مهندسی عمران شریف (بهار ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۷۹-۸۵، (پژوهشی)

Original Article

ارائه‌ی چارچوبی برای ارتقاء تعامل ذینفعان با مدل چهاربعدی پروژه‌های خطی با استفاده از واقعیت افزوده و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

خشایار غراب (کارشناس ارشد)
حسین تقدس * (دانشیار)
پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه در صنعت ساخت‌وساز باعث دید یکسان بین ذینفعان پروژه می‌شود. به طور سنتی برای مشاهده‌ی برنامه‌ی زمان‌بندی از اسناد کاغذی استفاده می‌شود و ذینفعان به‌سختی درک عمیقی از آن پیدا می‌کنند. در حال حاضر، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) کمک شایانی به ذینفعان پروژه برای پیدا کردن درک عمیق‌تر از برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه می‌کند. در پروژه‌ی حاضر، با ایجاد ارتباط مستقیم بین مدل BIM و مدل واقعیت افزوده (AR) توسط یک پایگاه داده‌ی ابری، چارچوبی برای ارتقاء تعامل ذینفعان با مدل چهاربعدی پروژه ارائه شده است. تفاوت پژوهش حاضر با مطالعات پیشین، بررسی و مقایسه‌ی مدل چهاربعدی چارچوب پیشنهادی با مدل چهاربعدی BIM در پروژه‌های خطی است. روش مذکور در یک مطالعه‌ی موردی خط لوله‌ی آب پیاده‌سازی و بازخوردهای مثبتی از مصاحبه با تیم مشاور پروژه گرفته شد. همچنین مشخص شد که با رفع موانع موجود، روش اشاره شده می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب برای درک بهتر برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه استفاده شود.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، واقعیت افزوده (AR)، مدل چهاربعدی، کنترل پروژه، خط لوله‌ی آب.

ghorab@ut.ac.ir
htaghaddos@ut.ac.ir

۱. مقدمه

در صنعت ساخت‌وساز، داشتن یک برنامه‌ی زمان‌بندی دقیق، نقش اساسی در موفقیت پروژه دارد. به‌طور سنتی، مدیران پروژه از نمودارهای گانت برای تجسم توالی فعالیت‌های ساخت‌وساز استفاده می‌کنند که باعث تعامل ذینفعان با برنامه‌ی زمان‌بندی می‌شود. نمودار گانت، یک روش مدیریت پروژه است که مجموعه‌یی از فعالیت‌ها را با کمک یک سری میله در یک جدول زمانی نمایش می‌دهد. ذینفعان پروژه برای پیدا کردن درک عمیق از اسناد کاغذی، مانند نقشه‌های دوبعدی برنامه‌ی زمان‌بندی گانت چارت تلاش زیادی می‌کنند که اغلب منجر به نقص در طراحی و دوباره‌کاری در ساخت‌وساز می‌شود. گلپرور فرد (۲۰۰۶) گزارش داد که بیشتر جلسه‌های پروژه، صرف توضیح و توصیف منطق تصمیم‌گیری اسناد اخیر می‌شود.[۱] یکی از روش‌ها برای رفع مشکل اخیر و بهبود تعامل ذینفعان با برنامه‌ی زمان‌بندی، استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)[۱] است.

۱.۱. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)

مفهوم مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به سال ۱۹۶۲ باز می‌گردد، زمانی که انگلبارت[۲] فرضیه‌یی از سیستم مبتنی بر رایانه ارائه کرد.[۲] بعد از آن، استیمن[۳] و همکاران (۱۹۷۴) کمبودهای نقشه‌های دوبعدی را بررسی و یک سیستم توصیف ساختمان (BDS)[۴] مبتنی بر رایانه را ایجاد کردند که توصیف هندسی، مکانی و خصوصیات عناصر مختلف یک ساختمان را به یک مدل سه‌بعدی واقعی پیوند می‌داد. سیستم BDS به‌عنوان یک بانک اطلاعاتی، اطلاعات هر عنصر ساختمان و ارتباط آن با سایر اجزاء موجود در ساختمان را در خود نگهداری می‌کند که در طول طراحی، ساخت، و بهره‌برداری استفاده می‌شود. علاوه بر این، در صورت نیاز به تغییر نقشه‌ها به‌طور خودکار به‌روزرسانی می‌شود.[۳] سیستم طراحی‌شده‌ی BDS، راه را برای مفهوم مدل‌سازی اطلاعات ساختمان هموار کرد، این اصطلاح برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ معرفی شد.[۴]

BIM در حقیقت یک فرایند به‌منظور حمایت از فنّاوری است که در آن تیم‌های معماری و مهندسی به طور همزمان به منظور توسعه‌ی یک مدل ساختمان مشترک و یکپارچه کار می‌کنند. BIM الگوی سنتی صنعت ساخت‌وساز را از سیستم‌های

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۳/۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۶/۲۷، پذیرش ۱۴۰۰/۸/۱۵.
DOI:10.24200/J30.2021.57862.2962

اطلاعاتی طراحی مبتنی بر دوبعدی به سیستم‌های اطلاعاتی مبتنی بر المان‌های سه‌بعدی تغییر داده است.[۵] مدل سه‌بعدی BIM براساس نیاز پروژه در سطح توسعه (LOD)[5] مناسبی طراحی می‌شود. هر یک از LOD های مذکور، الزام‌های محتوایی خاص برای هر المان را در هر مدل از پروژه مشخص می‌کند که در LODهای بالاتر، جزئیات بیشتری از مدل نمایش داده می‌شود.

ادغام نمودارهای گانت با مدل سه‌بعدی مبتنی بر BIM، مدل چهاربعدی BIMرا می‌سازد. در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان سه‌بعدی کاربر قادر است تا مدل ساختمان را تجسم کند، اما در مدل چهاربعدی BIM علاوه بر تجسم مدل ساختمان، کاربر قادر است فرایندی پیشرفت مدل ساختمان را تجسم کند.[۶،۷] امروزه پتانسیل‌های مثبت استفاده از مدل چهاربعدی BIMبه خوبی مشخص است و به طورگسترده‌یی استفاده می‌شود. استفاده از آن امکان شناسایی برخوردهای مکانی و زمانی در ابتدای چرخه‌ی عمر پروژه را فراهم می‌کند و باعث کاهش تأخیر در زمان تحویل پروژه می‌شود.[۸]

۲.۱. تلفن همراه هوشمند

با پیشرفت فنّاوری تلفن همراه هوشمند و همه‌گیر شدن آن‌هاو توسعه‌ی مداوم برنامه‌های کاربردی[۶]، پتانسیل خوبی برای استفاده از تلفن همراه هوشمند در صنعت ساخت‌وساز به وجود آمد. ابزار اخیر علاوه بر قابلیت حمل آسان، با توجه به تجربه‌ی کاربری مناسبی که برای کاربر ایجاد می‌کند، به یک سیستم عامل نسبتاً آسان تبدیل شده است که استفاده از آن راحت است.[۹] یکی از قابلیت‌های تلفن همراه هوشمند، تکنولوژی واقعیت افزوده (AR)[7] است.

۳.۱. واقعیت افزوده

واقعیت افزوده، یک لایه‌ی مجازی در قالب متن، گرافیک، صوت را در زمان واقعی به دنیای اطراف کاربر اضافه می‌کند، به طریقی که اشیاء دیجیتالی شده با اشیاء دنیای واقعی ترکیب می‌شوند و یک دنیای فیزیکی ـ مجازی را ایجاد می‌کنند.[۱۰] سهولت استفاده و قیمت مناسب آن باعث شده است تا کاربرد واقعیت افزوده در صنعت ساخت‌وساز عملی‌تر و امکان‌پذیرتر شود. در عین حال، پتانسیل ابزارهای ذکر شده برای افزایش کارایی و بهره‌وری برای بخش‌های معماری، مهندسی و ساختمان (AEC)[8] و همچنین مدیریت تعمیر و نگهداری (FM)[9] جذاب بوده است.[۱۱] رانکوهی و واو[10] (۲۰۱۳)، نوشتاری درباره‌ی AR در صنعت AEC را بررسی و ۷ حوزه‌ی کاربردی AR را شناسایی کردند که شامل: تجسم و شبیه‌سازی، ارتباط و همکاری، مدل‌سازی اطلاعات، دسترسی به اطلاعات و ارزیابی، نظارت بر پیشرفت، تعلیم و آموزش، ایمنی و بازرسی بوده است.[۱۲]

غفارحسینی و همکاران (۲۰۱۶)، روشی را برای ادغام BIM و AR برای تسهیل هماهنگی سایت ساخت‌وساز پیشنهاد و یک برنامه‌ی کاربردی مبتنی بر AR برای بهبود بهره‌وری در ساخت‌وساز در سایت ایجاد کردند. نتایج مطالعه‌ی ایشان نشان داد که برنامه‌ی AR، عملکرد فرایندهای مدیریت موجود در سایت را بهبود می‌بخشد و به کاربر اجازه می‌دهد مدل‌های سه‌بعدی پروژه را در محیط اطراف زندگی واقعی براساس نقشه‌های سه‌بعدی بررسی کند.[۱۳]

گلپرور فرد[11] و همکاران (۲۰۰۹)، یک روش مبتنی بر تصویر را برای نظارت بر پیشرفت روزانه برای سایت ساخت‌وساز پیشنهاد دادند و با جمع‌آوری مجموعه‌ی تصاویر از سایت ساخت‌وساز، آن‌ها را به یک ابرنقطه‌ی سه‌بعدی تبدیل کردند. ابرنقطه‌ی سه‌بعدی ایجاد شده، به عنوان آنچه در سایت ساخته شده است، استفاده

جدول ۱. استفاده‌ی AR در برنامه‌ریزی قبل از ساخت در پژوهش‌های پیشین.

برنامه‌ریزی قبل از ساخت	
موارد استفاده	منابع
تشخیص برخوردها	[۱۵-۱۸]
شناسایی سریع خطاهای طراحی	[۱۵-۱۸]
بررسی ساختار در حین طراحی	[۱۵و۱۶]
نمایش مناطق مختلف سایت در مقیاس واقعی و در محل	[۱۶و۱۹]
بررسی فضاهای کاری و چک کردن محدودیت‌های مهندسی	[۲۰]
برنامه‌ریزی و تعیین توالی به صورت مجازی	[۱۲و۱۵و۱۶]
نمایش موارد ایمنی با کمک واقعیت افزوده	[۱۲و۲۱]
برنامه‌های آموزش ایمنی مبتنی بر شبیه‌سازی AR برای کارگران	[۱۲و۲۱-۲۴]

می‌شود. روش مذکور به آن‌ها اجازه می‌دهد تا مدل هندسی سه‌بعدی تولید شده را با داده‌های سه‌بعدی برنامه‌ریزی شده مقایسه کنند و براساس آن بر پیشرفت پروژه نظارت کنند. سیستم اخیر، ابزاری برای هماهنگی و کمک به ارتباطات برای پیمانکاران است.[۱۴]

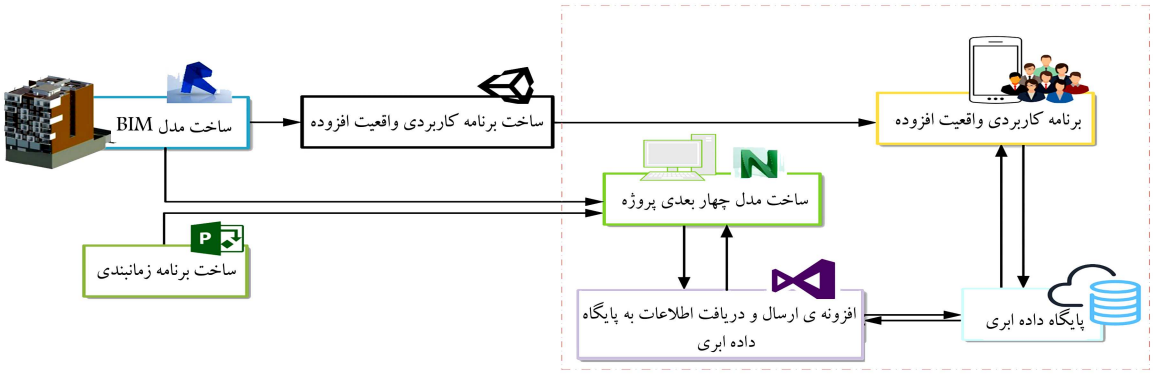
پتانسیل AR که در طول چرخه‌ی حیات یک پروژه‌ی ساختمانی می‌تواند استفاده شود، در صنعت AEC توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده است. در جدول ۱، موارد استفاده از AR در مرحله‌ی برنامه‌ریزی قبل از ساخت پروژه، که توسط پژوهشگران بررسی شده است، ارائه شده است.

همچنین ظاهر و همکاران (۲۰۱۸)، یک روش با استفاده از تلفن همراه هوشمند برای نظارت بر پیشرفت ساخت‌وساز ارائه دادند که به کاربر اجازه می‌دهد پیشرفت فعالیت‌ها را در محل پروژه با کمک یک برنامه‌ی کاربردی اندرویدی به‌روزرسانی کند. داده‌های مذکور برای به‌روزرسانی مدل چهاربعدی پروژه استفاده می‌شود. همچنین یک مدل چهاربعدی واقعیت افزوده را برای کاربر فراهم می‌کند که پیشرفت واقعی یا برنامه‌ریزی شده را نشان می‌دهد. نتایج پژوهش اخیر نشان می‌دهد که روش اخیر و روش‌های مشابه برای نظارت بر پیشرفت زمانی و هزینه‌یی پروژه‌های ساخت‌وساز مؤثر بوده است.[۲۵]

موانع زیادی نیز بر سر راه AR وجود دارد که باید قبل از استفاده از آن برطرف شوند. چالش‌های فنی که هنگام ساخت و ادغام سیستم‌های AR در رویه‌های موجود در صنعت ساخت‌وساز مشاهده می‌شود، بی‌شمار است. هاینزل[12] و همکاران (۲۰۱۷)، در مورد استفاده از AR با دو پیمانکار عمومی و یک توسعه‌دهنده‌ی نرم‌افزار مصاحبه انجام دادند. داده‌های تحلیل شده از مصاحبه‌ها نشان داد که هزینه‌ی اجرای آن به چه میزان است. ناایمنی فنّاوری، استفاده نکردن از برنامه‌های کاربردی استاندارد واقعیت افزوده و نبود اطمینان از ارزش و مزایای فنّاوری اخیر، ازجمله چالش‌هایی است که سه شرکت‌کننده‌ی مذکور به‌عنوان موانع اجرای AR در ساخت‌وسازها اعلام کردند.[۱۹]

۴.۱. خلأ پژوهشی

در پژوهش‌های پیشین، استفاده از AR و BIM به‌صورت جدا و همزمان برای بهبود برنامه‌ی زمان‌بندی صورت گرفته است. یکی از جنبه‌های نو بودن پژوهش حاضر، پیاده‌سازی آن در پروژه‌ی اجرای خط لوله‌ی آب که ماهیت خطی دارد، است. با توجه به طولانی بودن پروژه‌های خطی و عملیات اجرایی در چند جبهه‌ی کاری، نمایش مدل چهاربعدی BIM با چالش‌هایی همراه است و انعطاف‌پذیری لازم برای نمایش بخش‌های مختلف پروژه به‌صورت هم‌زمان را ندارد. لذا نیاز است مقایسه



شکل ۱. فرایند چرخش اطلاعات و متصل شدن بخش‌های مختلف چارچوب پیشنهادی.

بین مدل چهاربعدی BIM و برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده انجام شود. با توجه به پتانسیل‌های بیان شده و موانع موجود برای ایجاد درک عمیق‌تر از برنامه‌ی زمان‌بندی، در پژوهش حاضر سعی شده است با کمک BIM و AR، یک روش نوین برای تسهیل روند نظارت بر برنامه‌ی زمان‌بندی و نمایش پیشرفت پروژه‌های خطی، مانند اجرای خط لوله‌ی آب، ارائه شود.

۲. چارچوب پیشنهادی

در بخش کنونی، به معرفی چارچوب پیشنهادی پرداخته شده است. در شکل ۱، چارچوب کلی و نحوه‌ی چرخش اطلاعات آن مشاهده می‌شود. در ابتدا، برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه وارد مدل BIM می‌شود و یک مدل چهاربعدی از آن ساخته و سپس اطلاعات آن وارد مدل واقعیت افزوده می‌شود. کاربران قادر هستند مدل چهاربعدی را به‌صورت واقعیت افزوده ببینند و تاریخ‌های جدید را برای هر فعالیت اعمال کنند و برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه را به‌روزرسانی کنند. پایگاه داده‌ی ابری[۱۳] به‌عنوان متصل‌کننده‌ی بخش‌مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده استفاده می‌شود. بخش خط‌چین شده در چارچوب پیشنهادی، یک سیستم پویاست، که با برنامه‌ریزی اولیه شروع می‌شود و با کنترل پروژه، زمان‌بندی پروژه در طول ساخت بهبود می‌یابد و به‌روزرسانی می‌شود. در ادامه، به توضیح هر یک از ماژول‌های چارچوب پیشنهادی پرداخته شده است.

۱.۲. ماژول مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

مفهوم مدل‌سازی اطلاعات ساختمان درکلیه‌ی چرخه‌ی حیات پروژه استفاده می‌شود و به‌عنوان یک پایگاه داده، اطلاعات را از مرحله‌ی طراحی، ساخت تا بهره‌برداری و نگهداری مدیریت می‌کند. در ابتدا یک مدل BIM در نرم‌افزار Autodesk Revit ساخته می‌شود. سپس مدل BIM ساخته شده وارد نرم‌افزار Autodesk Navisworks Manage می‌شود و در آنجا با کمک افزونه‌ی[۱۴] TimeLiner، برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه به آن متصل و یک مدل چهاربعدی از پروژه ساخته می‌شود. مدل چهاربعدی مذکور، شامل اطلاعات تاریخ شروع و پایان هر فعالیت و شماره‌ی شناسایی المان‌های[۱۵] (کلید اصلی برای ارتباط بین مدل BIM و AR) هر فعالیت است. با کمک افزونه‌ی جدیدی که در پژوهش حاضر برای نرم‌افزار Autodesk با زبان C# توسعه داده شده است، اطلاعات اخیر در پایگاه داده‌ی ابری ذخیره شده است، تا در برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده استفاده شود.

۲.۲. ماژول واقعیت افزوده

فنّاوری واقعیت افزوده، یکی از فنّاوری‌های نوین است، که با سرعت زیادی در حال پیشرفت است. شرکت‌های بزرگی، مانند: گوگل، ماکروسافت، اپل و ... روی پژوهش و توسعه‌ی فنّاوری واقعیت افزوده سرمایه‌گذاری کرده‌اند. در پژوهش حاضر، برای ساخت برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده از بسته‌ی توسعه نرم‌افزاری Vuforia و نرم‌افزار موتور بازی‌سازی Unity استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا مدل سه‌بعدی BIM با فرمت FBX وارد نرم‌افزار Unity و سپس بسته‌ی توسعه‌ی نرم‌افزاری Vuforia به آن اضافه شده است.

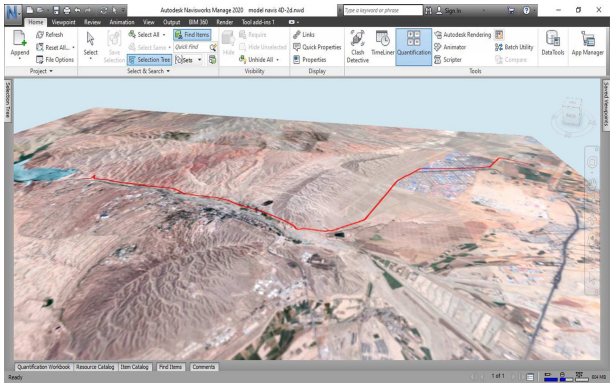
برای نمایش مدل واقعیت افزوده در محیط اطراف، نیاز به یک عکس هدف است. برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده پس از اسکن کردن عکس هدف، مبدأ مختصات را در محیط اطراف شناسایی می‌کند و مدل واقعیت افزوده را در محیط اطراف نمایش می‌دهد. شماره‌ی شناسایی هر المان در Unity در اسم آن وجود دارد و اسکریپت‌های[۱۶] مربوط به برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده با متصل شدن به پایگاه داده، اطلاعات مربوط به هر المان را مشخص می‌کنند، تا مدیریت المان‌ها انجام شود. همچنین با استفاده از رابط کاربری ایجاد شده، کاربران قادر هستند اطلاعات مربوط به تاریخ فعالیت‌ها را اصلاح کنند، تا برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه به‌روزرسانی شود.

۳.۲. ماژول‌پایگاه داده‌ی ابری

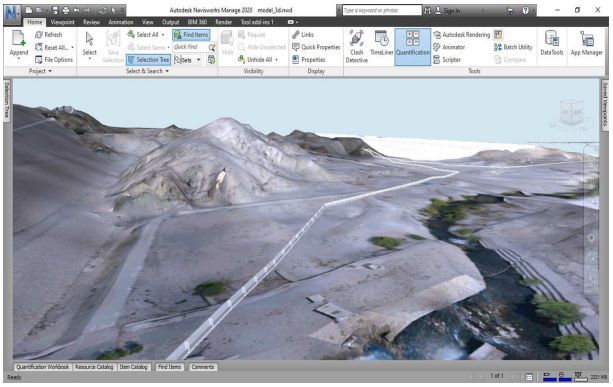
پایگاه داده برای ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، برای انتقال اطلاعات بین مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده از یک پایگاه داده‌ی ابری، که یک پایگاه داده‌ی phpMyAdmin است، استفاده شده است. زمانی که به سمت سرور درخواستی ارسال می‌شود، سرور با کمک زبان PHP دستورها را اجرا و با پایگاه داده‌ی phpMyAdmin ارتباط برقرار می‌کند و داده‌ها را بازخوانی و یا اضافه می‌کند.

۳. مطالعه‌ی موردی

در بخش حاضر، به پیاده‌سازی و ارزیابی چارچوب پیشنهادی در یک مطالعه‌ی موردی پرداخته شده است. مطالعه‌ی موردی انجام شده، پروژه‌ی طرح انتقال آب از سد ماملو[۱۷] به نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند(شهدای پاکدشت) بوده است که یکی از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های حرارتی کشور و شهرک صنعتی عباس‌آباد است و ماهیت



شکل ۲. مدل BIM پروژه با سطح LOD۱۰۰.



شکل ۳. مدل BIM پروژه با سطح LOD۲۰۰.

خطی داشته و در منطقه‌ی حفاظت‌شده‌ی پارک ملی خجیر در شرق تهران واقع شده است. پروژه‌ی اخیر، شامل عملیات اجرایی ساخت ۲۲ کیلومتر خط لوله‌ی انتقال آب، ۲ مخزن متعادل‌کننده، ۵۲ حوضچه‌ی شیر هوا و شیر کنترل دبی آب، اتاق شیرآلات سد، و ساختمان بهره‌برداری بوده است.

مدل BIM آن در دو سطح توسعه‌ی LOD۱۰۰ و LOD۲۰۰ ساخته شده است. برای نمایش نقاط هدف[۱۸]، همان‌طورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، از مدل BIM با سطح توسعه‌ی LOD۱۰۰ استفاده شده است. در مدل مذکور، المان‌های مربوط به لوله‌های آب و ترانشه‌یی که برای آن ایجاد شده است، مدل‌سازی شده است. با توجه به طولانی بودن پروژه و کوچک بودن المان‌ها نسبت به کل پروژه، ابعاد عرضی و ارتفاعی المان‌ها با مقیاس بزرگ‌تری طراحی شد تا وضوح بیشتری داشته باشند. برای توپوگرافی منطقه از یک تصویر دوبعدی از نقشه‌ی Google map استفاده شده است. دلیل ساخت مدل اشاره شده با سطح توسعه‌ی LOD۱۰۰، کاهش حجم مدل است، تا مدل بهینه‌تری به‌دست آید و تجربه‌ی واقعیت افزوده‌ی مناسب‌تر و روان‌تری ایجاد شود.

برای نمایش پیشرفت فعالیت‌ها مطابق شکل ۳ از مدل BIM با سطح توسعه‌ی LOD۲۰۰ استفاده شده است. توپوگرافی پروژه از تصاویری که داده‌های ارتفاعی دارند و با پهپاد[۱۹] از سطح پروژه‌ی برداشت شده ساخته شده است. عکس‌های گرفته‌شده وارد نرم‌افزار Autodesk Infra Works شدند و توپوگرافی دقیقی از پروژه به‌دست آمد. مدل BIM اخیر، حجم بیشتری نسبت به مدل قبلی دارد؛ اما با توجه به اینکه در مرحله‌ی کنونی، جبهه‌های کاری کوچک‌تری از پروژه در برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده نمایش داده می‌شود، مشکلی در تجربه‌ی واقعیت افزوده پیش نمی‌آید.

مدل‌های مذکور وارد نرم‌افزار Unity شدند و با توجه به بزرگ بودن آن‌ها، مقیاس مدل‌ها کوچک‌تر شد تا به ابعاد مناسبی برسند. سپس آن‌ها به عکس هدف تخصیص داده شدند و هدف به‌عنوان مبدأ مختصات در محیط اطراف دنیای واقعی کاربر استفاده شده است. همچنین برای مدیریت المان‌ها و متصل کردن برنامه‌ی کاربردی به پایگاه داده‌ی ابری، اسکریپت‌هایی به زبان c# نوشته شده است.

برای ارزیابی روند عملکرد برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده در جلسه‌یی با تیم مشاور پروژه از آن‌ها خواسته شد از چارچوب ارائه شده استفاده و تاریخ‌های آن را بازبینی کنند. ابتدا برنامه‌ی کاربردی به پایگاه داده‌ی ابری متصل و اطلاعات مربوط به نقاط هدف و فعالیت‌ها، از جمله تاریخ و شماره‌ی شناسایی المان‌های مربوط به آن‌ها بازخوانی شد. سپس عکس هدف، اسکن و مدل واقعیت افزوده به‌صورت یک لایه‌ی دیجیتال نمایش داده شد و با کمک لغزنده‌ی پایین صفحه، پروژه به‌صورت هفتگی جلو رفت و یک مدل چهاربعدی از پروژه نمایش داده شد. با پیشرفت پروژه، المان‌ها با توجه به شماره‌ی شناسایی و تاریخ‌های مربوط به خود نمایش داده شدند.

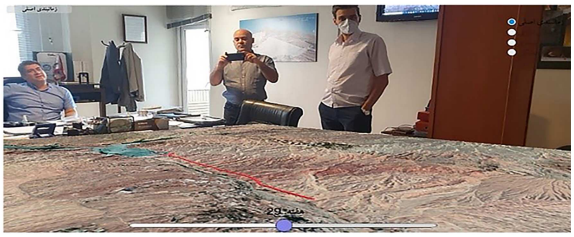
تیم مشاور در بخش حاضر با کمک مدل چهاربعدی واقعیت افزوده، اِشراف بهتری به زمان‌بندی اصلی پروژه پیدا کرد و با توجه به واقعیت‌های پروژه با تغییر تاریخ‌ها سعی کردند تاریخ‌ها را واقع‌بینانه‌تر کنند (شکل ۴). برای مثال، در یک سناریو با توجه به اینکه جانمایی مخزن شماره‌ی یک پروژه به‌خاطر دلایل اجرایی تغییر کرده بود، خطوط لوله و شیرآلات باید مجدداً طراحی می‌شدند. این امر باعث شد تاریخ نقاط هدف لوله‌هایی که در کیلومترهای جلوتر از مخزن شماره ۲ قرار داشتند، به تاریخ‌هایی جلوتر و تاریخ نقاط هدف لوله‌هایی که در کیلومترهای قبل‌تر از مخزن شماره ۲ قرار داشتند، به تاریخ‌های عقب‌تری تغییر پیدا کنند. تغییرات ایجاد شده با کمک اسکریپت‌های نوشته شده در برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده به سمت سرور ارسال و در پایگاه داده‌ی ابری ذخیره شدند. اطلاعات اخیر با کمک افزونه‌ی اشاره‌شده وارد نرم‌افزار Autodesk Navisworks Manage شدند و برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه به‌روزرسانی و یک مدل چهاربعدی جدید از پروژه با توجه به اصلاحات انجام شده ساخته شد. از طریق این لینک و یا با اسکن کردن QRcode در شکل ۵، فیلم اجرای برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده مشاهده می‌شود.

۱.۳. تحلیل نتایج مطالعه‌ی موردی و بحث

هدف اصلی مطالعه‌ی موردی حاضر، بررسی قابلیت چارچوب پیشنهادی برای تسهیل روند نظارت بر برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه‌های خطی، مانند اجرای خط لوله‌ی آب و نمایش پیشرفت آن بوده است. با توجه به بازخورد گرفته شده از صنعت مشخص شد که برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده با رفع موانع موجود، این امکان را دارد که پشتیبان خوبی برای برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه باشد. نمونه‌ی اولیه‌ی ساخته شده از مدل چهاربعدی واقعیت افزوده‌ی پروژه، اطلاعات مربوط به برنامه‌ی زمان‌بندی را به درستی نمایش داد و باعث ایجاد دید بهتر ذینفعان پروژه شد و با کمک تغییراتی که در تاریخ نقاط هدف و فعالیت‌ها ایجاد شد، برنامه‌ی زمان‌بندی قابلیت اطمینان بیشتری پیدا کرد. در حین توسعه و پیاده‌سازی سیستم مذکور، محدودیت‌هایی نیز وجود داشت. در مطالعه‌ی موردی خاص کنونی از تلفن همراه هوشمند Samsung۱۰ S استفاده شد و در ابتدا با وارد کردن مدل با LOD۳۰۰، نتیجه‌ی مطلوبی ایجاد نشد و در بعضی مواقع در تصویر اختلال ایجاد می‌شد که با بهینه‌سازی‌هایی که روی مدل انجام شد و استفاده از سطح توسعه‌ی پایین‌تر و بخش‌بندی کردن مدل به جبهه‌های کاری مختلف، تجربه‌ی کاربری مطلوب و روانی ایجاد شد. این امر باعث شد که سیستم اشاره شده با سخت‌افزارهای موجود توانایی استفاده از LOD‌های

الف) نمایش مدل واقعیت افزوده بعد از اسکن عکس هدف؛

ب) جلو بردن لغزنده پایین صفحه و پیشرفت برنامه زمانبندی؛



ج) جلسه تیم مشاور برای تایید تاریخ نقاط هدف (LOD ۱۰۰)؛

د) جلسه تیم مشاور برای تایید تاریخ فعالیت ها (LOD ۲۰۰)؛

ه) انتخاب فعالیت برای اعمال تغییر در تاریخ ها؛

و) جلو بردن لغزنده پایین صفحه و پیشرفت برنامه زمانبندی.

شکل ۴. استفاده از برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده توسط تیم مشاور پروژه.

شکل ۵. QRcode فیلم زمان‌بندی اصلی.

بالا را نداشته باشد و یکی از نقاط ضعف سیستم مذکور به‌حساب می‌آید.

درانتها، بین مدل چهاربعدی BIM و برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده مقایسه‌یی صورت گرفت. در پروژه‌ی حاضر با توجه به طولانی بودن خط انتقال آب (۲۲ کیلومتر)، امکان نزدیک کردن دوربین به فعالیت‌ها امکان‌پذیر نبود؛ زیرا در چند جبهه‌ی کاری، پروژه در حال اجرا بود و با نزدیک کردن دوربین، فعالیت‌های دیگری در جبهه‌های کاری دیگر قابل نمایش نبود. برای نمایش کامل پروژه در مدل چهاربعدی BIM از یک دوربین با فاصله‌ی زیاد از پروژه استفاده شد که سبب شد تا جزئیات دقیقی از مدل نمایش داده نشود (شکل ۲). اما در مدل چهاربعدی واقعیت افزوده، کنترل دوربین دست کاربر است و می‌تواند در مدل حرکت کند، از زوایای مختلف به پروژه نگاه کند و به فعالیت‌های مختلف نزدیک شود تا جزئیات دقیق‌تری از آن‌ها را ببیند و دید عمیق‌تری از پروژه به‌دست آورد. همچنین با کمک لغزنده‌ی پایین برنامه‌ی کاربردی، پیشرفت زمان پروژه را کنترل کند (شکل ۴).

مزیت دیگر برنامه‌ی کاربردی اخیر این است که با گوشی‌های هوشمند در هر محلی قابل اجراست و به ساده‌ترین شکل طراحی شده است تا تمامی ذینفعان بتوانند از آن استفاده و تغییرات لازم را در آن اعمال کنند و در لحظه، مدل چهاربعدی واقعیت افزوده به‌روزرسانی شود. اما مدل چهاربعدی BIM در نرم‌افزار Autodesk Navisworks Manage نیاز به رایانه دارد و در هر محلی قابل ارائه نیست و کاربر برای اعمال تغییرات و مشاهده‌ی نتایج آن باید آموزش ببیند و یا از یک نیروی متخصص کمک بگیرد. درنهایت، با کمک نظرات تیم مشاور، جدول ۲ به‌دست آمد.

۲.۳. اعتبارسنجی

با بررسی و ارزیابی درست کارکردن بخش‌های مختلف چارچوب ارائه شده می‌توان به اعتبار آن اطمینان یافت و پیاده‌سازی آن در یک مطالعه‌ی موردی و تمرکز بر عملکرد سیستم، خود اعتبارسنجی سیستم مذکور به‌حساب می‌آید. در طول توسعه‌ی سیستم ارائه شده، بازخوردهایی از صنعت ساخت‌وساز، به طور خاص ازکارشناسان، ذینفعان و کاربران نهایی آن گرفته شد و سیستم مذکور، اصلاح و بازنگری شد تا از اثربخشی آن اطمینان به‌عمل آید.

درمطالعه‌ی موردی حاضر، اجزاء مختلف بررسی شدند و با بازخوردهای مثبتی که از تیم مشاور پروژه گرفته شد و مقایسه‌ی منطقی با آنچه مورد انتظار آن‌ها بود، راستی‌آزمایی شد. هر چند محدودیت‌هایی وجود داشت که نشان می‌دهد همچنان نیاز است با گسترش تکنولوژی واقعیت افزوده و توسعه‌ی سخت‌افزارهای قدرتمندتر و بهینه‌سازی‌های بیشتر نرم‌افزاری، تجربه‌ی کاربری مطلوب‌تر و روان‌تر شود. از دید مشاور پروژه، با وجود کاستی‌های چارچوب اشاره شده در فرایند تسهیل روند نظارت بر برنامه‌ی زمان‌بندی، چارچوب اخیر تأیید شد. فرایند ذکر شده از جوانب مختلف

جدول ۲. مقایسه بین مدل‌های چهاربعدی.

موضوع	مدل چهاربعدی BIM	مدل چهاربعدی در چارچوب پیشنهادی
سخت‌افزار	رایانه	گوشی هوشمند
نرم‌افزار	نیاز به خرید نرم‌افزار	ساخت برنامه‌ی کاربردی
راحتی استفاده	نیاز به آموزش و یا نیروی متخصص	طراحی آسان برنامه‌ی کاربردی و استفاده‌ی راحت تمامی ذینفعان
میزان تجسم	منعطف پذیر نبودن دوربین	مشاهده‌ی کاربر از زوایای مختلف به پروژه
سطح LOD	توان پردازش بیشتر و LOD های بالاتر	توان پردازش کمتر و LODهای پایین‌تر
محدودیت نمایش المان‌ها	عدم مشاهده‌ی جزئیات دقیق المان‌ها با توجه به فاصله‌ی زیاد دوربین از المان‌ها	مشاهده‌ی جزئیات دقیق المان‌ها در ابعاد درست با نزدیک کردن دوربین به المان‌ها
توسعه دادن	نیاز به توسعه‌ی مدل BIM	نیاز به توسعه‌ی برنامه‌ی کاربردی واقعیت افزوده علاوه بر توسعه‌ی مدل BIM

به پروژه نگاه می‌کند و در چند مرحله، برنامه‌ی زمان‌بندی را بهبودیافته و واقع‌بینانه می‌سازد.

۴. نتیجه‌گیری

با پیشرفت روزافزون تکنولوژی در دنیا نیاز است که تکنولوژی‌های جدید وارد صنعت ساخت‌وساز شوند، تا با کمک آن‌ها به جای روش‌های سنتی، بهره‌وری بیشتری در صنعت ساخت‌وساز به وجود آید و ضایعات کاهش پیدا کنند. در پژوهش حاضر سعی شده است با کمک تکنولوژی واقعیت افزوده و ادغام آن با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، روند نظارت بر برنامه‌ی زمان‌بندی و نمایش پیشرفت پروژه‌های خطی، مانند اجرای خط لوله‌ی آب تسهیل یابد. بر این اساس، برنامه‌ی کاربردی توسعه داده شده برای مطالعه‌ی موردی حاضر، توانست علاوه بر داشتن مدل چهاربعدی، مزیت دیگری را برای تیم مشاور پروژه ایجاد کند و به یک برنامه‌ی زمان‌بندی قابل اطمینان دست یابند. این چارچوب یک سیستم پویاست که با برنامه‌ریزی اولیه شروع می‌شود و با کنترل پروژه، زمان‌بندی پروژه در طول ساخت بهبود می‌یابد و به‌روزرسانی می‌شود.

سیستم مذکور در انواع پروژه‌های ساخت‌وساز قابلیت پیاده‌سازی دارد و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی چارچوب اخیر در دیگر پروژه‌ها پیاده‌سازی شود. در حین پژوهش، محدودیت‌هایی مانند ضعف‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری واقعیت افزوده وجود داشت که با پیشرفت تکنولوژی و به وجود آمدن دستگاه‌های قدرتمندتر برای تجربه‌ی واقعیت افزوده، مشکل‌های ایجاد شده از بین می‌روند و در مطالعات آتی می‌توان از دستگاه‌هایی مانند هولولنز ۲[20]، که متعلق به شرکت ماکروسافت[21] است، استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود سیستم ارائه‌شده به‌طور گسترده در پروژه استفاده شود تا علاوه‌بر مشاور، ذینفعان دیگر پروژه از جمله کارفرما و پیمانکار نیز بتوانند سیستم مذکور را ارزیابی کنند.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از حمایت‌های مرکز تحقیق و توسعه‌ی تکنولوژی‌های نوین ساخت (تکنوسا) دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه تهران و همچنین شرکت مهندسی مشاور عمران فرآب که ما را در انجام پژوهش حاضر یاری رساندند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

پانوشت‌ها

1. building information modeling (BIM)
2. Engelbart
3. Eastman
4. building description system (BDS)
5. level of development (LOD)
6. application
7. augmented reality (AR)
8. architecture, engineering, and construction (AEC)
9. facilitie management (FM)
10. Rankohi & Waugh
11. Golparvar-Fard
12. Heinzel
13. cloud database
14. plugins
15. element ID
16. script
17. mamloo dam
18. milestone
19. Drone
20. HoloLens 2
21. Microsoft

منابع (References)

1. Golparvar Fard, M. “Assessment of collaborative decision-making in design development and coordination

meetings", Doctoral dissertation, University of British Columbia (2006).

2. Antunes, R. and Poshdar, M. "Envision of an integrated information system for project-driven production in construction", *In Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Evolving Lean Construction Towards Mature Production Management Across Cultures and Frontiers*, Chennai, India, pp. 134-143 (2018).
3. Eastman, C. "An outline of the building description system", Research Report, Pittsburgh, PA: Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon University, No. 50 (1974).
4. Van Nederveen, G.A. and Tolman, F.P. "Modelling multiple views on buildings", *Automation in Construction*, **1**(3), pp. 215-224 (1992).
5. Arayici, Y., Coates, P., Koskela, L. and et al. "Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice", *Automation in Construction*, **20**(2), pp. 189-195 (2011).
6. Khanzode, A., Fischer, M. and Reed, D. "Case study of the implementation of the lean project delivery system (LPDS) using virtual building technologies on a large healthcare project", *Proceedings 13th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC-13*, Sydney, Australia, pp. 153-160 (2005).
7. Smith, P. "BIM & the 5D project cost manager", Procedia-Social and Behavioral Sciences, **119**, pp. 475-484 (2014).
8. Staub-French, S. and Khanzode, A. "3D and 4D modeling for design and construction coordination: issues and lessons learned", *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, **12**(26), pp. 381-407 (2007).
9. Hakkarainen, M., Woodward, C. and Rainio, K. "Mobile augmented reality for building and construction", *In Proceedings of the Mobile World Conference Barcelona*, pp. 4-6 (2010).
10. Milgram, P. and Kishino, F. "A taxonomy of mixed reality visual displays", *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, **77**(12), pp. 1321-1329 (1994).
11. Golparvar-Fard, M., Pena-Mora, F. and Savarese, S. "Integrated sequential as-built and as-planned representation with D 4 AR tools in support of decision-making tasks in the AEC/FM industry tools in support of decision-making tasks in the AEC/FM industry", *Journal of Construction Engineering and Management*, **137**(12), pp. 1099-1116 (2011).
12. Rankohi, S. and Waugh, L. "Review and analysis of augmented reality literature for construction industry", *Visualization in Engineering*, **1**(1), pp. 1-18 (2013).
13. Ghaffarianhoseini, A., Doan, D., Zhang, T. and et al. "Integrating Augmented Reality and Building Information modelling to Facilitate Construction Site Coordination", *In Proceedings of the 16th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, Hong Kong (2016).
14. Golparvar-Fard, M., Pena-Mora, F. and Savarese, S. "D4AR-a 4-dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection, processing and communication", *Journal of information technology in Construction*, **14**(13), pp. 129-153 (2009).
15. Dias, J.M.S., Capo, A.J., Carreras, J. and et al "A4D: augmented reality 4D system for architecture and building construction", *Proceedings of CONVR 2003, 3rd International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, Virginia Tech, pp. 71-76 (2003).
16. Wang, X., Love, P.E., Kim, M.J. and et al. "A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality", *Automation in Construction*, **34**, pp. 37-44 (2013).
17. Danker, F. and Jones, O. "Combining augmented reality and building information modelling-An industry perspective on applications and future directions", *Proceedings of the 32nd eCAADe Conference, Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering and Environment, Newcastle upon Tyne*, England, UK, Newcastle, 2, pp. 525-536 (2014).
18. Meza, S., Turk, Z. and Dolenc, M. "Measuring the potential of augmented reality in civil engineering" *Advances in Engineering Software*, **90**, pp. 1-10 (2015).
19. Heinzel, A., Azhar, S. and Nadeem, A. "Uses of augmented reality technology during construction phase", *In: The 9th International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-9), Revolutionizing the Architecture, Engineering and Construction Industry through Leadership, Collaboration and Technology*, Dubai, United Arab Emirates (2017).
20. van Berlo, L., Helmholt, K.A. and Hoekstra, W. "C2B: augmented reality on the construction site", *In: Proceedings of the 9th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (conVR2009)*, pp. 295-304 (2009).
21. Wang, X. and Dunston, P.S. "Design, strategies, and issues towards an augmented reality-based construction training platform", *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, **12**(25), pp. 363-380, (2007).
22. Akyeampong, J., Udoka, S.J. and Park, E.H. "A hydraulic excavator augmented reality simulator for operator training", *In Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM Society*, Istanbul, Turkey, pp. 1511-1518 (2012)
23. Kivrak, S. and Arslan, G. "Using augmented reality to facilitate construction site activities", in Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering, Springer, pp. 215-221 (2019).
24. Park, C.S. and Kim, H.J. "A framework for construction safety management and visualization system", *Automation in Construction*, **33**, pp. 95-103 (2013).
25. Zaher, M., Greenwood, D. and Marzouk, M. "Mobile augmented reality applications for construction projects", *Construction Innovation*, **18**(2), pp. 152-166 (2018).