

طراحی نرم‌افزاری نوین جهت کنترل هندسی در ساخت پل‌های بتنی صندوقه‌ای پیش‌ساخته به روشی طرح متعادل

مهدی خوش برش ماسوله؛ محمد فلاح

چکیده

عدم دسترسی به نرم‌افزارهای تجاری خارجی پایش هندسی صندوقه‌ها در پروژه‌های پل‌سازی و نبود برنامه رایانه‌ای مناسب جهت انجام پایش هندسی این قطعات در داخل کشور، طراحی و پیاده‌سازی یک برنامه با دقت مطلوب در کشور، از ضرورت بسیاری برخوردار است. همچنین، طراحی یک برنامه بومی جهت کنترل هندسی در ساخت پل‌های بتنی صندوقه‌ای پیش‌ساخته به روش طرح متعادل، با توجه به توسعه روش طرح متعادل در پل‌سازی کشور، نقش بسیار مؤثری در ارتقای دقت و کاهش هزینه‌های مدل‌سازی پایش هندسی دارد. مهم‌ترین ارزش‌افزوده این طرح پیشنهادی، تولید یک نرم‌افزار بومی و عدم نیاز به خرید نرم‌افزارهای مشابه خارجی است. همچنین عدم نیاز به ناظر نقشه‌بردار جهت محاسبات زیاد و وقت‌گیر به روش دستی یکی دیگر از ارزش‌های افزوده این طرح است. بعلاوه، مهم‌ترین مزیت این نرم‌افزار کاهش زمان محاسبات اعداد تنظیم و خودکارسازی روند کنترل هندسی در مرحله تولید و نصب صندوقه‌ها نسبت به محاسبات دستی، است. دستاورد این طرح تحقیقاتی در زمینه امکان‌پذیر کردن پایش هندسی صندوقه‌های پیش‌ساخته در کشور و برای پروژه‌های ساخت پل‌های بتنی صندوقه‌ای پیش‌ساخته به روش طرح متعادل که در کشور مورد توجه است، مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرد. همچنین، نتایج تجربی و نظری طرح‌شده در این پروژه منجر به دستیابی به دانش جامع‌تری در زمینه تصحیح هندسی صندوقه‌های پیش‌ساخته و کاهش قابل توجه خطاها و هزینه‌ها در فرآیند طراحی و ساخت خواهد شد. در این تحقیق، ۲ روش بر اساس تبدیل سیستم مختصات جهانی و محلی مبتنی بر ماتریس کسینوس‌های هادی و تجزیه زاویه انحراف مسطحاتی و ارتفاعی به منظور محاسبه اعداد تنظیم صندوقه و مختصات جهانی پلیت‌ها، طراحی و پیاده‌سازی شده است. بر اساس نتایج، روش دوم نسبت به روش اول دارای بهبود حدود ۲۰ درصد در آفست و بهبود ۱۰ درصد در لاین برای چهار دهانه شامل ۵۲ صندوقه، می‌باشد. بر اساس نتایج روش دوم، با توجه به محاسبه زوایای انحراف به صورت تجزیه‌شده برای سمت راست، مرکز و چپ صندوقه، مقادیر آفست دارای بهبود قابل توجهی می‌باشند.

کلید واژه‌ها: مسیریابی پل، صندوقه پیش‌ساخته، نرم‌افزار کنترل هندسی، پایش دقت.

Design of a Novel Geometric Control Software for Concrete Segmental Cantilever Bridges

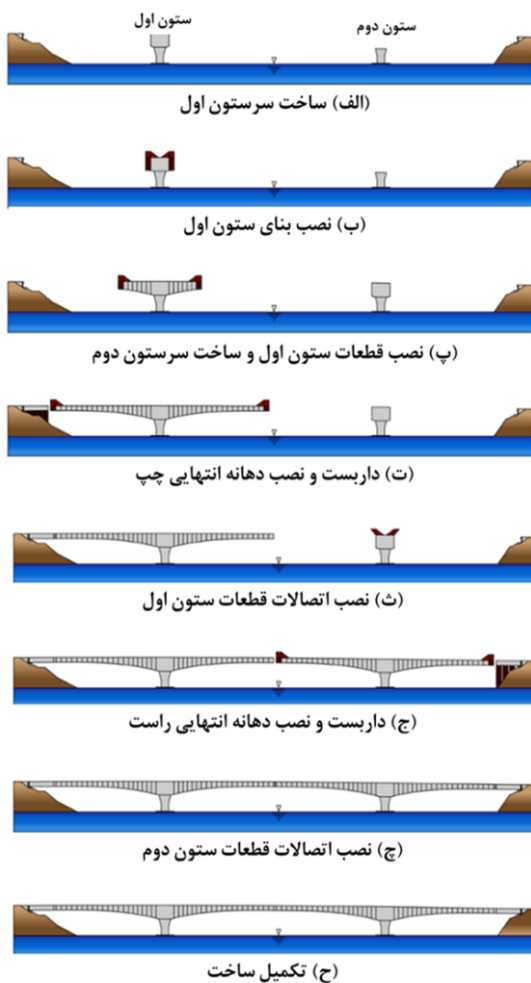
Abstract

The lack of access to foreign commercial software for geometric monitoring of segments in bridge construction projects and the lack of a suitable computer program to perform geometric monitoring of these parts inside the country, it is very necessary to design and implement a computer program with the desired accuracy. Designing a native computer program for geometric control in the construction of precast segmental concrete bridges using the balanced cantilever method, considering the development of the balanced cantilever method in the country's bridge construction, has a very effective role in improving the accuracy and reducing the costs of geometric monitoring modeling. The most important added value of this proposed plan is the production of native software and no need to buy similar foreign software. Also, not needing a surveyor supervisor for many time-consuming manual calculations is another added value of this design. In addition, the most important advantage of this software is reducing the time of calculation of adjustment numbers and automating the process of geometric control in the stage of production and installation of segments compared to manual calculations. The achievement of this research project in the field of enabling the geometric monitoring of precast segments in the country and for the construction projects of precast segmental concrete bridges using the balanced girder method, which is of interest in the country, is widely used. The experimental results proposed in this project will lead to the achievement of more comprehensive knowledge in the field of geometric correction of precast segments and a significant reduction of errors and costs in the design and construction process. In this study, two approaches have been designed and implemented based on the transformation of the global and local coordinate systems and based on the matrix of direction cosines and the analysis of plane and height deflection angles in order to calculate the segment adjustment numbers and the global coordinates of the plates. Based on the results, the second method compared to the first method has about 20% improvement in offset and 10% improvement in line. Based on the results of the second method, according to the calculation of deviation angles in a decomposed way for the right, center and left side of the segment, the offset values have a significant improvement.

Keywords: Routing Bridge, Precast Segment, Geometric Control Software, Accuracy Monitoring.

۱. مقدمه

روش، استفاده از پایه‌های موقت اجتناب‌ناپذیر است. پس از نصب هر قطعه عملیات تثبیت صندوقه در موقعیت نصب خود انجام می‌پذیرد و این فرآیند تا تکمیل تمام دهانه‌ها به صورت متوالی و تدریجی تکرار می‌شود. این سیستم برای پل‌هایی با دهانه‌های تا ۲۵۰ متر نیز استفاده شده است. مهم‌ترین مسئله در تولید صندوقه‌ها در کارخانه، تنظیم کردن قطعه مچ جهت تولید قطعه بعدی می‌باشد [۵]. در این مرحله، کنترل هندسی با ابزارهای نقشه‌برداری مبتنی بر تعیین مختصات یکی از مهم‌ترین راهکارها برای کنترل تطابق قطعات می‌باشد. اگر فرآیند نقشه‌برداری در ساخت صندوقه‌ها با دقت مطلوب صورت نگیرد، قطعات از نظر موقعیت ارتفاعی، لاین و آفست طبق اعداد تنظیم (که توسط نرم‌افزار پیشنهادی محاسبه می‌گردد) ثابت نمی‌شود و باعث عدم تطبیق دو عرشه خواهد شد. بنابراین، طراحی نرم‌افزار پایش هندسی قطعات مهم‌ترین بخش واحد تولید و نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته می‌باشد.



شکل (۱). نمای کلی از توالی مراحل ساخت پل‌های بتنی پیش‌ساخته بر اساس روش طره متعادل با استفاده از قالب شاریو [۴]

با توسعه فناوری‌های محاسباتی در پروژه‌های ساخت‌وساز در زمینه مهندسی عمران، پل‌های پیش‌ساخته بتنی صندوقه‌ای به دلیل عملکرد مطلوب به‌طور گسترده‌ای در طراحی و ساخت پل مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. انواع پل‌ها از نظر مواد سازنده به ۶ دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند. نوع اول، پل‌های چوبی هستند که به صورت قوسی شکل طراحی می‌شوند و با تیرک‌های مشبک یا حمل جهت ایجاد پل‌های موقت اجرا می‌شوند. نوع دوم، پل‌های سنگی هستند که به دلیل مقاومت بالای فشاری مصالح سنگی دارای استحکام مناسبی می‌باشند اما به دلیل محدودیت تأمین سنگ، طراحی و اجرای آن محدود است. نوع سوم، پل‌های بتنی هستند که معمولاً پل‌های طاقی شکل را شامل می‌شود و به‌عنوان جایگزین سنگ استفاده می‌شود. نوع چهارم، پل‌های بتن مسلح هستند که می‌توان برای طراحی و اجرا از مقاطع مختلف و در شکل‌های متنوع صورت بگیرد، در این نوع پل، روش پیش‌ساخته کاربرد مناسبی در حذف اجزای نگهدارنده قالب‌ها و صرفه‌جویی اقتصادی دارد. نوع پنجم، پل‌های بتن پیش‌تنیده است که در طیف وسیعی از ابنیه فنی کاربرد دارد. پل‌های بتنی پیش‌تنیده جایگزین مناسبی برای پل‌های فلزی و بتن مسلح شده است. در این نوع پل‌سازی، می‌توان دهانه‌های بزرگ را طراحی و اجرا کرد. نوع ششم، پل‌های فلزی با تیرهای حمل معمولی یا تیرهای مشبک فولادی می‌باشد. به‌طور کلی، یک دهانه به قطعات کوچک در حدود ۴ متر تقسیم می‌شود و پس از ساخت اولین قطعه، از مقطع عرضی آن به‌عنوان قالب ساخت قطعه بعدی استفاده می‌شود [۲]. در ساخت پل‌های بتنی صندوقه‌ای پیش‌ساخته، ابتدا تمام قطعات پل در کارخانه تولید صندوقه، ساخته می‌شود بدین صورت که هر قطعه تولیدی، قالب قطعه بعدی می‌باشد. پس از تولید، قطعات تولیدشده به محل پروژه حمل شده و توسط کابل‌هایی در غلاف به هم متصل می‌شوند و با جک‌هایی کشیده و سفت می‌گردند، سپس فرآیند نصب قطعات در محل اجرا با به‌کارگیری روش طره متعادل صورت می‌گیرد [۳]. در شکل (۱)، فرآیند کلی روش طره متعادل در هشت مرحله با استفاده از قالب شاریو، ارائه شده است.

بر اساس شکل (۱)، در این شیوه اجرایی ابتدا پایه‌ها و ستون‌های اصلی پل ساخته شده و قطعات عرشه به صورت متقارن از طرفین ستون‌ها در دهانه‌های پل نصب می‌شوند. بنابراین، اصول کلی در این سیستم نصب متقارن قطعات عرشه و تکمیل نهایی عملیات اجرایی احداث پل است. در روش طره متعادل عموماً در میانه دهانه‌ها نیاز به اجرای قطعه‌ای واسط به صورت درجا وجود خواهد داشت که این قطعه پس از قالب‌بندی و بتن‌ریزی، صندوقه‌های طرفین دهانه را به یکدیگر متصل می‌نماید. به قطعه واسط میانی در اصطلاح قطعه کلید گفته می‌شود. در صورت به‌کارگیری این

۲. پیشینه تحقیق

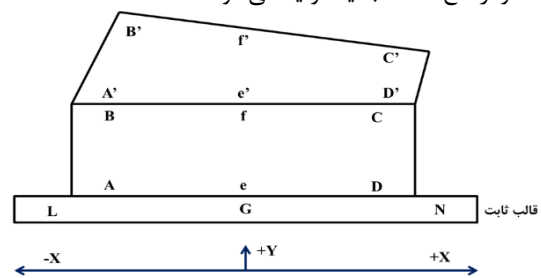
در این بخش، مروری بر روش‌ها و تحقیق‌های پیشین در زمینه پایش هندسی پل‌های صندوقه‌ای صورت گرفته است. فرآیند بررسی و مقایسه روش‌ها بر اساس مزایا و معایب از نظر هزینه محاسباتی و نحوه اجرای روش، صورت گرفته است. از دهه ۱۹۵۰ طراحی و ساخت پل‌های جاده‌ای در سیستم راه و شهرسازی توسعه بسیاری یافت، به نحوی که در اغلب کشورهای توسعه‌یافته از نظر علم راه‌سازی ایجاد یک چهارچوب برای طراحی پل‌های جاده‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. اولین نمونه از یک پل پیش‌ساخته بتنی به صورت پس‌کشیده در سال ۱۹۶۲ برای قرارگیری پل بر روی رودخانه سن فرانسه طراحی و ساخته شد. در طی این سال‌ها، به دلیل گسترش مسیرهای ارتباطی جاده‌ای در مسیرهای زمینی و یا عبور وسایل نقلیه از رودخانه‌ها، طراحی و ساخت پل‌های پیش‌ساخته بتنی با مقطع جعبه‌ای توسعه بسیاری پیدا کرده است. همچنین، به کارگیری روش‌های پیش‌تیندگی در ساختمان پل‌ها بخصوص در پل‌های طره‌ای با توجه به طول بلند دهانه و محدودیت ارتفاعی، روش ساخت پل‌های پیش‌تینده جعبه‌ای یکی از مناسب‌ترین روش‌ها است و به عنوان جایگزین پل‌های فلزی و بتن مسلح معرفی شده‌اند. اما در فرآیند طراحی و تولید صندوقه‌ها در پل‌ها، یکی از گام‌های مهم، فرآیند کنترل هندسی صندوقه به منظور تولید با دقت مطلوب در هندسه مناسب با توجه به طرح مسیر می‌باشد.

پایش هندسی پل رودخانه کلمبیا در پورتلند بین سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۲، یکی از پروژه‌های بزرگ پل‌سازی ایالات متحده آمریکا بوده است که شامل ۲ پل موازی هر یک به عرض ۷۵ فوت (۲۳ متر) است. فرآیند ساخت پل‌ها هم به صورت بتن‌ریزی در محل و هم به صورت پیش‌ساخت، صورت گرفته است. این پروژه با به کارگیری محاسبات رایانه‌ای، فرآیند پایش هندسی را در ۲ دسته طبقه‌بندی کرده است. این روش‌ها شامل: روش Long-Line (مبتنی بر بتن‌ریزی در محل) و Short-Line (مبتنی بر قطعات پیش‌ساخته) می‌باشد [۶]. این تحقیق، شروعی بر مبحث کنترل هندسی قطعات پل‌های پیش‌ساخته می‌باشد. در سال‌های اخیر، با توسعه سریع ساخت‌وساز اقتصادی در چین، صنعت پل‌سازی چین وارد مرحله توسعه سریع شده است. در طی این سال‌ها پل‌های بزرگی مبتنی بر ساخت‌وساز اقتصادی، ساخته شده است که در ساخت پل در آینده در راستای استانداردسازی و صنعتی‌سازی تولید قطعات توسعه پیدا خواهد کرد. مونتاژ و مونتاژ ساختاری یک پل

اولین قطعه‌ای که روی ستون قرار می‌گیرد را صندوقه صفر می‌نامند که توسط قالب جداگانه‌ای ساخته می‌شود. به منظور تولید قطعات بعدی طبق نقشه از قطعه قبلی استفاده می‌شود. قالب تولید صندوقه شامل یک ماسک ثابت و دو قالب کناری می‌باشد. یک قالب تونلی هم برای ایجاد فضای خالی درون صندوقه داخل قالب قرار داده می‌شود. طرف دیگر قالب، صندوقه تولیدشده قبلی می‌باشد که Match Segment نامیده می‌شود. به قطعه میانی که با استفاده از این قالب، بتن‌ریزی و تولید می‌شود Cast Segment گفته می‌شود.

کنترل هندسی از آن جهت اهمیت دارد که هرگونه انحراف بیش از حد مجاز، منجر به انحراف پل از امتداد اصلی و عدم اتصال دقیق قطعات بین دهانه‌ها می‌شود. این خطاها زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که قوس‌های افقی و قائم در مسیر پل وجود داشته باشد. بنابراین محاسبه دقیق و تصحیح این خطاها در مرحله تولید و نصب قطعات از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد. هدف از این پژوهش طراحی و تولید نرم‌افزاری جهت کنترل هندسی در فرآیند تولید و نصب قطعات پل‌های بتنی صندوقه‌ای با ابزارهای نقشه‌برداری می‌باشد. به این منظور، بر روی هر قطعه، شش پلیت وجود دارد که در قسمت بتن‌ریزی این پلیت‌ها را روی قطعه تولیدی قرار می‌گیرد که این شش پلیت شامل چهار پلیت ارتفاعی و دو پلیت آفستی است که دو پلیت در قسمت شمالی و دو پلیت در قسمت جنوبی قطعه قرار داده شده و با این چهار پلیت، ارتفاع قطعه تنظیم می‌شود و دو پلیت در وسط قطعه قرار می‌گیرد. سپس، با دو پلیت لاین (x) و آفست (y) قطعه تنظیم می‌شود.

بر اساس شکل (۲)، شش پلیت تعریف‌شده، عبارت‌اند از: A', B', C', D' پلیت‌های ارتفاعی و e', f' پلیت‌های مربوط به لاین و آفست هستند. لاین، آفست و ارتفاع معادل مختصات سه‌بعدی می‌باشند که هر کدام دارای قسمت clc (محاسباتی) و obs (مشاهداتی) می‌باشند. بخش محاسباتی از طریق میانگین‌گیری و طبق عدد تنظیم به دست می‌آید و مقدار مشاهداتی از طریق قرائت دوربین نقشه‌برداری به دست می‌آید. همچنین، علاوه بر شش نقطه روی صندوقه Match، سه نقطه ثابت روی قالب ثابت که با حروف L، G و N نام‌گذاری شده است. در مجموع با این ۹ نقطه، تنظیم صندوقه Match در سه جهت لاین، آفست و ارتفاع جدید تولید می‌شود.



شکل (۲). جانمایی پلیت‌های لاین، آفست و ارتفاع در صندوقه و قالب ثابت [۵]

صندوقه‌های پیش ساخته، استفاده از سیستم شش نقطه کنترل است که در طیف وسیعی از پروژه‌های ساخت پل‌های بتنی پیش ساخته مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصول این روش مبتنی بر اندازه‌گیری مسطحاتی و ارتفاعی شش نقطه کنترل بمنظور تنظیم قالب در راستای مناسب با توجه به طرح مسیر است. در روش شش نقطه کنترل، یک محور با مختصات مسطحاتی براساس اندازه‌گیری دو نقطه کنترل در وسط صندوقه با استفاده از دوربین توتال استیشن، تعریف می‌شود. مقادیر عددی مختصات برای تعریف محور مسطحاتی براساس مختصات نقاط اتصال در مرحله طراحی در نظر گرفته می‌شود [۱۱-۱۷]. در مرحله بعد، دو محور ارتفاعی در سمت چپ و راست صندوقه براساس اندازه‌گیری با دوربین ترازیب روی قطعه تعریف می‌شود تا بتوان شیب طولی و عرضی مناسب را به صندوقه اعمال کرد. در روش شش نقطه کنترل، هریک از نقاط کنترل دارای مختصات سه‌بعدی هستند که نیازمند یک تبدیل سیستم مختصات می‌باشند. مختصات نقاط اتصال صندوقه‌ها که برای تعریف محور مسیر تعیین می‌شود در یک سیستم مختصات جهانی است، بنابراین با بکارگیری ماتریس کسینوس‌های هادی می‌توان این مختصات با سیستم جهانی را به محلی (سیستم مختصات کارخانه) تبدیل کرد تا تنظیم صندوقه‌ها در موقعیت فضایی صحیح در قالب تولید صورت بگیرد [۱۸-۲۱].

۳. روش پیشنهادی

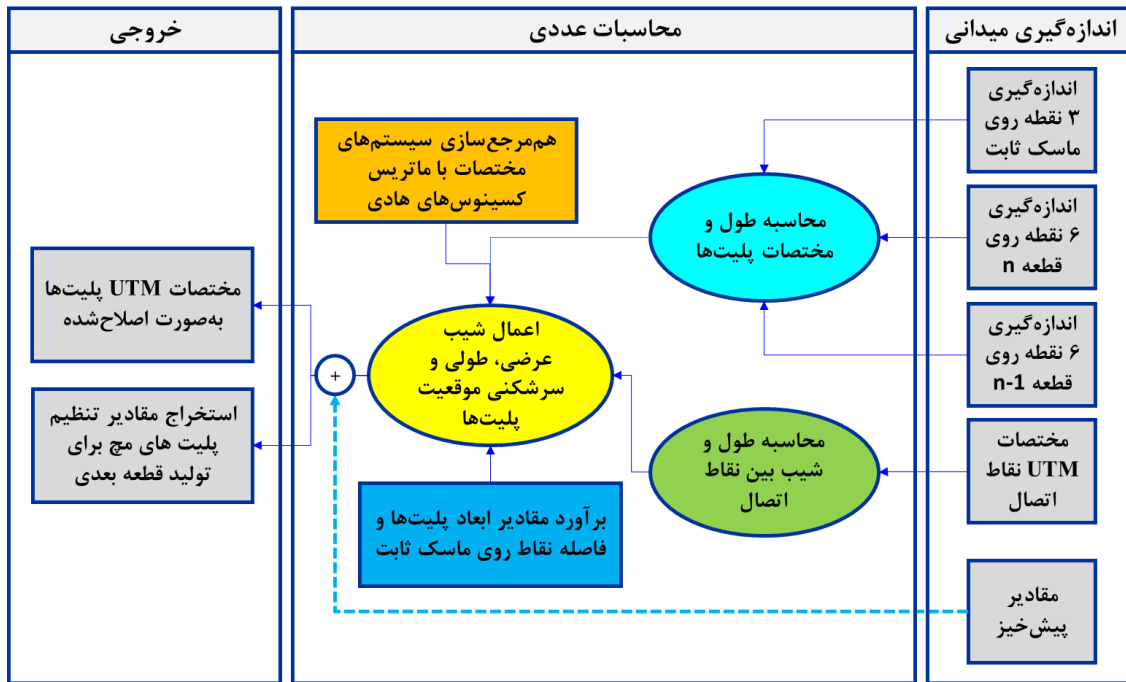
در این بخش، ابتدا فلوجارت ۲ روش پیشنهادی ارائه می‌شود و سپس اصول محاسبات در روش‌های پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳.۱. فلوجارت روش‌ها

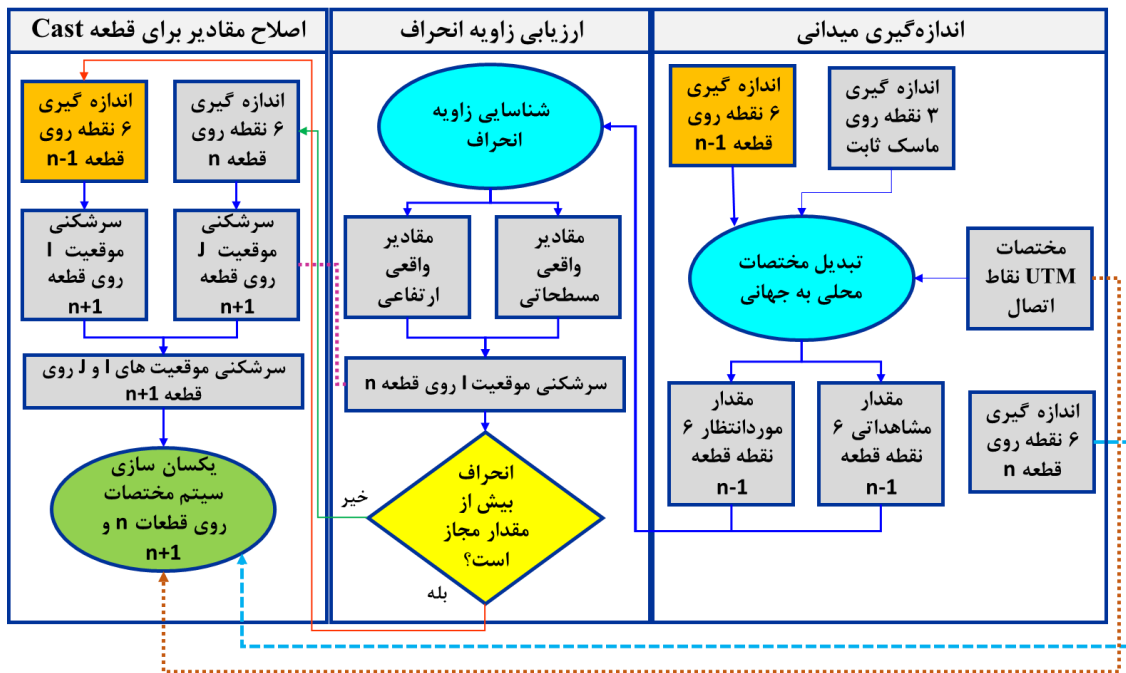
در روش‌های پیشنهادی، اساس کار مبتنی بر محاسبه زاویه انحراف مسطحاتی و قائم به‌منظور تنظیم قطعه مچ با استفاده از ۳ پلیت جلویی صندوقه می‌باشد. در پروژه حاضر، داده‌های ورودی شامل برداشت مختصات از ماسک ثابت و نقاط اتصال در سیستم مختصات UTM نیز می‌باشند. فرآیند مدل‌سازی و پیاده‌سازی روش اول و دوم در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

بتنی براساس سازوکار تجهیزات ساختمانی پل بتنی پیش ساخته به روش خط کوتاه که توسط قطعات بتنی پیش ساخته در کارخانه از طریق اتصال قابل اعتماد مونتاژ می‌شود، دارای ویژگی‌هایی مانند نیاز محدود به محوطه در فرآیند نصب، سرعت ساخت سریع، دقت کنترل بالا و تاثیر ترافیکی کم در زیر پل است. پس از عملیات تولید صندوقه در کارخانه، تجهیزات تولید را می‌توان مجدداً استفاده کرد. مواد مصرفی کمتر، صرفه‌جویی در منابع و هزینه‌ها، فرآیند مکانیزاسیون درجه بالا، صرفه‌جویی در نیروی کار از جمله دیگر مزیت‌های استفاده از روش تولید قطعات پیش ساخته است. از آنجایی که سازه دهانه پل به چندین تیر صندوقه‌ای از کل دهانه تقسیم می‌شود تا یک گروه تیر صندوقه‌ای را تشکیل دهد، روش ساخت نیازمند دقت بالایی در کار ساخت و ساز است. نحوه کنترل رابطه موقعیت بین تیرهای صندوقه‌ای در کل فرآیند ساخت و ساز به فناوری کلیدی ساخت پل پیش ساخته خط کوتاه تبدیل شده است [۷].

شرکت IDS بین سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ بر روی توسعه یک نرم افزار کنترل هندسی بمنظور پایش و تحلیل تولید صندوقه‌های پیش ساخته فعالیت کرده است [۸]. تولید نرم افزار شرکت IDS مبتنی بر بکارگیری روش خط کوتاه برای کنترل دقیق هندسه صندوقه‌ها برای ساخت پل‌های بتنی صندوقه‌ای پیش ساخته است. هدف از توسعه این نرم افزار بهبود فرآیند محاسبات کنترل هندسی و اصلاح روش خط کوتاه به جهت کاهش خطاهای تولید قطعه جدید می‌باشد. در همین راستا و در کشور هند، فرآیند ارزیابی روش خط کوتاه برای بهبود تولید صندوقه‌هایی با هندسه مناسب تر برای مسیرهای مستقیم و قوس ها در سال ۲۰۰۸ مورد مطالعه قرار گرفته است [۹]. در این مطالعه، توسعه محاسبات رایانه ای بمنظور کاهش محاسبات دستی موردنظر بوده است. در سال ۲۰۲۱، یک روش توسعه یافته از الگوی خط کوتاه برای تولید صندوقه‌هایی با دقت مناسبتر در کشور چین صورت گرفته است. اساس این روش مبتنی بر تعریف زوایای انحراف براساس مختصات های سه بُعدی نقاط اتصال صندوقه‌ها می‌باشد. در این روش، مختصات های نقاط کنترل بصورت ثنوری توسط طراح مسیر ارائه شده است [۱۰]. یکی از مهم ترین روش‌های کنترل هندسی



شکل (۳). فلوجارت طراحی و پیاده‌سازی روش پیشنهادی اول



شکل (۴). فلوجارت طراحی و پیاده‌سازی روش پیشنهادی دوم

۲.۳. اصول محاسبات

در روش پیشنهادی، فرآیند کنترل هندسی قطعه تولیدی، شامل شش گام به شرح زیر می‌باشد:

گام اول: براساس طراحی پروفیل مسیر، مختصات جهانی در نقاط کنترل در قطعه مچ (قطعه قبلی) پیش از آنکه قسمت قالب

جدید نصب شده باشد، تعیین می‌شود. این کار را می‌توان با استفاده از مختصات طراحی دال در نقطه ارتباطی و معکوس تصویر انحراف پس از تولید قطعه مچ انجام شود. برای مثال، مختصات جهانی در نقطه A در قطعه مچ به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۴]:

$$\begin{aligned} W_x &= u_y v_z - u_z v_y, W_y = u_z v_x - \\ &u_x v_z, W_z = u_x v_y - u_y v_x \end{aligned} \quad (10)$$

گام پنجم: تمام مختصات نقاط کنترل از سیستم مختصات XYZ به سیستم مختصات محلی XYZ تبدیل می‌شود. برای مثال، مختصات محلی نقطه A در قسمت قطعه مچ به شکل زیر نوشته می‌شود:

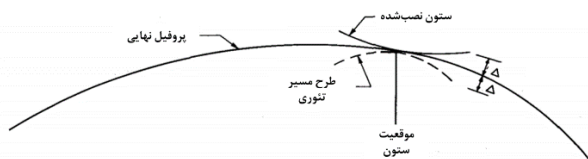
$$\begin{Bmatrix} X_{A.m} \\ Y_{A.m} \\ Z_{A.m} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \\ w_x & w_y & w_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{A.m} - X_{E.c} \\ Y_{A.m} - Y_{E.c} \\ Z_{A.m} - Z_{E.c} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

جایی که بردار $\begin{Bmatrix} X_{A.m} - X_{E.c} \\ Y_{A.m} - Y_{E.c} \\ Z_{A.m} - Z_{E.c} \end{Bmatrix}$ شامل حرکت نقطه مبدا در

سیستم مختصات جهانی در سیستم مختصات محلی است.

گام ششم: پس از هماهنگ‌سازی ۶ نقطه کنترل تعیین شده در قسمت قطعه مچ، وضعیت قطعه مچ می‌تواند تنظیم می‌شود.

مختصات سه‌بعدی نقاط کنترل (سه نقطه در اتصالات شرق-غرب و خط مرکزی) برای ایجاد سیستم محلی اتصالات استفاده می‌شود. سیستم مختصات شامل هر تصحیحی برای خمیدگی است (برخلاف خمیدگی نهایی). سیستم‌های محلی در هر اتصالی در جهت قالب (دیواره ثابت) هستند و سیستم تولید قطعه را در سیستم مختصات نشان می‌دهند. اولین قطعه، اتصال قبلی با نام ماسک متحرک (این دیوار می‌تواند قطعه قالبی دیگر بوده و به‌عنوان قطعه مچ قرار بگیرد). برای قطعه شروع‌کننده، تنظیمات شامل دو تراز ماسک متحرک (غرب و شرق)، خط مرکزی (بست‌های اتصالی) و طول خطوط شرق و غرب باشد. طراح نقشه مسیر با ارائه اطلاعات مربوط به هندسه صندوقه‌هایی که می‌بایست تولید شود، امکان ترسیم تئوری مسیر را فراهم می‌کند. در طرح مسیر تئوری مواردی مانند تغییرات زمانی و نحوه نصب، قابل توجه است که در ترسیم تئوری بر اساس مقدار پیش‌خیز در مسیر، تا حد زیادی این تغییرات اعمال می‌شود. در شکل (۵)، یک منحنی قائم از طرح مسیر تئوری ارائه شده است که با فرض اینکه فرآیند نصب مبتنی بر روش طره متعادل باشد یک مقدار دلتا (Δ) ناشی از انحراف به دلیل پیش‌تندگی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، مشخص است که انحراف به سمت پایین بوده و با مقدار پیش‌خیز مناسب، این انحراف اصلاح می‌شود.



انحراف ناشی از پیش‌تندگی Δ

شکل (۵). طرح مسیر به‌صورت تئوری بر اساس مقادیر نقشه

در شکل (۶-الف)، منحنی تئوری مربوط به طرح مسیر که قبلاً

$$X_{A.m} = X_{A.m.road} - \Delta X_{A.m.future} \quad (1)$$

$$Y_{A.m} = Y_{A.m.road} - \Delta Y_{A.m.future} \quad (2)$$

$$Z_{A.m} = Z_{A.m.road} - \Delta Z_{A.m.future} \quad (3)$$

در رابطه‌های (۱) تا (۳)، $X_{A.m}$ ، $Y_{A.m}$ و $Z_{A.m}$ بیانگر مختصات جهانی نقطه کنترل A در قطعه Match-Cast در راستای X، Y و Z است. $X_{A.m.road}$ ، $Y_{A.m.road}$ و $Z_{A.m.road}$ بیانگر مختصات جهانی نقطه کنترل A در قطعه Match-Cast بر اساس طراحی مسیر هست. $\Delta X_{A.m.future}$ ، $\Delta Y_{A.m.future}$ و $\Delta Z_{A.m.future}$ بیانگر مجموع انحرافات نقطه کنترل A در قطعه Match-Cast بعد از نصب می‌باشد.

گام دوم: تعریف مختصات نقاط کنترلی در قطعه تولیدی که برابر با مجموع طراحی مختصات مسیر در نقطه کنترلی که باعث نگرانی است و انحنایی که مقداری مخالف با مجموع انحرافات جمع آوری شده است را تعیین می‌کند. برای مثال، مختصات کنترل نقطه A در قطعه تولیدی می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$X_{A.c} = X_{A.c.road} - \Delta X_{A.c.future} \quad (4)$$

$$Y_{A.c} = Y_{A.c.road} - \Delta Y_{A.c.future} \quad (5)$$

$$Z_{A.c} = Z_{A.c.road} - \Delta Z_{A.c.future} \quad (6)$$

در رابطه‌های (۴) تا (۶)، $X_{A.c}$ ، $Y_{A.c}$ و $Z_{A.c}$ بیانگر مختصات جهانی نقطه کنترل A در قطعه تولیدی در راستای X، Y و Z است. $X_{A.c.road}$ ، $Y_{A.c.road}$ و $Z_{A.c.road}$ بیانگر مختصات جهانی نقطه کنترل A در قطعه تولیدی بر اساس طراحی مسیر هست. $\Delta X_{A.c.future}$ ، $\Delta Y_{A.c.future}$ و $\Delta Z_{A.c.future}$ بیانگر مجموع انحرافات تجمعی نقشه کنترل A در قطعه تولیدی می‌باشد.

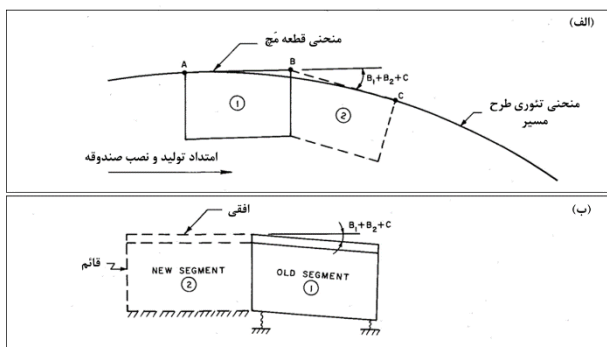
گام سوم: یک سیستم مختصات محلی با مبدا نقطه E_B در قسمت تولیدی، ایجاد می‌شود که محور x موازی با خط AC و محور y موازی خط EF در قسمت تولیدی باشد.

گام چهارم: جهت بردارهای کسینوس را در سیستم مختصات XYZ در سیستم‌های مختصات XYZ تعیین می‌شود. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{X_{C.c} - X_{A.c}}{|A_c C_c|}, u_y = \frac{Y_{C.c} - Y_{A.c}}{|A_c C_c|}, \\ u_z &= \frac{Z_{C.c} - Z_{A.c}}{|A_c C_c|} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{X_{F.c} - X_{E.c}}{|E_c F_c|}, v_y = \frac{Y_{F.c} - Y_{E.c}}{|E_c F_c|}, \\ v_z &= \frac{Z_{F.c} - Z_{E.c}}{|E_c F_c|} \end{aligned} \quad (8)$$

$$w = u \times v \begin{vmatrix} i & j & k \\ u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix} \quad (9)$$



شکل (۷). فرآیند تنظیم صندوقه برای اصلاح خطاها در تولید

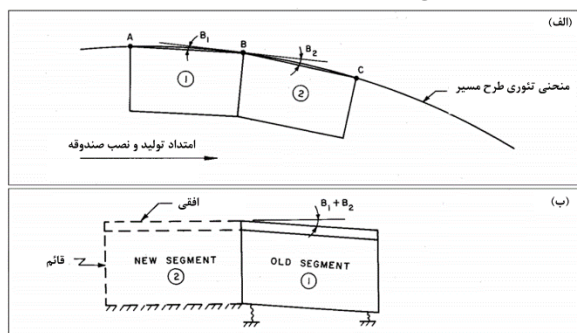
به‌منظور محاسبه زاویه انحراف می‌توان از اختلاف ارتفاع ۲ نقطه اتصال ابتدا و انتهای صندوقه (Δh) و فاصله این دو نقطه (D) استفاده کرد. به این منظور با استفاده از رابطه $B_i = asin(\Delta h/D)$ می‌توان زاویه موردنظر را برای هر صندوقه محاسبه نمود. در شکل (۸)، نمای کلی برنامه توسعه‌یافته با استفاده از اصول ریاضی ارائه شده، نشان داده شده است. در برنامه طراحی شده، فرآیند آماده‌سازی داده‌ها و پردازش در ۴ گام اجرا می‌شود. در گام اول، ابتدا از فایل مشاهدات توتال استیشن که برای هر نقطه شامل ۶ مرتبه تکرار مشاهدات است (در مجموع برای قطعه صفر ۷۲ مشاهده و برای قطعه استاندارد ۹۰ مشاهده)، داده‌های اشتباه حذف می‌شود و سپس مقدار میانگین محاسبه می‌گردد. در همین گام، مشاهدات ترازیبی نیز فراخوانی می‌شوند. در گام دوم، مختصات UTM محاسباتی مربوط به نقطه اتصال دو صندوقه متوالی فراخوانی می‌شوند. این مختصات از فایل نقشه سازه قابل استخراج می‌باشد. در گام سوم، محاسبات مربوط به اعداد تنظیم قطعه مچ جهت قرارگیری صحیح در موقعیت مناسب بمنظور بتن‌ریزی قطعه جدید، صورت می‌گیرد. نتیجه این محاسبه در قسمت 1 Result نشان داده می‌شود. لازم بذکر است در این مرحله از محاسبات ابعاد قالب براساس انواع قالب در دسترس محاسبه می‌شود. در گام چهارم، مقادیر تیرانس‌های مسطحاتی و ارتفاعی براساس مشاهدات فایل توتال استیشن و ترازیب بمنظور بررسی استانداردهای ابعاد قطعه مچ و جدید جهت خارج کردن قطعه جدید از قالب، صورت می‌گیرد. نتیجه این محاسبه در قسمت‌های 2 Result و 3 Result نشان داده می‌شود.

۴. نتایج آزمایش ۱

در این آزمایش، مختصات سه‌بُعدی قطعه Match به‌صورت مورد انتظار و مشاهداتی بر اساس مرجع [۱۵] به منظور ارزیابی نتایج، در دسترس می‌باشد. عملیات نقشه‌برداری بر روی هر یک از صندوقه‌ها بر مبنای مشاهدات دوربین توتال استیشن برای مختصات مسطحاتی و مشاهدات دوربین ترازیب برای تصحیح مختصات ارتفاعی صورت گرفته است. با توجه به اینکه برداشت نقاط در محل

بر اساس اطلاعات موقعیت نقاط اتصال ایجاد شده است را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه امکان تولید صندوقه‌ها به‌صورت منحنی وجود ندارد، با تغییر موقعیت افقی و عمودی صندوقه‌ها روی منحنی می‌توان موقعیت نهایی را تنظیم کرد. به این ترتیب، طول صندوقه‌ها روی منحنی تئوری محاسبه می‌شود تا بتوان با مماس کردن صندوقه‌ها روی منحنی تئوری، تقاطع وترها را برای تنظیم صحیح موقعیت، ترسیم کرد. سپس، بر اساس مختصات نقاط اتصال مربوط به هر صندوقه می‌توان زوایای B_1 و B_2 را از مماس‌های محلی محاسبه کرد. دو فرض در رابطه با قالب تولید صندوقه وجود دارد. در فرض اول امکان کنترل فراهم است و ماسک ثابت بدون تغییر باقی می‌ماند و امکان تولید صندوقه با شکل هندسی دقیق وجود دارد. فرض دوم مبتنی بر کامل بودن هندسه صندوقه می‌باشد که در فرآیند کنترل هندسی بسیار دارای اهمیت است.

برای تولید صندوقه جدید باید جهت فرآیند تولید و نصب را بر اساس منحنی تئوری بررسی کرد. با توجه به اینکه صندوقه ۱ قبل از صندوقه ۲ تولید می‌شود، بنابراین صندوقه ۱ در موقعیت قبل و صندوقه ۲ در موقعیت جدید قرار دارد که در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. ساختمان قالب همیشه ثابت می‌باشد، بنابراین صندوقه در موقعیت ۱ به میزان مجموع زوایای B_1 و B_2 دوران پیدا می‌کند تا در موقعیت صحیح قرار بگیرد.



شکل (۶). روش متداول تعیین موقعیت نسبی صندوقه‌ها بر اساس هندسه مطلوب

هدف از پایش فرآیند تولید صندوقه تعیین میزان و جهت حرکت یا خطای تولید می‌باشد. محاسبه میزان و جهت خطا به‌طور مستقیم بر روی منحنی تئوری بر اساس شکل (۷-الف) تعیین می‌شود. در این مورد، ارتباط واقعی بین دو صندوقه که قبلاً تولید شده‌اند منجر به این می‌شود که انتهای صندوقه ۱ بالاتر از منحنی نظری باشد، باین‌حال، به همان اندازه زیر منحنی است. بنابراین، برای اصلاح موقعیت صندوقه به منحنی تئوری در هنگام تولید صندوقه ۲، باید اصلاحی در فرآیند تنظیم صندوقه ۱ لحاظ شود، زیرا در موقعیت مچ قرار می‌گیرد. بنابراین، همان‌طور که در شکل (۷-ب) نشان داده شده است، زاویه چرخش مناسب صندوقه برابر $B_1 + B_2 + C$ است.

جدول (۳)، مقایسه خروجی برنامه نوشته شده و مقدار مرجع را نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده صحیح بودن فرآیند پیاده‌سازی جهت محاسبه زوایای انحراف می‌باشد.

جدول (۳). مقایسه نتایج بدست آمده با مقدار رفرنس

| زاویه انحراف (درجه) | | نقاط اندازه‌گیری شده |
|---------------------|---------|----------------------|
| ارتفاعی | مسطحاتی | |
| 1.551 | 1.414 | محاسبه شده |
| 1.550 | 1.418 | مرجع |

پس از محاسبه زوایای انحراف، لازم است این زوایا را به مختصات اتصال صندوقه اعمال نماییم. این فرآیند با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۶) صورت می‌گیرد.

$$X_{I_n}^* = \cos(\theta_{XZ,IJ}) (X_{I_n} - X_{J_n}) - \sin(\theta_{XZ,IJ}) (Z_{I_n} - Z_{J_n}) + X_{J_n} \quad (14)$$

$$Y_{I_n}^* = \sin(\theta_{XY,IJ}) (X_{I_n} - X_{J_n}) + \cos(\theta_{XY,IJ}) (Y_{I_n} - Y_{J_n}) + Y_{J_n} \quad (15)$$

$$Z_{I_n}^* = \sin(\theta_{XZ,IJ}) (X_{I_n} - X_{J_n}) + \cos(\theta_{XZ,IJ}) (Z_{I_n} - Z_{J_n}) + Z_{J_n} \quad (16)$$

در معادلات فوق، $(X_{I_n}^*, Y_{I_n}^*, Z_{I_n}^*)$ بیانگر مختصات‌های اصلاح شده در امتداد I و J ، مولفه I بیانگر مقادیر دوران در یک سیستم مختصات، مولفه J بیانگر مقادیر انتقال در یک سیستم مختصات است. به عنوان نمونه، ۲ مختصات اتصال شامل:

I (501645.21, 3349380.94, 1761.27)

J (501644.75, 3349381.83, 1761.28)

جهت آزمایش روابط، در نظر می‌گیریم. با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۶)، مقادیر اصلاح شده روی قطعه Cast عبارت است از:

I* (501645.19, 3349380.62, 1761.26)

کارگاه صورت گرفته است، سیستم مختصات محلی می‌باشد. مجموعه مختصات‌های برداشت‌شده از روی صندوقه‌ها، در جدول (۱) ارائه شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده در محل کارگاه و مقادیر مورد انتظار بر اساس مدل‌سازی صندوقه‌ها، گزارش شده است.

جدول (۱). مقادیر اندازه‌گیری شده و مورد انتظار بر روی قطعه اولیه در

سیستم مختصات محلی (واحد مقادیر، متر می‌باشد) [۱۵]

| اندازه‌گیری شده | مشاهداتی (T) | | | مورد انتظار در مدل‌سازی (S) | | |
|-----------------|--------------|--------|--------|-----------------------------|--------|------|
| | x | y | z | x | y | z |
| FL_{n-1} | 10.99 | -10.06 | 0.00 | 10.75 | -10.06 | 0.03 |
| FR_{n-1} | 11.20 | 9.97 | 0.00 | 11.449 | 9.95 | 0.01 |
| BL_{n-1} | 20.03 | -9.25 | -0.044 | 19.804 | -9.49 | 0.22 |
| BR_{n-1} | 20.34 | 9.30 | 0.029 | 20.571 | 9.05 | 0.29 |
| FH_{n-1} | 11.05 | -0.59 | 0.026 | 11.036 | -0.61 | 0.04 |
| BH_{n-1} | 20.14 | 0.41 | -0.01 | 20.14 | 0.17 | 0.24 |

بر اساس مختصات‌های برداشتی روی قطعه اولیه $(n-1)$ ، حال می‌توان فرآیند تصحیح مختصات اتصال قطعه بعدی (n) را محاسبه کرد. جدول (۲)، میزان تفاضل بین مقدار طراحی و مشاهداتی در صندوقه اولیه برای هر یک از نقاط ارتفاعی و مسطحاتی را بر اساس مقادیر جدول (۱)، نشان می‌دهد.

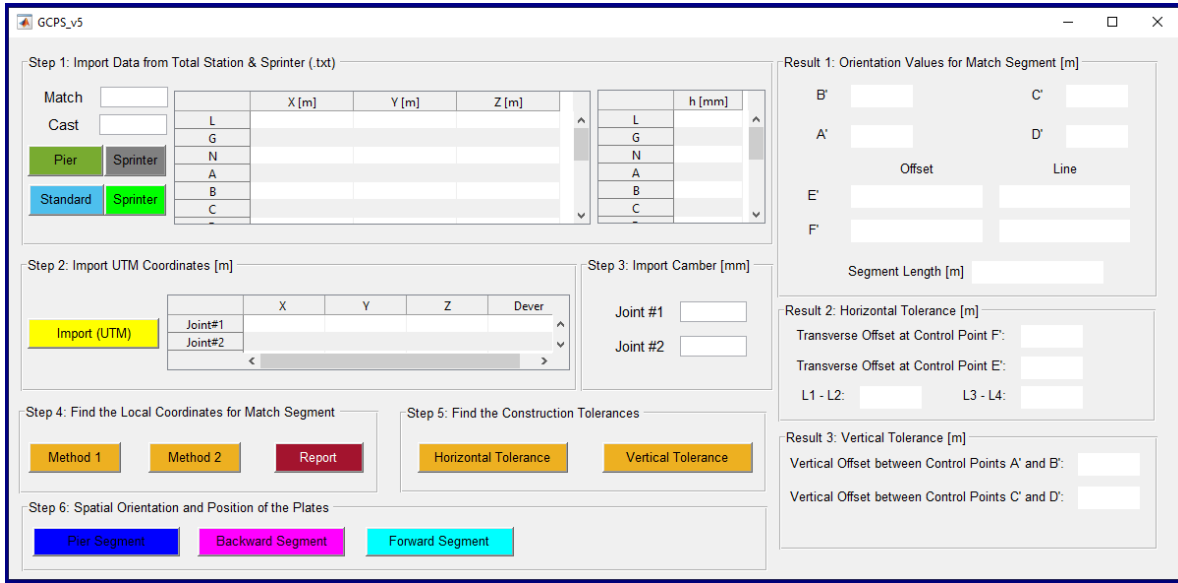
جدول (۲). تفاضل مقادیر طراحی و مشاهداتی

| خطای محاسباتی | | | نقاط اندازه‌گیری شده |
|---------------|--------|--------|----------------------|
| D_x | D_y | D_z | |
| -0.241 | -0.003 | 0.033 | FL_{n-1} |
| 0.247 | -0.022 | 0.012 | FR_{n-1} |
| -0.235 | -0.235 | -0.185 | BL_{n-1} |
| 0.223 | -0.249 | 0.264 | BR_{n-1} |
| -0.016 | -0.016 | 0.018 | FH_{n-1} |
| 0.004 | -0.241 | 0.267 | BH_{n-1} |

جهت محاسبه زاویه انحراف مسطحاتی و ارتفاعی، رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است [۱۵].

$$\theta_{xy} = \arcsin\left(\frac{y_{BH,n-1}^S - y_{FH,n-1}^S}{L_{xy,n-1}^S}\right) - \arcsin\left(\frac{y_{BH,n-1}^T - y_{FH,n-1}^T}{L_{xy,n-1}^T}\right) \quad (12)$$

$$\theta_{xz} = \frac{1}{2} \left(\arcsin\left(\frac{z_{BL,n-1}^T - z_{FL,n-1}^T}{L_{xz,n-1}^{TL}}\right) - \arcsin\left(\frac{z_{BL,n-1}^S - z_{FL,n-1}^S}{L_{xz,n-1}^{SL}}\right) + \arcsin\left(\frac{z_{BR,n-1}^T - z_{FR,n-1}^T}{L_{xz,n-1}^{TR}}\right) - \arcsin\left(\frac{z_{BR,n-1}^S - z_{FR,n-1}^S}{L_{xz,n-1}^{SR}}\right) \right) \quad (13)$$



شکل (۸). نمای گرافیکی نسخه توسعه یافته برنامه

۵. نتایج آزمایش ۲

به پروژه تقاطع غیرهمسطح اهواز استفاده شده است. نتایج عددی در جدول (۴) ارائه شده است.

در این آزمایش، جهت بررسی عملکرد برنامه در حالت وجود قطعه کلید، از داده‌های یک نیم‌دهنه شامل ۱۴ صندوقه مربوط

جدول (۴). مقایسه نتایج روش دوم و مقادیر مرجع برای دهانه SW03 (مقادیر مرجع با * نشان داده شده است، مقادیر آبی مربوط به نتایج روش دوم است، و مقادیر نارنجی مربوط به نتایج روش اول است)

| اعداد تنظیم | | | | | | | | | کد قطعه |
|-------------|--------|--------|--------|-----------|---------|-----------|---------|----------|----------------|
| A' | B' | C' | D' | Offset E' | Line E' | Offset F' | Line F' | طول قطعه | |
| 0.026 | 0.014 | -0.007 | -0.001 | 0.001 | 2.905 | -0.005 | 5.105 | 2.658 | DA_SW_03_B_07* |
| 0.005 | 0.014 | 0.009 | 0.011 | -0.002 | 2.898 | 0.013 | 5.099 | 2.645 | DA_SW_03_B_07 |
| 0.021 | 0.000 | -0.016 | -0.012 | 0.003 | 0.007 | -0.018 | 0.006 | 0.013 | تفاضل |
| 0.026 | 0.018 | 0.013 | 0.015 | 0.002 | 2.898 | -0.010 | 5.098 | 2.648 | DA_SW_03_B_07 |
| 0.000 | -0.004 | -0.020 | -0.016 | -0.001 | 0.007 | 0.005 | 0.007 | 0.010 | تفاضل |
| 0.005 | 0.009 | 0.013 | 0.009 | -0.001 | 2.889 | -0.010 | 5.089 | 2.643 | DA_SW_03_B_06* |
| -0.021 | 0.000 | 0.004 | -0.001 | 0.002 | 2.897 | -0.026 | 5.099 | 2.637 | DA_SW_03_B_06 |
| 0.026 | 0.009 | 0.009 | 0.010 | -0.003 | -0.008 | 0.016 | -0.010 | 0.006 | تفاضل |
| -0.002 | 0.004 | 0.007 | 0.003 | 0.005 | 2.897 | 0.030 | 5.097 | 2.640 | DA_SW_03_B_06 |
| 0.007 | 0.005 | 0.006 | 0.006 | -0.006 | -0.008 | -0.040 | -0.008 | 0.003 | تفاضل |
| 0.000 | 0.005 | 0.013 | 0.008 | 0.001 | 2.902 | 0.023 | 5.100 | 2.656 | DA_SW_03_B_05* |
| -0.027 | -0.011 | -0.003 | -0.003 | -0.005 | 2.898 | 0.014 | 5.097 | 2.645 | DA_SW_03_B_05 |
| 0.027 | 0.016 | 0.016 | 0.011 | 0.006 | 0.004 | 0.009 | 0.003 | 0.011 | تفاضل |
| -0.005 | -0.007 | 0.001 | 0.002 | -0.002 | 2.897 | -0.010 | 5.095 | 2.648 | DA_SW_03_B_05 |
| 0.005 | 0.012 | 0.012 | 0.006 | 0.003 | 0.005 | 0.033 | 0.005 | 0.008 | تفاضل |
| -0.005 | -0.030 | -0.009 | 0.006 | -0.001 | 2.895 | -0.011 | - | 2.649 | DA_SW_03_B_04* |
| -0.027 | -0.009 | 0.011 | 0.002 | -0.008 | 2.899 | 0.013 | 5.101 | 2.637 | DA_SW_03_B_04 |
| 0.022 | -0.021 | -0.020 | 0.004 | 0.007 | -0.004 | -0.024 | - | 0.012 | تفاضل |
| -0.005 | -0.004 | 0.016 | 0.006 | -0.005 | 2.898 | -0.010 | 5.100 | 2.640 | DA_SW_03_B_04 |
| 0.000 | -0.026 | -0.025 | 0.000 | 0.004 | -0.003 | -0.001 | - | 0.009 | تفاضل |
| -0.007 | 0.022 | 0.018 | 0.007 | -0.002 | 2.880 | -0.007 | 5.081 | 2.634 | DA_SW_03_B_03* |
| -0.026 | 0.003 | -0.008 | -0.004 | -0.004 | 2.898 | -0.001 | 5.100 | 2.645 | DA_SW_03_B_03 |
| 0.019 | 0.019 | 0.026 | 0.011 | 0.002 | -0.018 | -0.006 | -0.019 | -0.011 | تفاضل |
| -0.005 | 0.008 | -0.003 | 0.001 | 0.000 | 2.897 | 0.004 | 5.099 | 2.648 | DA_SW_03_B_03 |
| -0.002 | 0.014 | 0.021 | 0.006 | -0.002 | -0.017 | -0.011 | -0.018 | -0.014 | تفاضل |
| 0.003 | 0.011 | -0.002 | -0.008 | 0.001 | 2.867 | 0.001 | - | 2.622 | DA_SW_03_B_02* |
| -0.022 | 0.006 | 0.000 | -0.006 | -0.004 | 2.902 | 0.001 | 5.104 | 2.631 | DA_SW_03_B_02 |
| 0.025 | 0.005 | -0.002 | -0.002 | 0.005 | -0.035 | 0.000 | - | -0.009 | تفاضل |
| 0.001 | 0.013 | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 2.901 | 0.002 | 5.102 | 2.634 | DA_SW_03_B_02 |
| 0.002 | -0.002 | -0.005 | -0.008 | 0.001 | -0.034 | -0.001 | - | -0.012 | تفاضل |

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| 0.007 | -0.008 | -0.013 | -0.001 | 0.001 | 2.906 | 0.002 | 4.405 | 2.654 | DA_SW_03_B_01* |
| -0.019 | 0.000 | 0.002 | -0.004 | 0.003 | 2.902 | -0.002 | 4.402 | 2.645 | DA_SW_03_B_01 |
| 0.026 | -0.008 | -0.015 | -0.003 | -0.002 | 0.004 | -0.004 | 0.003 | 0.009 | تفاضل |
| 0.005 | 0.006 | 0.008 | 0.003 | 0.007 | 2.902 | 0.005 | 4.401 | 2.648 | DA_SW_03_B_01 |
| 0.002 | -0.014 | -0.021 | -0.004 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.004 | 0.006 | تفاضل |
| | | | | | | | | | DA_SW_03_P_00 |
| 0.001 | 0.017 | 0.025 | 0.006 | 0.001 | 2.897 | -0.002 | 4.396 | 2.651 | DA_SW_03_F_01* |
| -0.015 | 0.001 | 0.003 | 0.000 | 0.003 | 2.902 | -0.002 | 4.402 | 2.637 | DA_SW_03_F_01 |
| 0.016 | 0.016 | 0.022 | 0.006 | -0.002 | -0.005 | 0.000 | -0.006 | 0.014 | تفاضل |
| 0.009 | 0.007 | 0.009 | 0.007 | 0.007 | 2.902 | 0.005 | 4.401 | 2.640 | DA_SW_03_F_01 |
| -0.008 | 0.010 | 0.016 | -0.001 | -0.006 | -0.005 | -0.007 | -0.005 | 0.011 | تفاضل |
| 0.004 | -0.001 | 0.012 | 0.010 | 0.001 | 2.887 | 0.015 | 5.085 | - | DA_SW_03_F_02* |
| -0.011 | -0.002 | 0.014 | 0.014 | -0.004 | 2.903 | 0.009 | 5.102 | 2.645 | DA_SW_03_F_02 |
| 0.015 | -0.001 | -0.002 | -0.004 | 0.005 | -0.016 | 0.006 | -0.017 | - | تفاضل |
| 0.011 | 0.004 | 0.020 | 0.020 | -0.001 | 2.902 | -0.006 | 5.101 | 2.648 | DA_SW_03_F_02 |
| -0.007 | -0.005 | -0.008 | -0.010 | 0.002 | -0.015 | 0.021 | -0.016 | - | تفاضل |
| 0.022 | 0.029 | -0.007 | -0.020 | -0.002 | 2.876 | -0.017 | 5.079 | 2.630 | DA_SW_03_F_03* |
| -0.011 | 0.008 | 0.011 | 0.001 | -0.004 | 2.903 | -0.007 | 5.107 | 2.643 | DA_SW_03_F_03 |
| 0.033 | 0.021 | -0.018 | -0.021 | 0.002 | -0.027 | -0.010 | -0.028 | -0.013 | تفاضل |
| 0.013 | 0.016 | 0.018 | 0.009 | -0.001 | 2.903 | 0.011 | 5.106 | 2.646 | DA_SW_03_F_03 |
| 0.009 | 0.013 | -0.025 | -0.029 | -0.001 | -0.027 | -0.028 | -0.027 | -0.016 | تفاضل |
| 0.025 | 0.032 | -0.034 | -0.018 | 0.000 | 2.873 | -0.015 | 5.075 | 2.632 | DA_SW_03_F_04* |
| -0.004 | 0.031 | -0.001 | 0.004 | -0.009 | 2.899 | 0.025 | 5.103 | 2.641 | DA_SW_03_F_04 |
| 0.029 | 0.001 | -0.033 | -0.022 | 0.009 | -0.026 | -0.040 | -0.028 | -0.009 | تفاضل |
| 0.020 | 0.038 | 0.006 | 0.011 | -0.006 | 2.899 | -0.022 | 5.101 | 2.644 | DA_SW_03_F_04 |
| 0.005 | -0.006 | -0.040 | -0.029 | 0.006 | -0.026 | 0.007 | -0.026 | -0.012 | تفاضل |
| 0.008 | 0.022 | -0.021 | -0.020 | -0.002 | 2.884 | -0.003 | 5.081 | 2.637 | DA_SW_03_F_05* |
| -0.013 | 0.016 | -0.008 | -0.006 | -0.005 | 2.904 | 0.018 | 5.102 | 2.638 | DA_SW_03_F_05 |
| 0.021 | 0.006 | -0.013 | -0.014 | 0.003 | -0.020 | -0.021 | -0.021 | -0.001 | تفاضل |
| 0.011 | 0.023 | -0.001 | 0.001 | -0.001 | 2.904 | -0.015 | 5.101 | 2.641 | DA_SW_03_F_05 |
| -0.003 | -0.001 | -0.020 | -0.021 | -0.001 | -0.020 | 0.012 | -0.020 | -0.004 | تفاضل |
| 0.008 | 0.013 | -0.014 | -0.009 | 0.001 | 2.893 | -0.023 | 5.093 | 2.648 | DA_SW_03_F_06* |
| -0.011 | 0.007 | -0.004 | 0.004 | -0.001 | 2.902 | 0.004 | 5.103 | 2.643 | DA_SW_03_F_06 |
| 0.019 | 0.006 | -0.010 | -0.013 | 0.002 | -0.009 | -0.027 | -0.010 | 0.005 | تفاضل |
| 0.013 | 0.014 | 0.004 | 0.012 | 0.002 | 2.902 | -0.001 | 5.102 | 2.646 | DA_SW_03_F_06 |
| -0.005 | -0.001 | -0.018 | -0.021 | -0.001 | -0.009 | -0.022 | -0.009 | 0.002 | تفاضل |

وضعیت مجازی صندوقها بر اساس محاسبه مختصات UTM برای هر پلیت جهت بررسی شرایط نصب، تعیین می‌شوند. در شکل (۹)، مدل سازی سه‌بعدی صندوقها مربوط به دهانه‌های SW02 تا SW05 در پروژه تقاطع غیرهمسطح اهواز بر اساس محاسبات نرم‌افزار طراحی شده، ارائه شده است. زاویه هر امتداد با شمال شبکه در جهت حرکت عقربه‌های ساعت را ژیزمان (G) گویند. به‌منظور محاسبه ژیزمان هریک از امتدادها به کمک زاویه حامل (g)، لازم است ابتدا موقعیت قرارگیری هر امتداد را بر اساس مختصات نقاط اتصال تعیین شود. برای مشخص نمودن ربع مختصات به ترتیب برای ربع اول تا چهارم، از روابط (۱۷) تا (۲۰) استفاده می‌شود.

$$G_{AB} = g_{AB} \quad (17)$$

$$G_{AB} = 180^0 - g_{AB} \quad (18)$$

$$G_{AB} = g_{AB} + 180^0 \quad (19)$$

$$G_{AB} = 360^0 - g_{AB} \quad (20)$$

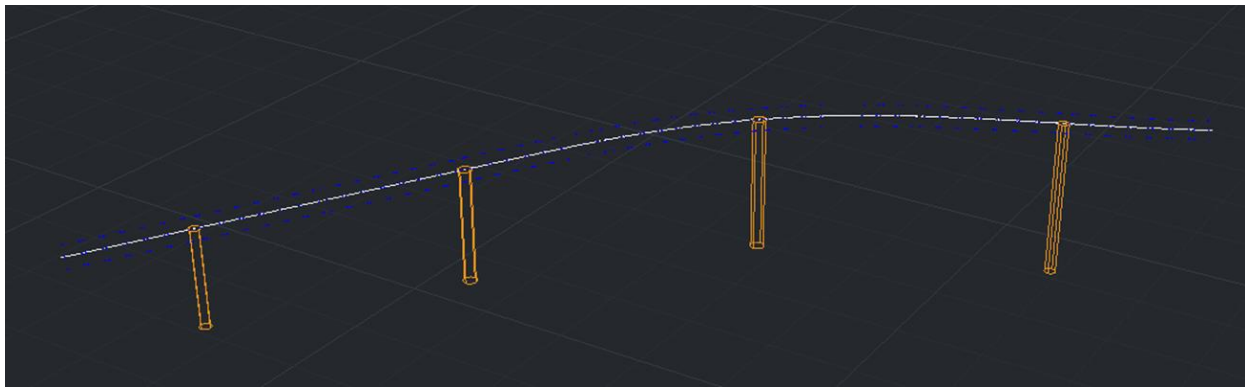
در جدول (۵)، مقایسه ای بین طول هر نیم دهانه براساس مقادیر مورد انتظار نقشه و مقادیر محاسبه شده در کارخانه و برنامه پیشنهادی ارائه شده است.

جدول (۵)، مقایسه مجموع طول‌ها در نیم دهانه‌ها براساس مقدار مورد انتظار نقشه، رفرنس کارخانه و برنامه محاسباتی

| نیم دهانه | تعداد صندوقها موجود | مقدار طول مورد انتظار نقشه | طول رفرنس کارخانه | طول محاسبه شده با برنامه |
|---------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|
| B ₁ -SW2 | 6 | 15.90 | 15.898 | 15.872 |
| F ₁ -SW2 | 6 | 15.90 | 15.809 | 15.864 |
| B ₁ -SW3 | 7 | 18.55 | 18.516 | 18.506 |
| F ₁ -SW3 | 6 | 15.90 | 15.836 | 15.687 |

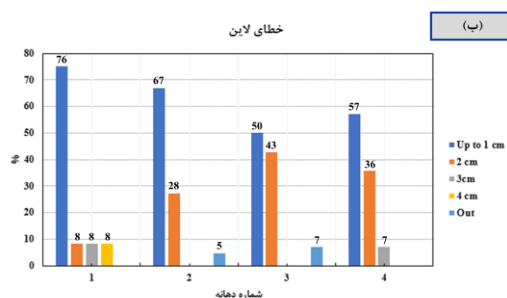
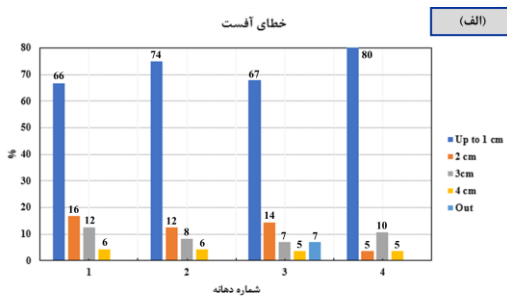
۶. ارزیابی سه‌بعدی مسیر یابی پل

در این آزمایش، بر اساس اعداد تنظیم تولید شده با استفاده از برنامه طراحی شده و مختصات UTM اتصالات صندوقها، موقعیت و



شکل (۹). مدل‌سازی سه‌بعدی پلیت‌ها برای دهانه‌های SW02 (چپ) تا SW05 (راست)

مختلف و در دهانه‌های مختلف، تعیین شده است. در دهانه SW02، خطای آفست در روش پیشنهادی به ترتیب ۹۸ درصد و ۲ درصد برای کلاس خطای یک و دو، دسته‌بندی شده‌اند. به‌علاوه، خطای لاین روش پیشنهادی به ترتیب شامل ۵۸٫۵ درصد، ۲۵ درصد، ۸ درصد، و ۸ درصد برای کلاس‌های یک تا چهار است. در دهانه SW03، خطای آفست در روش دوم شامل: ۹۲ درصد، و ۸ درصد می‌باشد و خطای لاین شامل: ۷۵ درصد، ۲۱ درصد، و ۴ درصد به ترتیب برای کلاس‌های یک تا سه است. کلاس خطاهای آفست در دهانه SW04 به ترتیب شامل: ۷۳ درصد، ۷ درصد، ۱۰ درصد، و ۷ درصد برای کلاس ۱ تا ۴ می‌باشد. همچنین، کلاس خطاهای مقادیر لاین شامل: ۵۴ درصد، ۴۳ درصد و ۳ درصد برای کلاس‌های ۱ تا ۳ است. در دهانه SW05، کلاس خطاهای آفست شامل: ۷۶ درصد، ۱۴ درصد و ۱۰ درصد برای کلاس‌های ۱ تا ۳ است اما مقادیر لاین شامل: ۶۵ درصد، ۲۱ درصد و ۱۴ درصد برای کلاس‌های ۱ تا ۳ می‌باشد. در شکل (۱۱)، یک خلاصه از مقایسه عددی خروجی برنامه توسعه‌یافته به‌منظور بررسی دقیق میزان خطای نتایج در هر یک از دهانه‌ها ارائه شده است.



جهت ارزیابی دقت مسیریابی و اعتبارسنجی خروجی برنامه، از مختصات UTM محاسباتی با داده‌های برداشتی مرحله نصب، می‌توان اختلاف مختصات پلیت‌ها را محاسبه و مقایسه نمود. در شکل (۱۰)، مقایسه‌ای بین مختصات پلیت‌های اصلاح‌شده و سگمنت‌های نصب‌شده صورت گرفته است.



شکل (۱۰). مقایسه پلیت‌های محاسباتی و مختصات نصب برای دهانه SW03. نقاط سبز مربوط به خروجی برنامه و نقاط نارنجی مختصات برداشتی مرحله نصب است

به‌منظور مقایسه نتایج، با توجه به دسترسی به مقادیر باقی‌مانده خطای مرجع در هریک از روش‌ها، می‌توان فراوانی خطاها را در بازه‌های عددی، مورد بررسی قرار داد. در رابطه (۲۱)، معادله محاسبه کلاس خطاهای مختلف بر اساس حد‌آستانه خطای محاسباتی ارائه شده است.

$$P = \frac{N_i \times 100}{M_i}, \text{ if } \begin{cases} \text{Class 1: } P \leq 1 \text{ cm} \\ \text{Class 2: } P \leq 2 \text{ cm} \\ \text{Class 3: } P \leq 3 \text{ cm} \\ \text{Class 4: } P \leq 4 \text{ cm} \\ \text{Class 5: } P \geq 5 \text{ cm} \end{cases} \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، P معادل خطای محاسباتی، N_i معادل فراوانی مقادیر تنظیم محاسباتی، M_i معادل مجموع مقادیر مشاهداتی برای هر پلیت روی یک سگمنت، می‌باشد.

بازه‌های عددی خطا شامل: کلاس خطا تا ۱ سانتی‌متر (کلاس ۱)، کلاس خطا تا ۲ سانتی‌متر (کلاس ۲)، کلاس خطا تا ۳ سانتی‌متر (کلاس ۳)، کلاس خطا تا ۴ سانتی‌متر (کلاس ۴) و کلاس خطای نامعتبر (کلاس ۵)، دسته‌بندی شده است. این دسته‌بندی به جهت بررسی دقیق میزان خطا در سگمنت‌های

شکل (۱۱). مقایسه مقادیر لاین و آفست بر اساس تعداد نمونه در ۴

دهانه به ترتیب برای دهانه‌های SW02 تا SW05

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک برنامه محاسباتی به منظور کنترل هندسی صندوقه‌های پل‌های بتنی پیش‌ساخته طراحی و تولید شده است. براین اساس، ابتدا تئوری ریاضی فرآیند کنترل هندسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. سپس، روش‌های مشابه بررسی شده‌اند. در مرحله بعد، با توجه به نیازهای پروژه اجرایی، برنامه محاسباتی کُندوییسی و توسعه یافته است. با توجه به تغییرات هندسی مسیر و ضرورت پایش شکل هندسی صندوقه‌های تولیدی، فرآیند کنترل هندسی صندوقه‌ها در یک پروژه پل بتنی یک مرحله مهم می‌باشد. بنابراین، دستیابی به اصول ریاضی مناسب جهت پردازش کنترل هندسی صندوقه‌ها با توجه به تجهیزات مورد استفاده (مانند روش تولید و قالب‌های مورد استفاده) یک گام هم در این فرآیند است. محاسبات ریاضی برای پردازش کنترل هندسی با توجه به برداشت‌های تکراری از پلیت‌های موجود در هر صندوقه یک محاسبه ریاضی با حجم بالا می‌باشد، بنابراین تولید یک برنامه محاسباتی رایانه‌ای بمنظور افزایش دقت و سرعت محاسبات ضروری است.

به منظور بررسی دقیق دستاوردهای تحقیق، سوال‌های اساسی به شرح زیر بر اساس نتایج پاسخ داده می‌شوند.

(۱) با توجه به اهمیت طراحی یک نرم‌افزار برای پایش هندسی در ساخت پل‌های بتنی صندوقه‌ای پیش‌ساخته به روش طره متعادل، خروجی این طرح آیا به دقت قابل قبول (دقت میانگین بر اساس داده‌های مورد استفاده) دست می‌یابد؟ مشکلات احتمالی چیست؟

بله، بر اساس نتایج عددی به دست آمده از آزمایش‌های تجربی طراحی شده مبتنی بر داده‌های برداشتی کارخانه تولید صندوقه، نتایج مقایسه خروجی برنامه با داده‌های مرجع، قابل قبول می‌باشد. از جمله چالش‌های مورد توجه در طراحی برنامه، یافتن روش ریاضی مناسب جهت کنترل هندسی صندوقه‌ها بوده است که در برنامه تولیدی به میزان زیادی این مشکل برطرف شده است.

(۲) مزایا و معایب روش‌های موجود برای پایش هندسی چیست؟ آیا روش Short-Line Match Casting مزایا/معایب دیگری هم دارد؟

از جمله مزیت مهم برنامه محاسباتی تولید شده که بر اساس اصلاح روش خط کوتاه یا Short-Line Match Casting طراحی شده است، می‌توان به بهبود سرعت محاسبه، تولید خودکار مختصات UTM هریک از پلیت‌ها برای مدل‌سازی مجازی پل جهت ارزیابی دقت صندوقه‌های تولیدی می‌باشد. از جمله معایب روش مورد استفاده، نیاز به داده‌های برداشتی تکراری به جهت بهبود دقت داده‌های برداشت شده است که یکی از معایب روش خط کوتاه

می‌باشد.

(۳) از نظر تئوری، تفاوت‌های پایش هندسی صندوقه‌های بتن‌ریزی در محل و پیش ساخت چیست؟

فرآیند تولید صندوقه بتنی در محل نیازمند زمان و مکان مناسب می‌باشد که با توجه به اینکه اغلب مکان‌های ایجاد پل در شهرها و مناطق پررفت و آمد است، معمولاً این چنین فضایی برای تولید صندوقه در محل وجود ندارد، بنابراین تولید صندوقه پیش‌ساخته بتنی باعث صرفه‌جویی در زمان و استفاده بهینه از فضای ساخت پل می‌شود.

(۴) از نظر تئوری، کدام خطاها اثر قابل توجهی در فرآیند پایش هندسی دارند؟

یکی از مهم‌ترین منابع ایجاد خطا مربوط به مرحله برداشت‌های مختصات هریک از پلیت‌ها توسط نقشه‌بردار است. با توجه به اینکه هریک از پلیت‌ها به صورت تکراری با استفاده از دوربین نقشه‌برداری برداشت می‌شوند، احتمال ایجاد خطا در این فرآیند بسیار زیاد است. به همین علت یک مرحله پایش خودکار در برنامه تولیدی، طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است.

۸. مراجع

- [1] S. Jung, J. Ghaboussi, and C. Marulanda, "Field calibration of time-dependent behavior in segmental bridges using self-learning simulation," *Engineering Structures*, vol. 29, no. 10, pp. 2692-2700, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.engstruct.2006.12.017.
- [2] J. Wang and Z. Fan, "Detecting of the Crack and Leakage in the Joint of Precast Concrete Segmental Bridge Using Piezoceramic Based Smart Aggregate," *Sensors*, vol. 20, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20185398.
- [3] Research and development Unit, "Necessity of Using Mapping Engineering in Segmental Bridge Construction", Shahid Rajae Professional Group.
- [4] "Balanced Cantilever Bridges - Solutions - midasBridge." <http://www.midasbridge.com/en/solutions/balanced-cantilever-bridges> (accessed Aug. 16, 2023).
- [5] Research and development Unit, "Segment Mapping: Observations", Shahid Rajae Professional Group.
- [6] N. Afshari, "Proposed Matrix Method of Control Mapping and Construction of Prefabricated Bridge Segmentas" Civil Engineering National Congress, 2013.
- [7] G. A. Rombach and R. Abende, "Bow-shaped segments in precast segmental bridges," *Engineering Structures*, vol. 30, no. 6, pp. 1711-1719, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.engstruct.2007.11.012.
- [8] © MIDAS IT Co Ltd, "Balanced Cantilever Bridges - Solutions - midasBridge." <https://www.midasbridge.com/en/solutions/balanced-cantilever-bridges> (accessed Nov. 18, 2021).
- [9] J. C. Tai and G. K. Lo, "I-205 Over Columbia River Bridge: Geometric Control for Cast-In-Place and Precast Segmental Box-Girder Construction," in *Transportation Research Record*, 1982, no. 871. Accessed: Nov. 18, 2021.
- [10] T. Qi, Y. Du, and B. Peng, "Sensitivity Analysis of Cantilever Construction Process of Long-Span Continuous V-Structure Composite Bridge," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol.

267, no. 5, p. 052045, May 2019, doi: 10.1088/1755-1315/267/5/052045.

- [11] Interactive Design Systems (IDS), "MC3D." 2007.
- [12] K. Kumar, K. Varghese, S. Nathan, and K. Ananthanarayanan, "Automated geometry control of precast segmental bridges," Jun. 2008, doi: 10.3846/isarc.20080626.88.
- [13] M. A. Mirlohi, and Y. Yavari, "Automation System and Error Correction in Geometric Calculations of Concrete Segmental Bridge (Sadr Elevated Expressway, Tehran)", National Geomatics Conference, 2014.
- [14] Huang, Dongzhou, and Bo Hu. Concrete Segmental Bridges: Theory, Design, and Construction to AASHTO LRFD Specifications. CRC Press, 2020.
- [15] B. Jia, Y. Yang, B. Xie, and X. Yu, "Novel Geometric Control Technology for Precast Segmental Bridges," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 147, no. 4, p. 04021006, Apr. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002006.
- [16] Z. Lingyu and Z. Heng, "Matching Error Adjustment of Girder Segments Precast by Short Line Match Method Based on Coordinate Transformation," 2016.
- [17] G. Rombach, "Precast segmental box girder bridges with external prestressing-design and construction." *Segmental bridges 19.2 (2002)*: 1-15.
- [18] Research and development Unit, "Necessity of Using Mapping Engineering in Segmental Bridge Construction", Shahid Rajaei Professional Group.
- [19] H. Eskandar, An investigation of the technical, economical, constructional and managerial characteristic indices of composite space structural bridge superstructures compared with the segmental prefabricated post-tensioned systems for multispan bridges with medium span lengths. University of Tehran, 2016.
- [20] M. Taghaddos, Study and application of simulation for improving urban infrastructure construction planning focused on multi-level highway projects. University of Tehran, 2015.
- [21] T. Qi, Q. Yuan, J. Guan, D. Liu, and X. Wang, "Research on Control of Precast Alignment Of Short-line Method Precast Segmental Concrete Bridges Based On The Theory Of Four-point Distance," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 510, no. 5, p. 052071, Jun. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/510/5/052071.