Computer Graphics Forum*, Vol. 30, No. 2, Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2011, pp. 345-354.

Lipp, M. & M. Specht & C. Lau & P. Wonka & P. Müller. "Local Editing of Procedural Models". In *Computer Graphics Forum*, Vol. 38, No. 2 (2019, May), pp. 13-25.

Li, X. & H. Liu & W. Wang & Y. Zheng & H. Lv & Z. Lv. "Big Data Analysis of the Internet of Things in the Digital Twins of Smart City Based on Deep Learning". In *Future Generation Computer Systems*, 128 (2022), pp. 167-177.

Luan, X. & Y. Xie & L. Ying & L. Wu. "Research and Development of 3D Modeling". In *International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 8(1) (2008), pp. 49-52.

Lv, Z. & S. Xie. "Artificial Intelligence in the Digital Twins: State of the Art, Challenges, and Future Research Topics". In *Digital Twin*, 1(12) (2021), pp. 12-34.

Martin, I. & G. Patow. "Ruleset-rewriting for Procedural Modeling of Buildings". In *Computers & Graphics*, 84 (2019), pp. 93-102.

Mankowski, R. "City-scale Digital Twins for Flood Resilience". In *GIM*, Available at: https://www.giminternational.com/content/article/city-scale-digital-twins-for-flood-resilience [Accessed 27/01/2022].

Müller, P. & P. Wonka & S. Haegler & A. Ulmer & L. Van Gool. "Procedural Modeling of Buildings". In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, 2006, pp. 614-623.

Müller, P. & G. Zeng & P. Wonka & L. Van Gool. "Image-based Procedural Modeling of Facades". In *ACM Trans. Graph*., 26(3) (2007), 85-es.

Parish, Y.I. & P. Müller. "Procedural Modeling of Cities". In *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 2001, August, pp. 301-308.

Peris-Ortiz, M. & D.R. Bennett & D.P.B. Yábar. "Sustainable Smart Cities". In *Innovation, Technology, and Knowledge Management*. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2017.

Ramu, S.P. & P. Boopalan & Q.V. Pham & P.K.B. Maddikunta & T.H. The & M. Alazab, ... & T.R. Gadekallu. "Federated Learning Enabled Digital Twins for Smart Cities: Concepts, Recent Advances, and Future Directions". In *Sustainable Cities and Society*, 79 (2022), 103663.

Rasheed, A. & O. San & T. Kvamsdal. "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective". In *IEEE Access*, 8 (2020), pp. 21980-22012.

Roumpani, F. *The Role of Procedural Cities in the Future of Planning: An Integrated Method*. Doctoral dissertation, UCL, University College London, 2019.

Rua, H. & A.P. Falcão & A.F. Roxo. "Digital Models–Proposal for the Interactive Representation of Urban Centres". In eCAADe 2013: Computation and Performance – Proceedings of the 31st International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2013.

Schrotter, G. & C. Hürzeler. "The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning". In *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88 (2020), pp. 99-112.

Shen, C.H. & S.S. Huang & H. Fu & S.M. Hu. "Adaptive Partitioning of Urban Facades". In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 30(6) (2011), pp. 1-10.

Shahat, E. & C.T. Hyun & C. Yeom. "City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda". In *Sustainability*, 13(6) (2021), 3386.

Singla, J.G. & K. Padia. "A Novel Approach for Generation and Visualization of Virtual 3D City Model Using Open Source Libraries". In *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, (2020), pp. 1-6.

Smart City Korea. "Seoul City Builds the Nation's First Urban Problem Solving Simulation 'Digital Twin S-Map'". In *Smart City Korea*, 2021. Available at: https://smartcity.go.kr/en/2021/04/01/%ec%84%9c%ec%9a%b8%ec%8b%9c-%eb%8f%84%ec%8b%9c%eb%ac%b8%ec%a0%9c%ed%95%b4%ea%b2%b0-%ec%8b%9c%eb%ae%ac%eb%a0%88%ec%9d%b4%ec%85%98-%eb%94%94%ec%a7%80%ed%84%b8-%ed%8a%b8%ec%9c%88-s-map-%ec%a0%84/ [Accessed 27/01/2022].

Smelik, R.M. & T. Tutenel & R. Bidarra & B. Benes. "A Survey on Procedural Modelling for Virtual Worlds". In *Computer Graphics Forum*, Vol. 33, No. 6 (2014, September), pp. 31-50.

Steino, N. & M.B. Yıldırım & M. Özkar. "Parametric Design

Strategies for Collaborative and Participatory Urban Design". In *Collaborative and Participatory Design - Volume 1 - Computation and Performance*, 2013, pp. 195-204.

Steuer, J. "Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence". In *Journal of Communication*, 42(4) (1992), pp. 73-93.

Wray, S. *Bentley Systems and Microsoft Team up on City Digital Twins, Cities Today*. 2020. Available at: https://cities-today.com/bentley-systems-and-microsoft-team-up-on-digital-twins/ [Accessed 27/01/2022].

Wonka, P. & M. Wimmer & F. Sillion & W. Ribarsky. "Instant Architecture". In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 22(3) (2003), pp. 669-677.

Yao, Z. & C. Nagel & F. Kunde & G. Hudra & P. Willkomm & A. Donaubauer ... & T.H. Kolbe. "3DCityDB-a 3D Geodatabase Solution for the Management, Analysis, and Visualization of Semantic 3D City Models Based on CityGML". In *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1) (2018), pp. 1-26.

Yang, S. & H. Kim. "Urban Digital Twin Applications as a Virtual Platform of Smart City". In *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 12(4) (2021), pp. 363-379.

Zhang, H. & K. Xu & W. Jiang & J. Lin & D. Cohen-Or & B. Chen. "Layered Analysis of Irregular Facades via Symmetry Maximization". In *ACM Trans. Graph*., 32(4) (2013), pp. 1-13.

Zhang, X. & A. Shehata & B. Benes & D. Aliaga. "Automatic Deep Inference of Procedural Cities from Global-scale Spatial Data". In *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems (TSAS)*, 7(2) (2020), pp. 1-28.

Zhu, W. *3D Modeling of City Building and Lifecycle Simulation*. Doctoral Dissertation, Compiègne, 2017.

77. Dublin's digital twin

۷۸. نک:

S. Wray, *Bentley Systems and Microsoft Team up on City Digital Twins, Cities Today.*

79. Digital Twin for Flood Resilience in Helsinki

۸۰. نک:

R. Mankowski, "City-scale Digital Twins for Flood Resilience".

81. Digital Twin Hong Kong Science Park

۸۲. نک:

Bentley systems, "A Digital Replica for Hong Kong Science Park".

83. Seoul Digital Twin

۸۴. نک:

Smart City Korea, "Seoul City Builds the Nation's First Urban Problem Solving Simulation 'Digital Twin S-Map'".

85. real-time

86. Python

87. Google Earth

88. Level Of Detail (LOD)

89. open source

90. Metavers