

## ارزیابی عملکرد و مدل‌سازی سه‌بعدی روسازی‌های بتنی بلوکی فرودگاهی تحت بار قائم با آزمایش‌های PLT و Pull-Out

منصور فخری\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

Email: fakhri@kntu.ac.ir

وحید طاهری، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

Email: v.taheri@semnaniau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱

### چکیده

یکی از مشکلات روسازی بتنی در سطوح پروازی فرودگاه‌ها، لزوم صرف وقت و هزینه زیاد تعمیر و بروز تداخل در عملیات پروازی است. یکی از راه‌حل‌ها، به‌ویژه در نواحی اپرون (توقفگاه هواپیما)، که بیشتر تحت تأثیر بار ایستایی هستند، اجرای روسازی بتنی بلوکی است. در مورد این روسازی در فرودگاه‌ها، مطالعات کمتری نسبت به راه‌ها انجام شده است. در این تحقیق کاربردی، با هدف ارائه راهکاری برای شبیه‌سازی نیروی وارده از سوی چرخ هواپیما، با آزمایش بارگذاری صفحه و همچنین تخمین پارامتر مدول یانگ رویه بلوکی به‌عنوان یک سیستم مجزا در فرایند تحلیل اجزای محدود، سعی گردید با ساخت یک مدل نرم‌افزاری سه‌بعدی و ساخت نمونه کاملی از آن به مساحت ۴ متر مربع، بررسی‌های لازم صورت پذیرد. در این نمونه، لایه‌های ساب‌گرید، زیر اساس، اساس و اساس سیمانی که بر اساس معیارهای سازمان هوانوردی فدرال (FAA) آمریکا کنترل کیفیت شده بودند، به‌علاوه رویه بلوکی از نوع UNIPAVE به ضخامت ۸ سانتی‌متر با چیدمان جناغ ماهی اجرا شد و در سامانه‌ای که در این پژوهش شامل پی صلب و قاب فولادی تکیه‌گاهی ساخته شده بود، تحت آزمایش بارگذاری صفحه در وسط سطح روسازی قرار گرفت. در فرایند مدل‌سازی سه‌بعدی اجزای روسازی، برای نخستین بار در تحقیقات مربوط به این موضوع، چندین مدل سه‌بعدی از بلوک بتنی که معرف اندازه‌های واقعی و موقعیت آنها در روسازی بود، با کمک نرم‌افزار آباکوس ساخته و تحلیل شد و سپس منحنی نیرو- تغییر مکان رسم گردید. نتیجه آن بود که می‌توان مدول یانگ رویه بلوکی را ۲۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفت تا تحلیل اجزای محدود بیشترین هماهنگی را با نتایج بارگذاری صفحه داشته باشد. نتایج آزمایش بیرون‌کشیدگی بلوک نیز نشان داد که استفاده از سیمان پرتلند در ماسه درزگیر، عملکرد آن را در حدود دو برابر در مقابل نیروی بیرون‌کشیدگی نسبت به نمونه‌ای که در مخلوط ماسه درزگیر آن از آهک استفاده شده بود، بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: روسازی بلوکی بتنی، اپرون فرودگاه، اساس سیمانی، بارگذاری صفحه، آزمایش بیرون‌کشیدگی بلوک.

## ۱. مقدمه

در اپرون<sup>۱</sup> فرودگاه ها، که محل توقف هواپیماها و سوار و پیاده نمودن بار و مسافران است، به دلیل ورود بارهای ترافیکی، که بیشتر استاتیک هستند، از روسازی بتنی استفاده می شود. عملیات ترمیم این روسازی، زمان بر و پرهزینه می باشد و در سایر عملیات پروازی اختلال ایجاد می کند. یک گزینه مناسب در این حالت، روسازی بتنی بلوکی است. یکی از مهمترین مزایای این روسازی سرعت زیاد اجرا، عدم وابستگی به دمای محیط و عدم ضرورت طی دوره عمل آوری است که در سطوح پروازی با اهمیت می باشد. روسازی بلوکی شامل بلوک های بتنی در شکل و چیدمان های مختلف است و هر بلوک با طول تقریبی ۲۰، عرض ۱۰ و ضخامت های ۵، ۶، ۸ یا ۱۰ سانتی متر در رویه آن به کار می رود. این بلوک ها که با ماسه یا مواد پلیمری درزبندی می شوند روی ۳ سانتی متر بالشتک ماسه ای<sup>۲</sup> متراکم قرار می گیرند. در زیر بالشتک ماسه ای نیز لایه های اساس یا زیر اساس سنگدانه ای یا تثبیت شده با سیمان اجرا می شود. در حالتی که وزن هواپیمای طرح بیش از ۴۵ تن باشد مطابق دستورالعمل سازمان هوانوردی فدرال<sup>۳</sup> (FAA) می بایست در زیر رویه، اساس سیمانی اجرا نمود (FAA, d, ۲۰۱۸). تا کنون بازخورد استفاده از این روسازی در نواحی که بارهای ترافیکی دارای سرعت اندک و نزدیک به بارگذاری ایستایی مانند نواحی بندرگاهی هستند، خوب گزارش شده است. بر همین اساس، در خیابان های درون شهری نیز بیش از جاده ها روی روسازی بتنی بلوکی سرمایه گذاری شده است زیرا سرعت ترافیک در خیابان های درون شهری کمتر است (ما و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین، تطابق خوب آن با فرهنگ و معماری شهرهای مختلف، آن را به یک روسازی هماهنگ با محیط زیست

تبدیل کرده است (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۹). امروزه، استفاده از انواع مواد بازیافتی و پلیمری هم در ساخت بلوک ها بسیار مورد توجه می باشد (شارما و کومار باترا، ۲۰۱۶؛ پانی و پاندا، ۲۰۱۸؛ تولاسیبای و ولایودهان، b, ۲۰۲۲). معمولاً رفتار این روسازی را شبیه روسازی های انعطاف پذیر فرض کرده اند. برای تحلیل این روسازی، دو معیار تغییر شکل دائم ناشی از شکست برشی خاک بستر به علت کرنش قائم بیش از حد مجاز، و تنش افقی زیر لایه اساس تثبیت شده، در نظر گرفته اند، به طوری که اگر زیر بلوک ها لایه های سنگریزه ای و خاکی استفاده شود، خرابی راتینگ، و اگر لایه اساس تثبیت شده زیر بلوک ها به کار رود خرابی ترک در لایه اساس تثبیت شده به عنوان معیار شکست در نظر گرفته می شود (شاکل، ۱۹۸۰). ناپتون و باربر (۱۹۸۰) با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه<sup>۴</sup> (PLT) نیرویی معادل ۵ تن روی نمونه مربع شکل روسازی بلوکی به ضلع ۲ متر، روی بالشتک ماسه ای به ضخامت ۵ سانتی متر، وارد نمودند و به این نتیجه رسیدند که کل سیستم می تواند رفتاری شبیه یک روسازی انعطاف پذیر داشته باشد. در تحقیقی دیگر، هوبن و همکاران (۱۹۸۴)، با کمک نتایج آزمایش وزنه افتان<sup>۵</sup> (FWD) در چندین مسیر بلوکی با ضخامت ۸ سانتی متر، با چیدمان جناغ ماهی و با کمک نرم افزار CIRCLY، اقدام به ارائه چارت های طراحی نمودند. در اواخر دهه ۸۰ میلادی، یکی از نخستین نرم افزارها برای طرح روسازی بلوکی، به نام LOCKPAVE، توسط کشور استرالیا ارائه گردید (ورومبوت و همکاران، ۱۹۹۲). مقدس نژاد و شادروان (۲۰۰۶) نیز برای صحت سنجی نتایج آزمایش بارگذاری صفحه ای به قطر ۳۰ سانتی متر که روی نمونه ای به شکل مربع به ضلع ۷۷ و ضخامت ۴۵ سانتی متر انجام شده بود، از نرم افزار ANSYS استفاده کردند. از نتایج مهم تحقیق فوق، وجود رابطه غیرخطی

<sup>4</sup>- Plate loading test (PLT)

<sup>5</sup>- Falling weight deflectometer (FWD)

<sup>1</sup>- Apron

<sup>2</sup>- Bedding sand

<sup>3</sup>- Federal Aviation Administration (FAA)

آن برای ساخت مدل سه‌بعدی به روش المان محدود استفاده گردید.

یکی از مشکلات روسازی بتنی بلوکی در اپرون فرودگاه‌ها، بیرون‌کشیدگی<sup>۳</sup> بلوک‌های معیوب در اثر نیروی گازهای پُرفشار خروجی از موتور هواپیما گزارش شده است. برای ارزیابی مقاومت بلوک‌ها، از این نظر که وابستگی زیادی به شکل هندسی و تعداد گوشه‌های بلوک و همچنین مشخصات مقاومتی ماسه درزگیر دارد، از آزمایش بیرون‌کشیدگی استفاده می‌شود که در آن یک میله فولادی به بلوک وصل شده و نیروی لازم برای بیرون‌کشیدگی آن را بر حسب شرایط مختلف درزبندی، از نظر مقدار پهنای درز یا مواد درزگیر، اندازه‌گیری می‌کنند (تولاسیبای و ولایودهان، ۲۰۲۲ a). مطالعات گذشته در خصوص نوع شکل هندسی بلوک‌ها نشان می‌دهد که بلوک‌هایی که بیش از چهار گوشه داشته باشند، به‌طور مثال بلوک‌های زیگزاگی یا بلوک‌های با قفل و بست کام و زبانه‌ای، مقاومت و عملکرد بهتری در این مورد دارند (تولاسیبای و همکاران، ۲۰۲۱). در تحقیقی دیگر، امیری و همکاران (۲۰۰۲)، علاوه بر بررسی تأثیر ایجاد کام و زبانه در بلوک‌ها بر مقاومت روسازی تحت بار قائم به وسیله بارگذاری صفحه‌ای، روی نمونه مربع‌شکل رویه بلوکی به ضلع ۶۰ سانتی‌متر که روی ۲ سانتی‌متر بالشتک ماسه‌ای و لایه پلی‌استر فشرده به ضخامت ۵ سانتی‌متر اجرا کرده بودند، تست بیرون‌کشیدگی را نیز انجام دادند. برای بلوک‌های مستطیلی، نیروی مربوطه ۳ کیلونیوتن و برای آنها که کام و زبانه داشتند ۲۲ کیلونیوتن ثبت شد. باید خاطر نشان کرد که آنها برای انجام تست بیرون‌کشیدگی میله فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر را به عمق ۷ سانتی‌متر داخل بتن قرار دادند. البته اعمال فشار گاز خروجی جت روی نمونه مربع‌شکل روسازی بلوکی به ضلع ۶۰ سانتی‌متر با سرعت ۱۰۰ تا ۱۳۴ مایل بر ساعت،

بین نیرو و تغییرمکان قائم بود. در مطالعه‌ای دیگر، حسینی و جمشیدی (۲۰۰۶) از نرم‌افزار SAFE<sup>۱</sup> بهره‌برداری کردند و مدل انواع چیدمان‌های روسازی بلوکی مستطیلی را به صورت سه‌بعدی ساختند و در نهایت با در نظر گرفتن کرنش قائم روی ساب‌گرید، به عنوان معیار شکست، چارت‌های تعیین ضخامت لایه اساس سنگدانه‌ای را به ازای CBR<sup>۲</sup> های مختلف خاک بستر ارائه کردند. علاوه بر نرم‌افزارهای فوق‌الذکر، نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس هم یکی از نرم‌افزارهای توانمند در شبیه‌سازی انواع سیستم‌های روسازی است. در یکی از تحقیقات انجام شده، شفابخش و همکاران (۲۰۱۴) از آن برای مقایسه نشست روسازی آسفالتی با روسازی بتنی بلوکی در شرایط یکسان استفاده کردند. در نواحی صنعتی نیز استفاده از روسازی بتنی بلوکی بسیار کارآمد بوده است. ناپتون (۲۰۰۸) جهت تهیه دستورالعملی برای روسازی بلوکی نواحی صنعتی که توسط مؤسسه INTERPAVE منتشر شد، از مدل سه‌بعدی با پلان دایره‌ای شکل با قطر ۱۲ متر و ضخامت ۶ متر که با کمک نرم‌افزار Sigma/w ساخته شده بود برای بررسی رفتار روسازی استفاده کرد. مامپیراچیچی و گوناراتنا (۲۰۱۰) نیز تحقیقی با هدف ارزیابی نقش زیرسازی در عملکرد روسازی بلوکی و انتخاب بهترین الگوی چیدمان بلوک‌ها انجام دادند. دستیابی به هدف فوق از طریق ساخت نمونه مکعبی روسازی بلوکی به ضلع یک متر و استفاده از نرم‌افزار SAP2000 صورت پذیرفت. نیشیزاوا و همکاران (۲۰۱۸) با تلفیقی از مدل‌سازی سه‌بعدی و ساخت نمونه واقعی، تحقیقی انجام دادند که در آن نمونه واقعی روسازی بلوکی در ضخامت‌های مختلف به طول تقریبی ۲۰ متر ساخته شد و در یک بازه ۱۴ ماهه تست FWD روی آن انجام شد. با نتایج این آزمایش و با روش محاسبات برگشتی، مدول الاستیک روسازی تعیین و از

<sup>3</sup> Pull-out

<sup>1</sup> Slab analysis finite element (SAFE)

<sup>2</sup> California bearing ratio (CBR)

بررسی رفتار واقعی روسازی بلوکی تحت بار قائم، در اپرون فرودگاه، نمونه ای مربع شکل به ضلع ۲ متر و شامل لایه های بلوک زیگزاگی<sup>۱</sup> با ۱۶ گوشه، بالشتک ماسه، اساس سیمانی<sup>۲</sup>، اساس و زیر اساس سنگدانه ای روی خاک بستر متراکم شده، مطابق معیارهای سازمان هوانوردی فدرال اجرا و پس از انجام آزمایش های کنترل کیفیت، تحت آزمایش بارگذاری صفحه به منظور شبیه سازی بار ایستایی چرخ هواپیمای متوقف شده روی روسازی و سپس آزمایش بیرون کشیدگی قرار گرفت. برای آزمایش بارگذاری صفحه، سامانه ای به شکل مربع و به مساحت ۱۶ متر مربع شامل فونداسیون بتنی به ضخامت ۴۰ سانتی متر و قاب فولادی به عنوان تیر تکیه-گاهی نیز ساخته شد. از آنجا که الگوی چیدمان جناغ ماهی<sup>۳</sup> در بسیاری از تحقیقات به عنوان الگوی برتر در روسازی های بلوکی معرفی شده، در این تحقیق نیز همین الگو برای چیدمان بلوک ها اجرا شد (تولاسیای و ولایودهان، ۲۰۲۲ a). در شکل ۱، روند انجام این تحقیق به طور خلاصه نشان داده شده است.

به مدت ۱ دقیقه و از درجه ای به قطر ۱۵ سانتی متر، بخش دیگری از تحقیق آنها بود. پس از انجام این آزمایش، سطح نمونه ها مورد بازرسی چشمی قرار گرفت و نتیجه نهایی آن بود که در نمونه هایی که سطح آنها با پوشش پلیمری اندود شده بود، نشانه ای از جابجا شدن بلوک ها مشاهده نگردید. به طور کلی، بررسی تحقیقات گذشته نشان می دهد که در ساخت نمونه های آزمایشگاهی، مصالح واقعی که در پروژه های فرودگاهی به کار می روند کمتر استفاده شده و بیشتر عملکرد این روسازی در معابر درون شهری مورد توجه قرار گرفته است زیرا اغلب شامل تعداد محدودی لایه، مثلاً لایه بلوک و بالشتک ماسه ای بوده اند که روی مواد پلیمری قرار داده شده بودند. در ضمن، مدل نرم افزاری بلوک ها بیشتر از نوع مستطیلی انتخاب شده بودند. لذا، به عنوان نتیجه باید گفت اگر تلاش های صورت گرفته در زمینه مدل سازی نرم افزاری روسازی بلوکی با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش هایی که روی نمونه های آزمایشگاهی و روسازی های واقعی انجام شود، نتایجی کارآمدتر به دست می آید. در این تحقیق، با هدف تداوم تحقیقات و



۱. فلوجارت مراحل انجام تحقیق

<sup>3</sup>- Herringbone

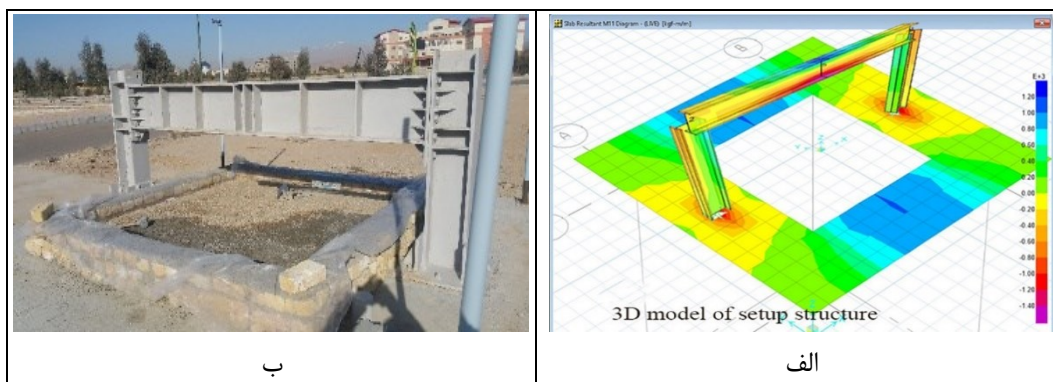
1- Zig-zag block or Uni-pave block

2- Cement treated base (CTB)

## ۲. سامانه آزمایش بارگذاری صفحه

در ابتدا، ضرورت داشت تا برای انجام بارگذاری قائم روی صفحه دایره‌ای به قطر ۴۵ سانتی‌متر، یک قاب فولادی طراحی شود تا نیروی عکس‌العمل جک هیدرولیک به وسیله آن خنثی گردد. لذا، در نخستین

مرحله از این تحقیق، سامانه‌ای مطابق شکل ۲-الف و ۲-ب به شکل مربعی با ضلع ۴ متر و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد. در قسمت مرکزی این سامانه، فضایی به مساحت ۴ متر مربع برای اجرای لایه‌های روسازی بلوکی قالب‌بندی و تفکیک گردید.



شکل ۲. سامانه ساخته شده جهت انجام بارگذاری صفحه به مساحت ۱۶ متر مربع

## ۳. روش آزمایش و مشخصات فنی مصالح

در این بخش، خلاصه‌ای از مراحل ساخت نمونه روسازی بتنی بلوکی فرودگاهی و سپس انجام بارگذاری صفحه در مرکز آن توضیح داده می‌شود. همچنین، مشخصات مدل نرم‌افزاری و در انتهای این بخش، روش انجام آزمایش بیرون‌کشیدگی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۱. اجرای روسازی بتنی بلوکی فرودگاهی

لایه‌های نمونه روسازی ساخته شده در این پژوهش به ترتیب از پایین به بالا عبارت بودند از: خاک بستر، زیر اساس، اساس سنگدانه‌ای، اساس سیمانی، هر یک به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر، بالشتک ماسه‌ای به ضخامت ۳ سانتی‌متر و رویه بلوکی با چیدمان جناغ ماهی به مساحت ۴ متر مربع. طول و عرض هر یک از بلوک‌ها به ترتیب برابر بودند با ۲۲ و ۱۱ سانتی‌متر و ضخامت آنها نیز ۸ سانتی‌متر بود. نحوه ساخت این بلوک‌ها نیز به روش پرسی بود که در کارخانه تولید شده بودند. دانه‌بندی

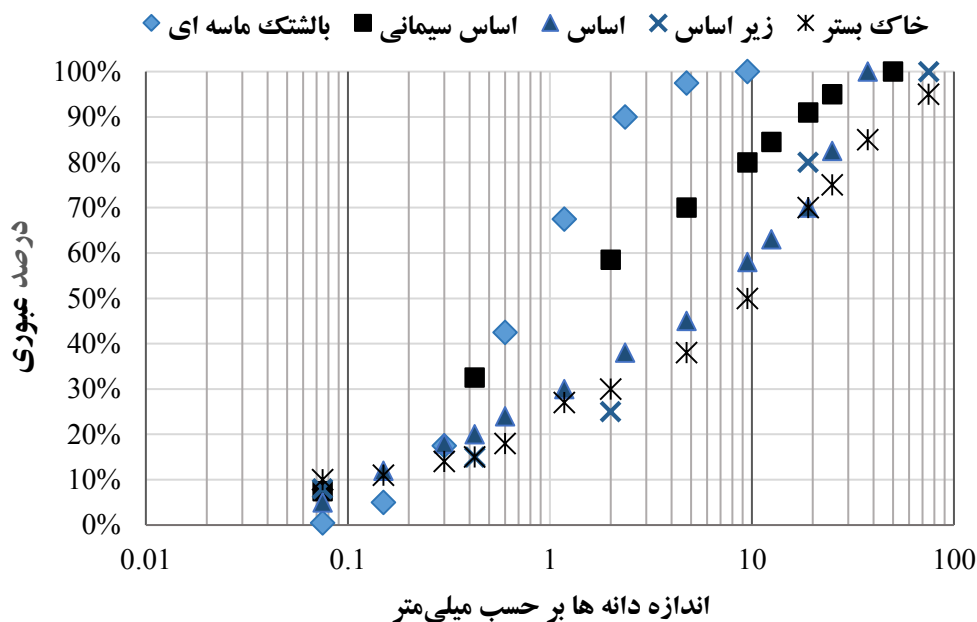
مصالح سنگی به کار رفته در این روسازی در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای انتخاب مصالح لایه خاک بستر و زیر اساس، به ترتیب از الزامات دستورالعمل FAA، بندهای ۱۵۲ (FAA, 2018a) و ۱۵۴ (FAA, 2018b) استفاده شد. برای تهیه مصالح اساس سنگدانه‌ای نیز نمونه‌ای از مصالح تولید شده در کارخانه انتخاب و پس از دانه‌بندی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بر مبنای الزامات دستورالعمل FAA، بند ۲۰۹ (FAA, 2018c)، آزمایش شدند. برای اساس سیمانی، مصالح سنگدانه‌ای با شکستگی ۱۰۰٪ در یک وجه که از مصالح کوهی تولید شده بود انتخاب و پس از نمونه‌گیری اقدام به تفکیک و اصلاح دانه‌بندی مطابق ASTM D6913 گردید و آزمایش‌های کنترل کیفیت روی آن انجام شد. مطابق مفاد FAA، بند ۳۰۴، مقاومت فشاری هفت روزه نمونه استوانه‌ای اساس سیمانی مطابق استاندارد ASTM D1633 که برای آزمایش مقاومت فشاری خاک-سیمان<sup>۱</sup> است، باید بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ پوند بر اینچ مربع باشد

<sup>۱</sup> Soil-cement

۱۵ سانتی متر برای آزمایش مدول گسیختگی مشاهده می شود (ASTM-C78, 2002).

(FAA, 2018d). در شکل ۴- الف، نمونه های مکعبی به ضلع ۱۵ سانتی متر جهت آزمایش مقاومت فشاری و در شکل ۴- ب نمونه ۶۰ سانتی متری با مقطع مربعی به ضلع



شکل ۳. منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده در این تحقیق بر اساس معیارهای سازمان هوانوردی فدرال



شکل ۴. نمونه های ساخته شده از اساس سیمانی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری و خمشی در این تحقیق در جدول ۱ نیز از نتایج آزمایش های انجام شده روی مصالح ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه ای از نتایج آزمایش های انجام شده روی مصالح مورد استفاده در این تحقیق

مصالح					نتیجه آزمایش
مصالح ماسه ای	اساس سیمانی	اساس	زیر اساس	سابگرید	
۸/۴	۶/۵	۵/۹	۶/۲	۶/۲	رطوبت بهینه (/.)
۲/۱۸	۲/۲۸	۲/۲۹	۲/۲۸	۲/۲۸	حداکثر وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)

۰/۰۷ & ۳۸°	۰/۰۷ & ۳۸°	۰/۰۵ & ۴۴°	-	۰/۰۴ & ۳۲°	چسبندگی (کیلوگرم بر سانتی متر مربع) و زاویه اصطکاک داخلی
۴۴	۴۴	۶۵	-	۲۳	تراکم ۹۰٪ در CBR رطوبت طبیعی

بستر، زیر اساس و اساس به ترتیب پخش، آبیاشی (با درصد رطوبت بهینه) و مخلوط گردیدند و سپس توسط دستگاه متراکم کننده صفحه‌ای هر یک از لایه‌ها به ضخامت ۱۵ سانتی متر کوبیده و از نظر کفایت تراکم مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۵، نحوه کوبش لایه‌ها نشان داده شده است.

فضای بین بلوک‌ها با ماسه درزبند، که مطابق مفاد FAA می‌بایست کوچکتر از الک شماره ۱۶ باشد، پر می‌شود. در ضمن، برای بالشتک ماسه‌ای زیر بلوک‌ها نیز باید از مصالحی استفاده کرد که همه آنها از الک ۳/۸ اینچ کوچکتر باشند (مک کوئین و همکاران، ۱۹۹۳). برای ساخت نمونه روسازی بلوکی به مساحت ۴ متر مربع، در مرحله اول، مصالح در نظر گرفته شده برای خاک



شکل ۵. کوبش لایه‌های سنگریزه‌ای در فرایند ساخت روسازی بتنی به مساحت ۴ متر مربع

صفحه متراکم کننده دستی به وزن تقریبی ۱۰ کیلوگرم، متراکم شد. در شکل ۶، مراحل کوبیدن آن نشان داده شده است.

پس از اتمام اجرای اساس سنگدانه‌ای، لایه اساس سیمانی به ضخامت ۱۵ سانتی متر، پخش گردید. این لایه، پس از تنظیم رقوم، توسط



شکل ۶. اجرای لایه اساس سیمانی (CTB) زیر بلوک کفپوش



ماسه درزبند و سیمان به نسبت وزنی ۳ واحد ماسه و ۱ واحد سیمان روی بلوک ها پخش و جاروکشی گردید. در شکل های ۷-الف و ۷-ب، روند اجرای رویه بلوکی روی لایه اساس سیمانی مشاهده می شود.

پس از طی ۳۰ روز عمل آوری، اقدام به اجرای رویه بلوک بتنی گردید. مراحل کار بدین صورت بود که ابتدا بالشتک ماسه ای به ضخامت ۳ سانتی متر پخش گردید و بلوک بتنی با الگوی جناغ ماهی روی آن قرار داده و متراکم شد. پس از اجرای بلوک ها، اقدام به آبپاشی شد و مخلوط



شکل ۷. اجرای بالشتک ماسه ای و بلوک کفپوش با چیدمان جناغ ماهی

تیر ثابت افقی در خارج از فونداسیون سامانه وصل شده بودند، مطابق شکل ۸، قرار داده شد. بار قائم در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ تن وارد شد و در فواصل زمانی ۱، ۲، ۴ و ۸ دقیقه، هر سه تغییر مکان قائم ناشی از هر یک از مقادیر نیرو قرائت شد. در شکل ۹ نیز نتیجه بارگذاری صفحه ملاحظه می شود.

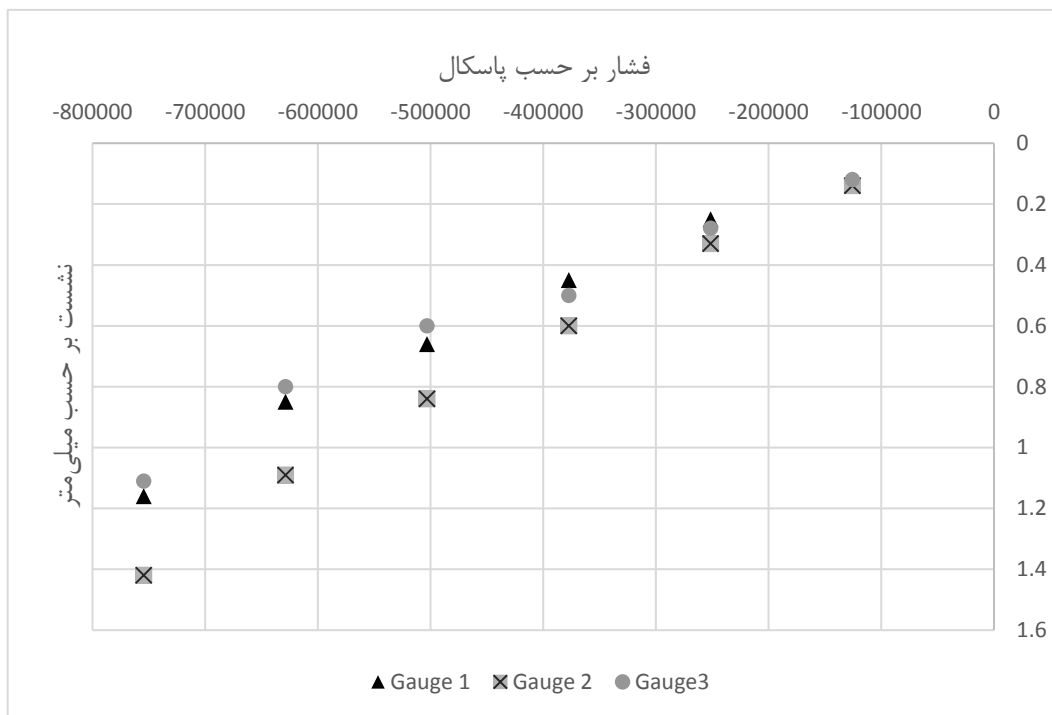
### ۲-۳. انجام بارگذاری صفحه

با هدف بررسی رفتار روسازی بلوکی، با کمک قاب فلزی، اقدام به اعمال بار قائم در وسط روسازی به صورت پلکانی توسط جک هیدرولیک از طریق صفحه فولادی دایره ای به قطر ۴۵ و ضخامت ۲/۵ سانتی متر گردید. روی صفحه فولادی، سه نشانگر نشست که به دو



شکل ۸. نمایی از جک بارگذاری صفحه در وسط روسازی بلوکی بتنی فرودگاهی



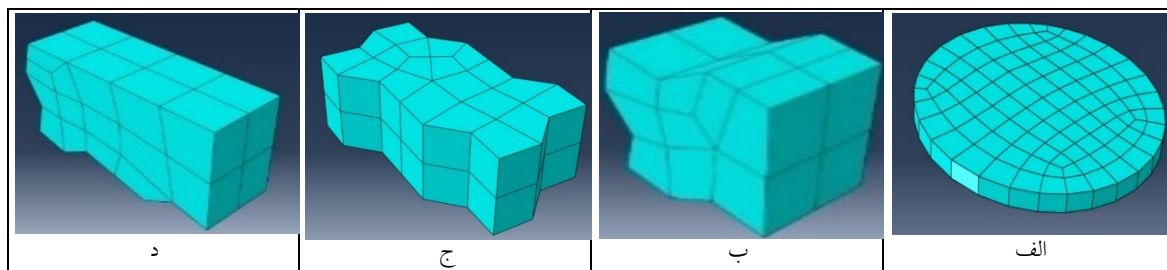


شکل ۹. نمودار فشار-نشست حاصل از بارگذاری صفحه

### ۳-۳. مدل سازی نرم افزاری

به منظور بررسی رفتار روسازی بتنی بلوکی و همچنین امکان سنجی تعیین مقداری برای مدول الاستیک رویه بلوک و ماسه درزبند یک مدل

سه بعدی از این روسازی در محیط نرم افزار آباکوس ساخته شد. در شکل ۱۰-الف مدل صفحه فولادی بارگذاری و در شکل های ۱۰-ب تا ۱۰-د نمونه بلوک های بتنی به همراه مش-بندی مفروض نشان داده شده است.



شکل ۱۰. مدل سه بعدی صفحه فولادی و انواع بلوک کفیوش

در این تحقیق، برای ارزیابی رفتار روسازی در برابر بار عمودی یک چرخ هواپیما تصمیم گرفته شد نمودار نیروی قائم - تغییر مکان روسازی رسم شود و لذا یک نقطه فرضی در بالای روسازی به عنوان نقطه مرجع تعریف شد و به گره های محیط صفحه فولادی متصل

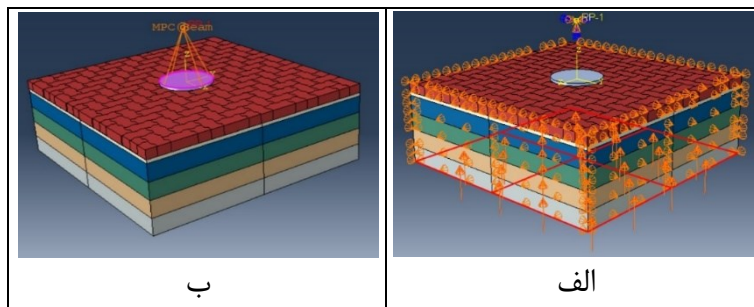
گردید. این نقطه فرضی در محیط نرم افزار اصطلاحاً MPC<sup>۱</sup> نامیده می شود.

در مرحله بعد، درجه آزادی این نقطه فرضی را در امتداد قائم به میزانی که به اندازه کافی بزرگ باشد در نرم افزار تعریف نموده و نیروی عکس العمل ایجاد شده

<sup>۱</sup> - Multi-point constraints

نرم افزار بدون خطا حل شود. اگر مقدار گامها زیاد باشد جوابها دقت کافی نخواهند داشت و اگر مقدار گامها کم باشد ممکن است طول زمان حل مسئله زیاد شود. این امر با انجام چندین سعی و خطا باید در فرایند مدل سازی بهینه شود. همانطور که گفته شد، برای تولید نمودار نیرو- تغییر مکان یک نقطه فرضی در بالای مدل تعریف شد و مقادیر نیروی عکس العمل در آن به ازای مقادیر مختلف نشست رویه توسط برنامه محاسبه شد. در شکل ۱۱- الف و ۱۱- ب، موقعیت نقطه مرجع (MPC) و شرایط مرزی نشان داده شده است.

در اثر تغییر مکان تا مقدار حداکثر تعریف شده (در این پژوهش، ۱ سانتی متر) به سمت پایین در امتداد جاذبه در زمان های مختلف ثبت گردید. در آباکوس، تحلیل سازه ها در یک یا چند دوره زمانی و در مراحل مختلف قابل تعریف است. در این تحقیق، دو دوره زمانی تعریف گردید. دوره اول، یعنی زمانی که لایه های روسازی به ضخامت ها و دانسیته های مختلف روی یکدیگر اجرا شده باشند و در دوره دوم زمانی، بارگذاری ناشی از جک هیدرولیک در آزمایش بارگذاری صفحه اعمال گردید. در نرم افزار آباکوس، مقدار و تعداد گام های تحلیل به گونه ای باید تعریف شود که معادلات نیرو- تغییر مکان در



شکل ۱۱. مدل سه بعدی روسازی بتنی بلوکی و نقطه مرجع MPC به منظور شبیه سازی بارگذاری صفحه

بر حسب  $\psi$  برقرار است (هوانگ، ۲۰۰۴؛ وزارت راه و شهرسازی، ۲۰۱۷).

$$E = 57000 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

برای رویه بلوکی که شامل بلوک بتنی و ماسه درزبند است محققان دیگر اعداد گوناگونی را در تحقیقات خود ذکر کرده اند که به تعدادی از آنها در جدول ۲ اشاره شده است.

برای تعیین مدول الاستیک مصالح خاکی یا سنگدانه ای بر حسب پوند بر اینچ مربع ( $\psi$ )، از رابطه (۱) با توجه به مفاد دستورالعمل FAA (۲۰۱۶) استفاده شده است.

$$E = 1500 \times \text{CBR} \quad (1)$$

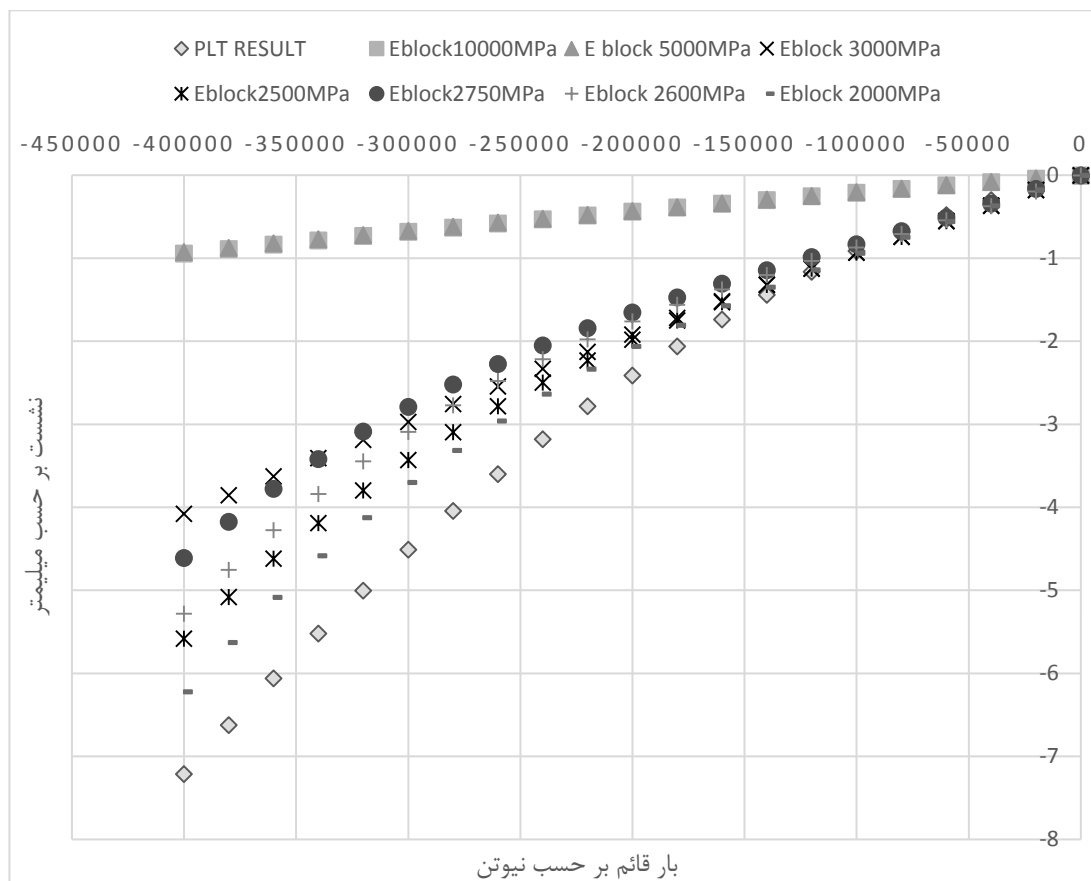
برای محاسبه مدول الاستیک مصالح اساس سیمانی، رابطه (۲) بر مبنای مقاومت ۲۸ روزه نمونه استوانه ای بتن

جدول ۲. مقادیر مختلف مدول الاستیک رویه بلوک و ماسه درزبند

Hassani and Jamshidi (2006)	Moghadas Nejad and Shadravan (2006)	Nishizwa et al. (2018)	Hengl et al. (2018)	Judycki et al. (1996)	Sharp and Armstrong (1986)	Shackel (1980)	مرجع
2500	2500	30000	45000	300~5000	415~4500	415~8000	(MPa) E

می‌توان گفت که در این تحقیق، مدول الاستیک رویه بلوکی بتنی با رفتاری که پس از انجام آزمایش بارگذاری صفحه و ثبت نتایج آن در این تحقیق مشاهده گردید می‌تواند در بازه ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شود.

در این تحقیق، مدول الاستیک رویه بلوکی مطابق شکل ۱۲ در اولین سعی ۱۰۰۰۰، در دومین سعی برابر ۵۰۰۰ و برای آخرین سعی ۲۰۰۰ مگاپاسکال فرض شد که پس از پردازش نرم‌افزاری، این عدد به نتایج به‌دست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه بیشترین مطابقت را در خروجی نرم‌افزار حاصل نمود. لذا، با اطمینان بیشتری



شکل ۱۲. نمودار نیرو-نشست به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیک رویه بلوک و ماسه درزبند

تعیین و به همراه دیگر فرضیات در جدول ۳ ارائه شده-اند.

سایر پارامترها و مشخصات لایه‌های سیمانی و سنگریزه‌ای نیز بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده

جدول ۳. مشخصات مصالح مورد استفاده در نمونه روسازی و نرم‌افزار آباکوس

مشخصات مصالح	$\phi$ (°)	C (Pa)	ضریب پواسون (v)	مقاومت ۲۸ روزه MPa (psi)	مقاومت ۷ روزه MPa (psi)	E (MPa)	دانسیته (D) (N/m <sup>3</sup> )	ضخامت (mm)
صفحه فولادی	--	--	۰/۳	-	-	۲۱۰۰۰۰	۷۸۵۰۰	۲۵/۴

رویه بلوک	-	-	-	-	-	-	-
و ماسه	۰/۳	--	--	۲۲۵۰۰	۲۰۰۰	۸۰	درزبند
بالمشک	۰/۳۵	۳۹۲۰	۳۲	۱۷۰۰۰	۷۰	۳۰	ماسه ای
اساس	۰/۲	--	--	۲۱۹۵۰	۱۲۷۰۰	۱۵۰	سیمانی
سیمانی	۶/۹	(۱۰۰۶)	۴	(۵۹۱)			
اساس	۰/۳	۴۹۰۰	۴۴	۲۲۹۰۰	۹۷۲	۱۵۰	سنگدانه ای
زیر اساس	۰/۳	۶۸۶۰	۳۸	۲۱۶۶۰	۶۲۲	۱۵۰	
سابگرید	۰/۳	۶۸۶۰	۳۸	۲۲۶۹۰	۱۱۷۸	۱۵۰	

و سه واحد ماسه، بلوک چینی گردید. در این مرحله، در سه بلوک در هر نیمه و در مجموع ۶ بلوک، قبل از اجرا با دستگاه دریل، سوراخی به قطر ۱۸ میلی متر و عمق ۵ سانتی متر ایجاد شد و در آن میله فولادی به قطر ۱۶ میلی متر و طول ۵۰ سانتی متر، که ۱۵ سانتی متر انتهایی آن رزوه گردید بود تا به جک هیدرولیک متصل شود، کار گذاشته شد. این میلگردهای فولادی آجدار بوده و با چسب سنگ در هر یک از بلوکها جاسازی گردیدند. پس از ۲۴ ساعت، این میلگردها به دستگاه جک هیدرولیکی که ویژه بیرون کشیدن بلوک از بتن بود، متصل گردید و مطابق شکل های ۱۳- الف و ۱۳- ب آزمایش بیرون کشیدگی روی ۶ بلوک انجام گردید. برای استقرار جک هیدرولیک، یک شاسی فولادی ویژه تست بیرون کشیدگی نیز طراحی و ساخته شد که در شکل های ۱۳- ج و ۱۳- د مشاهده می شود. در جدول ۴، نتیجه آزمایش برای دو حالت: نخست، ماسه و سیمان پرتلند و سپس ماسه و آهک ارائه شده است. لازم به ذکر است که ماسه درزگیر در این پروژه شامل ذرات ماسه عبوری از الک شماره ۱۶ انتخاب گردید.

در خصوص مدل رفتاری بلوک و ماسه درزبند، پس از بررسی های مختلف مشخص شد که به جای ساختن مدل سه بعدی لایه ماسه درزبند به ضخامت تقریبی ۳ میلی متر و ارتفاعی به اندازه بلوک بتنی، یعنی ۸ سانتی متر، که فرایند مش بندی را در نرم افزار زمان بر می کند، می توان از روش ساده تری استفاده کرد. در این روش، ضریب اصطکاک در حدود ۰/۳ بین بلوکها فرض گردید. پیش زمینه این ابتکار، یکی از تحقیقاتی است که در آن پانل های کوچک روسازی با بلوک های در ابعاد واقعی اما با شکل های مختلف، با و بدون ماسه درزبند، ساخته و در یک سامانه آزمایشگاهی تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند (هنگل و همکاران، ۲۰۱۸).

### ۳-۴. آزمایش بیرون کشیدگی

در پایان بارگذاری صفحه، رویه بلوکی و ماسه بالمشک جمع آوری شد و برای دومین بار ماسه بالمشکی جدید پخش شد و پس از تراکم اولیه، نیمی از سطح با ماسه درزگیر حاوی سیمان پرتلند به نسبت وزنی یک واحد سیمان و سه واحد ماسه و نیمی دیگر از سطح با ماسه درزگیر حاوی آهک به نسبت وزنی یک واحد پودر آهک



شکل ۱۳. مراحل انجام آزمایش بیرون کشیدگی بلوک

جدول ۴. نتایج آزمایش بیرون کشیدگی بر مبنای حداکثر نیروی لازم برای بیرون کشیدن بلوک از رویه به ازای دو نوع مخلوط درزگیر

مقاومت بیرون کشیدگی (کیلوپاسکال)			نوع مواد درزگیر
شماره بلوک			
۳	۲	۱	
ثابت نشد (خطای ابزاری)	۵۸۸	۲۹۴	ماسه + سیمان
	۴۴۱		میانگین
ثابت نشد	۲۷۴	۲۳۵	ماسه + آهک
	۲۵۴		میانگین

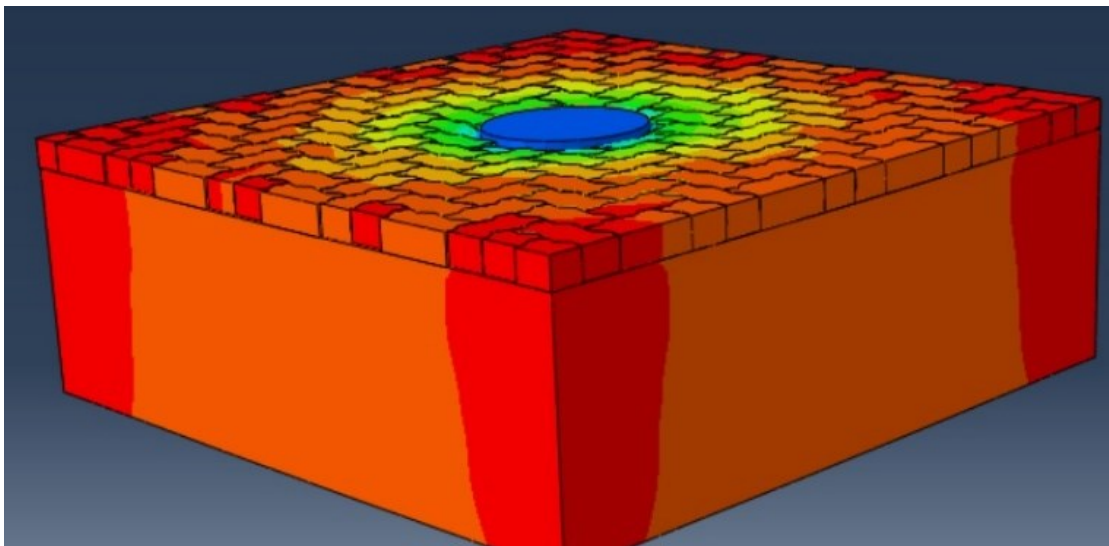
#### ۴. بحث

یکی از مهمترین نکات مبهم در تحلیل اجزای محدود روسازی بتنی بلوکی، در صورتی که رویه متشکل از بلوک و ماسه درزبند به عنوان یک لایه مجزا در نظر گرفته شود، در نظر گرفتن عددی برای مدول الاستیک آن لایه

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می شود، مقاومت بیرون کشیدگی در حالتی که در ماسه درزگیر از سیمان پرتلند استفاده شود به طور میانگین نزدیک به دو برابر مقاومت نمونه های حاوی آهک است.

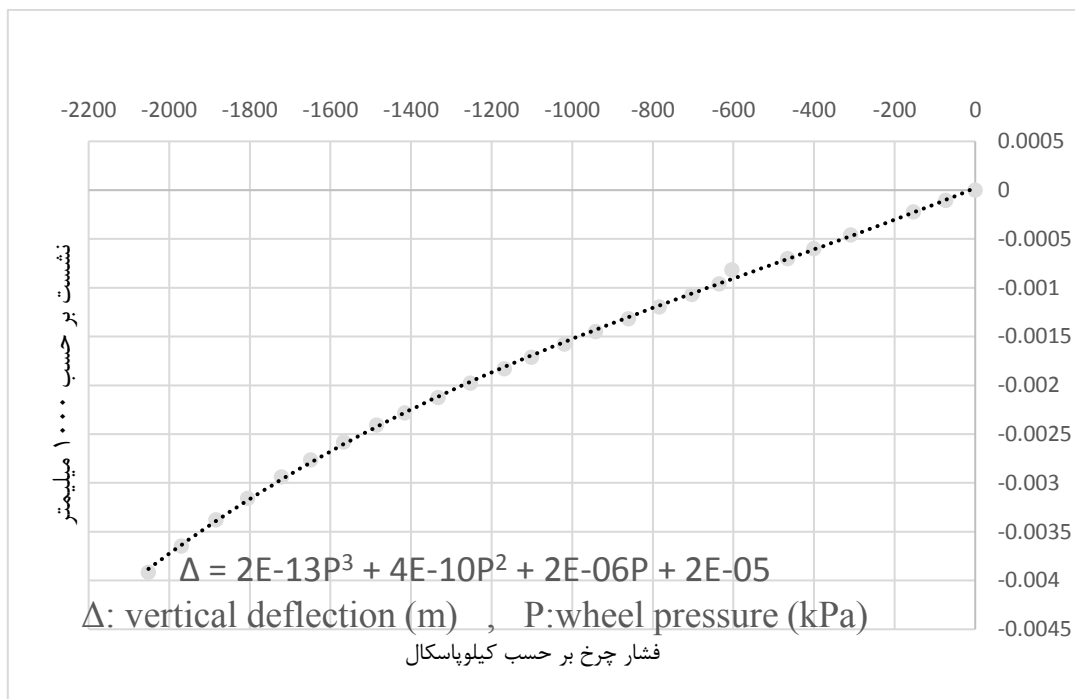
تدریج به نیمه صلب و نزدیک به روسازی صلب تبدیل می شود. در اثر این تغییر ماهیت نسبی، سختی رویه نیز افزایش می یابد. بنابراین، منحنی شکل ۱۵ که به عنوان مدل رفتاری روسازی بتنی بلوکی با مدول الاستیکی برابر ۲۰۰۰ مگاپاسکال ارائه شده است می تواند پاسخ رویه بلوکی را به ازای مقادیر مختلف فشار یک چرخ هواپیما نشان دهد. بدین ترتیب که با داشتن فشار یک چرخ هواپیما طرَح، که مثلاً برای هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ حدود ۱۵۰۰ کیلو پاسکال است، می توان نشست رویه بلوکی زیر این مقدار فشار را که حدود ۲ میلی متر است تعیین نمود. توضیح اینکه علامت منفی برای نشان دادن جهت اعمال نیرو به سمت پایین می باشد. بر اساس همین فرایند و همچنین نتایج آزمایش های میدانی نظیر تراکم صحرائی و CBR در تراکم های مختلف، مدول الاستیک لایه ها به عنوان اطلاعات اولیه وارد نرم افزار آباکوس شد و خروجی آن در قالب تصاویر گرافیکی مشابه شکل ۱۴ و نمودارهای مختلف مانند نمودار نیرو- تغییر مکان ارائه گردید.

است. همانطور که در قسمت های قبل بیان شد، چاره آن است که پس از ثبت نتایج آزمایش بارگذاری صفحه اقدام به انجام فرایند سعی و خطا نمود تا عددی که بتواند منحنی فشار- نشست مشابه و نزدیک به منحنی فشار- نشست حاصل از بارگذاری صفحه حاصل بنماید، به دست آید. در این تحقیق، نشان داده شد که این عدد حدود ۲۰۰۰ مگاپاسکال می باشد. البته نباید از چند نکته مهم در این زمینه چشم پوشی کرد. نخست آنکه رویه بلوکی به دلیل عدم یکپارچه بودن به واسطه وجود درزهای نزدیک به هم و توزیع شده در تمام سطح روسازی، بر خلاف روسازی بتنی یا آسفالتی که در عمق و در گستره سطح همگن و یکنواخت هستند، نمی تواند به طور مستقیم و مستقل تحت آزمایشی مانند تعیین مدول گسیختگی قرار گیرد. نکته دیگر این است که با گذشت زمان و عبور ترافیک، قفل و بست رویه بلوکی و تماس بلوک و ماسه درزگیر بهبود یافته و بر مبنای میزان مقاومت برشی ماسه درزگیر و شکل و تعداد گوشه های بلوک، رفتار روسازی بتنی بلوکی از انعطاف پذیر مطلق به



شکل ۱۴. نمایی از مدل تغییر شکل یافته روسازی بتنی بلوکی





شکل ۱۵. منحنی فشار- نشست

بیش از حد به رویه بلوکی ببخشند. زیرا یکی از نکات مثبت رویه بلوکی بتنی آن است که می‌توان بلوک‌ها را با انرژی اندکی تعویض نمود. به هر حال، به دلیل اینکه سیمان پرتلند بیشتر در دسترس است، در حال حاضر با توجه به نتایج این پژوهش از اقبال بیشتری در عرصه رقابت با دیگر مواد درزگیر برخوردار است.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با هدف بررسی عملکرد و رفتار روسازی بتنی بلوکی، یک نمونه به مساحت ۴ متر مربع با لایه‌بندی متشکل از اساس سیمانی، اساس و زیر اساس تثبیت نشده و خاک بستر مطابق با الزامات سازمان هوانوردی فدرال (FAA) با کاربرد در نواحی پروان فرودگاه‌ها که تحت تأثیر بارهای ایستایی قرار دارند، ساخته شد و سپس تحت بارگذاری صفحه و آزمایش بیرون‌کشیدگی قرار گرفت. در بخشی دیگر از این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس، یک مدل سه‌بعدی از آن نیز ساخته شد تا علاوه بر ارزیابی دقیق‌تر رفتار روسازی بتنی بلوکی، تخمین بهتری از حدود و مقدار مدول

همانطور که در ابتدای همین بخش گفته شد، یکی از مزایای رسم منحنی فشار- نشست در شکل ۱۵ آن است که می‌تواند به عنوان یک ابزار کنترل طراحی روسازی بتنی بلوکی مورد استفاده قرار گیرد. بدین ترتیب که با فرض اجرای روسازی با ضخامتی برابر با آنچه در این پژوهش اجرا گردید، به ازای وزن یا فشار چرخ تک در محور نشست هواپیمای طرح، مقدار نشست کلی روسازی قابل محاسبه است. از آنجا که یکی از متغیرهای روسازی بتنی بلوکی کیفیت قرار گرفتن بلوک‌ها در کنار هم بدون خارج شدن از سطح رویه است، در این تحقیق، پس از طراحی و ساختن سامانه فولادی برای انجام آزمایش بیرون‌کشیدگی، توانایی دو نوع مخلوط درزبند حاوی ماسه و سیمان و همچنین ماسه و آهک، مطابق آنچه که در بخش قبل گفته شد، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ماسه درزبند حاوی سیمان پرتلند حدود دو برابر بیش از ماسه درزبند حاوی آهک در برابر نیروی بیرون‌کشیدگی مقاومت از خود نشان می‌دهد. به-هرحال، امکان استفاده از مواد درزگیر پلیمری نیز وجود دارد. اما باید متذکر شد که نباید این مواد درزگیر صلبیت

- یکی از چالش های مهم در تحقیقات مشابهی که در گذشته انجام شده، فرض درست و منطبق با واقعیت از مدول الاستیک رویه بلوکی و ماسه درزبند آن است. در این تحقیق، با ساخت نمونه واقعی و استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای تعریف مدل سه بعدی، این نتیجه حاصل شد که مدول الاستیک رویه بلوکی می تواند برابر ۲۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شود.
- استفاده از سیمان پرتلند در ماسه درزگیر، عملکرد آن را در حدود دو برابر در مقابل نیروی بیرون کشیدگی نسبت به نمونه ای که در مخلوط ماسه درزگیر آن از آهک استفاده شده بود، بهبود بخشید.
- الاستیک رویه بلوکی که در مطالعات گذشته برای آن مقادیر متنوعی بین ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ مگاپاسکال پیشنهاد شده بود، ارائه شود. مهمترین نتایج این تحقیق به شرح زیر خلاصه می شود:
- برای بررسی رفتار روسازی بلوکی تحت اعمال بارگذاری صفحه ای، توصیه می شود از روش انتخاب قیود نقطه ای چندگانه به عنوان نقطه مرجع فرضی (MPC) در مدل سازی سه بعدی استفاده شود.
- با مشاهده نتایج تحلیل نرم افزاری، به نظر می رسد که فرض کردن ضریب اصطکاکی برابر ۰/۳ بین اجزای رویه بلوکی و ماسه درزبند، برای مدل سازی و ممانعت از پیچیدگی مدل نرم افزاری و افزایش زمان تحلیل، کفایت می کند.

## ۶. مراجع

- ASTM-C78. 2002. "Standard test method for flexural strength of concrete using simple beam with third-point loading". ASTM International, West Conshohocken, USA.
- Design, Construction and Maintenance Manual for Highways Concrete Pavements. 2017. No.731, Ministry of Road and Urban Development, Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs. (In Persian)
- Emery, J., Lazar, M. and Burrows, G. R. 2002. "A new paver system for airfields". Retrieved from Hong Kong, 12 p.
- FAA. 2016. "Airport pavement design and evaluation". AC No. 150/5320-6F, pp. 3-42, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- FAA. 2018a. "Standard specifications for construction of airports". Item P-152: Excavation, subgrade, and embankment, AC No. 150/5370-10H, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- FAA. 2018b. "Standard specifications for construction of airports". Item P-154: Subbase course, AC No. 150/5370-10H, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- FAA. 2018c. "Standard specifications for construction of airports". Item P-209: Crushed aggregate base course, AC No. 150/5370-10H, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- FAA. 2018d. "Standard specifications for construction of airports". Item P-304: Cement-treated aggregate base (CTAB), AC No. 150/5370-10H, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Hassani, A. and Jamshidi, A. 2006. "Modeling and structural design of a concrete block pavement system". 8<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving, Delft, The Netherlands.
- Hengl, H. L., Kluger-Eigl, W., Lukacevic, M., Blab, R. and Fussl, J. 2018. "Horizontal deformation resistance of paving block superstructures- influence of paving block type, laying pattern, and joint behaviour". Int. J. Pavement Res. Technol., 01680358.
- Houben, L., Molenaar, A., Fuchs, G. and Moll, H. 1984. "Analysis and design of concrete block pavements". 2<sup>nd</sup> International Conference on Concrete Block Paving, Delft, The Netherlands.
- Huang, Y. H. 2004. "Pavement analysis and design". Pearson/Prentice Hall, 785 p.
- Jamshidi, A., Kurumisawa, K., White, G., Nishizawa, T., Igarashi, T., Nawa, T. and Mao, J. 2019. "State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement". Constr. Build. Mater., 200: 713-755. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.286>
- Judycki, J., Alenowicz, J. and Cyske, W. 1996. "Structural design of concrete block pavement structures for Polish conditions". Pave Israel 96, pp. 365-374.

- Knapton, J. 2008. "The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries". 4<sup>th</sup> Ed., British Ports Federation, London, UK.
- Knapton, J. and Barber, S. D. 1980. "UK research into block pavement design". The First International Conference on Concrete Block Paving, pp. 33-37.
- Ma, S., Hou, X. and Wu, D. 2012. "Research on structural design of interlocking concrete block pavement for rural road". Ninth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP), ASCE.
- Mampearachichi, W. K. and Gunarathna, W. P. H. 2010. "Finite-element model approach to determine support conditions and effective layout for concrete block paving". Mater. Civ. Eng., 1139-1147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000118)
- McQueen, R. D., Knapton, J., Emery, J. and Smith, D. R. 1993. "Airfield pavement design with concrete pavers". Concrete Paver Institute, pp. 372-379.
- Moghadas Nejad, F. and Shadravan, M. R. 2006. "A study on behavior of block pavement using 3D finite element method". 8<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, California, USA.
- Nishizawa, T., Furukawa, M., Hyodo, H. and Ueda, N. 2018. "A model for predicting permanent deformation of interlocking concrete block pavements on heavy duty roads". 12<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Pavement, Seoul, Korea.
- Pani, A. K. and Panda, B. C. 2018. "Development of a mix design methodology for concrete paving blocks, Part 1, mix design procedure". Eng. Technol. Sci. Res., 5(4): 743-751.
- Shackel, B. 1980. "The design of interlocking concrete block pavements for road traffic". Proceedings of First International Conference on Concrete Block Paving concrete block paving, Newcastle, pp. 23-32.
- Shafabakhsh, G., Famili, A. and Pourzand Hossein Abad, B. 2014. "Numerical analysis of concrete block pavements and comparison of its settlement with asphalt concrete pavements using finite element method". Eng. J., 18(4): 39-51.
- Sharma, P. and Kumar Batra, R. 2016. "Cement concrete paver blocks for rural roads". Curr. Eng. Sci. Res., 3(1): 114-121.
- Sharp, K. G., Grad, B. E., Dip, H. and Armstrong, P. J. 1986. "The Australian road research board's program of testing of interlocking concrete block pavements". Retrieved from Australia.
- Thulasibai, A. S. R. R., Velayudhan, S., Pathath, M. and Visvanathan, A. 2020. "Influence of bedding and jointing sand on the shear strength characteristics of interlocking paver blocks- bedding sand interface". Int. J. Pavement Eng., 23(7): 2160-2175. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1847286>
- Thulasibai, A. S. R. R., Velayudhan, S., Pathath, M., Lekshmiathy, J. and Visvanathan, A. 2021. "Experimental and numerical evaluation of the parameters influencing the shear-stress behavior of interlocking paver blocks-bedding sand interface using large-scale direct shear test". J. Mater. Civ. Eng., 33(6): 04021104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003724](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003724)
- 1- Thulasibai, A. S. R. R. and Velayudhan, S. 2022a. "Numerical modeling and optimization of the geometric properties influencing the deflection behavior of interlocking concrete block pavement". J. Transport. Eng., Part B: Pavements, 148(3), 04022036. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000366>
- Thulasibai, A. S. R. R. and Velayudhan, S. 2022b. "Mechanical and microstructural study on interlocking concrete block pavers using waste granite dust". Int. J. Pavement Eng., 23(2): 358-371. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1746312>
- Vroombout, F., Monteith, R. and Sharp, K. G. 1992. "The use of interlocking concrete blocks on an aircraft pavement in Australia". 4<sup>th</sup> International Concrete Block Paving Conference, Auckland, New Zealand, pp. 217-230.