

# ***Analysis of Airfield Concrete Block Pavement Behavior Using PLT and CBR Tests***

***Parham hayati\****

*Department of Civil Engineering, Science and research Branch, Islamic Azad University, Tehran.Iran  
p.hayati@srbiau.ac.ir*

*Vahid Taheri*

*Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran*

***Research paper***

## ***Abstract***

*Concrete pavement is been used in the aprons owing to its resistance to static loads as the main loads of aircraft. An alternative is to use interlocking concrete block pavement with advantages such as simple execution and repair and with no needs for curing. There is concern about the effect of the CBR of the subgrade on the resistance of block pavers to permanent deformation. The present study conducted to investigate the effect of subgrade (CBR) on these pavements in the apron. The Plate Load Test (PLT) performed on a 2m×2m prototype constructed as per Federal Aviation Administration (FAA) regulations. The layers of this 3D model include compacted subgrade, sub-base, crushed aggregate base and Cement-Treated Base (CTB) and 8-cm thick concrete blocks. Sensitivity analysis showed a reduction of over 12% in vertical deflection with increasing CBR from 2 to 10 and a reduction of below 4% in the presence of subgrade even with CBR=10~20%. Using subgrade with CBR of over 10 has found insignificantly increase the resistance of block pavements to permanent deformation. Concern about the risk of permanent deformation is obliterated given the key role of the Cement-Treated Base in redistributing the loads.*

*Keywords: Airfield Concrete block pavement, Apron, Cement Treated Base (CTB), CBR, Plate Loading Test (PLT)*

---

## ***\*Corresponding Author: Parham Hayati***

*hayati, P., taheri, V. Analysis of airfield concrete block pavement behavior Using PLT and CBR tests. Journal of Concrete Structures and Materials, 2022; 7(2):70-88*

*<http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.350390.1284>*

*2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society*

*This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).*

## تحلیل رفتار روسازی بتنی بلوکی سطوح پروازی با استفاده از آزمایش *PLT* و *CBR*

پرهام حیاتی

استادیار دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

[p.hayati@srbiau.ac.ir](mailto:p.hayati@srbiau.ac.ir)

وحید طاهری

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

### چکیده

در توقفگاه های هواپیما (اپرون) که بارگذاری عمدتاً از نوع ایستایی است، از روسازی بتنی استفاده میشود. مشکلی که این نوع روسازی دارد هزینه زیاد تعمیر و نگهداری و بروز اختلال در ترافیک هواپیماها در زمان انجام تعمیرات است. به همین دلیل میتوان از روسازی بتنی بلوکی با مزیت هایی مانند اجرا و ترمیم آسان بدون نیاز به عمل آوری استفاده نمود. یکی از چالش های طراحی روسازی بتنی بلوکی فرودگاهی میزان تاثیر *CBR* خاک بستر در پایداری آن در مقابل تغییر شکل های ماندگار است. به همین منظور در این تحقیق، اقدام به مدلسازی با نرم افزار آباکوس و اجرای یک نمونه به مساحت ۴ متر مربع، مطابق ضوابط سازمان هوانوردی فدرال و انجام بارگذاری صفحه (*PLT*) گردید. این مدل شامل لایه های خاک بستر، زیر اساس، اساس، اساس سیمانی و بلوکهای بتنی ۸ سانتیمتری بود. تحلیل حساسیت نشان داد با افزایش *CBR* خاک بستر از ۲ به ۱۰ تغییر مکان قائم بیش از ۱۲٪ و با *CBR* های ۱۰ و بالاتر، به سبب تعدیل نقش اساس سیمانی در مقابل خاک بستر مقاوم تر، کمتر از ۴٪ کاهش می یابد. نتیجه آن که به دلیل وجود اساس سیمانی استفاده از خاک بستر متراکم با *CBR* بیشتر از ۱۰ تاثیر چندانی در افزایش مقاومت این نوع روسازی در برابر تغییر شکل قائم ندارد. واژه های کلیدی: روسازی بتنی بلوکی فرودگاهی، اپرون فرودگاه، اساس سیمانی، *CBR*، آزمایش بارگذاری صفحه

در نواحی پرون<sup>۱</sup> (توقفگاه هواپیما) در فرودگاهها معمولاً هواپیماها با سرعتی بسیار کمتر از سرعت در باند پرواز یا در باند خزش<sup>۲</sup> (تاکسیوی ها) حرکت می کنند و بنابر این در زمان انجام مانور های شتاب گیری، گردشی، و ترمزگیری و نیز به سبب حمل سوخت و مسافر، بار ایستایی سنگینی به روسازی وارد میکنند. روسازی های بتنی به دلیل توانایی در توزیع بار های ترافیکی در سطح وسیعتری نسبت به روسازی انعطاف پذیر و قابلیت دوام در برابر ریزش روغن های نفتی از گزینه های اصلی در این نواحی به شمار می آیند. هر چند در سالهای اخیر پیشرفتهای زیادی در زمینه بهبود عملکرد، دوام، طرح اختلاط و استفاده از مواد افزودنی در این زمینه بدست آمده است [۱] و [۲]. ولی هزینه زیاد ترمیم و این مورد که در زمان تعویض دالهای بتنی، در عملیات پروازی اختلال ایجاد میشود، میتواند از روسازی بتنی بلوکی<sup>۳</sup> بدلیل سهولت در اجرا و سرعت در تعویض، به جای روسازی بتنی استفاده کرد. همچنین عملکرد مناسب روسازیهای بتنی بلوکی از نظر استفاده از مواد بازیافتی در ساخت بلوکها و همچنین تطابق خوب آن با معماری نقاط مختلف دنیا، آن را به یک گزینه قابل رقابت با دیگر سیستمهای روسازی تبدیل نموده است [۳]. بعنوان تاریخچه میتوان گفت که روسازی بتنی بلوکی از اوایل دهه هفتاد میلادی توسط محققینی همچون ناپتن<sup>۴</sup> در دانشگاه نیوکاسل با استفاده از بارگذاری صفحه<sup>۵</sup>، مورد بررسی های دقیق قرار گرفت. رویه بلوک ها به همراه ماسه درزبند<sup>۶</sup> با کنار هم قرار گرفتن و قفل و بست شدن آنها میتواند در ابتدای دوره بهره برداری، شبیه یک روسازی انعطاف پذیر رفتار بنماید. به مرور زمان و عبور مداوم ترافیک، قفل و بست بین بلوک ها افزایش یافته و رفتاری نزدیک به روسازی صلب از خود نشان می دهند. همچنین متغیرهایی نظیر ابعاد بلوکها، ارتفاع بالشتک ماسه ای<sup>۷</sup> و الگوی چیدمان، نیز مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً این نتیجه بدست آمده است که الگوی جناغ ماهی<sup>۸</sup>، قابلیت های بیشتری نسبت به دیگر چیدمان ها دارد [۴]. اگر زیر بلوکها لایه های سنگریزه ای و خاکی استفاده شود معیار خرابی، شیار طولی مسیر چرخ ها<sup>۹</sup> ( موثر در راحتی رانندگی ) و اگر لایه اساس تثبیت شده زیر بلوکها بکار رود معیار خرابی، ترک در لایه اساس تثبیت شده است [۵]. روسازی بلوکی در فرودگاههای دنیا، نخستین بار در سال ۱۹۸۳ در پرون و سطوح گردشی فرودگاه لوتون<sup>۱۰</sup> در انگلستان، با الگوی چیدمان جناغ ماهی، بعنوان روکشی بر روی روسازی بتنی موجود انجام شد [۶]. همچنین بخشهایی از پرون فرودگاه کایرنز<sup>۱۱</sup> در استرالیا، از روسازی بلوکی به جای روسازی مضمحل شده آسفالتی استفاده گردید [۷]. باید در نظر داشت ویژه نواحی پر ترافیک صنعتی دستورالعملی با عنوان طراحی روسازی نواحی با ترافیک سنگین صنعتی و اسکله ای در سال ۲۰۰۸ توسط انجمن جداول بتنی و بتن پیش ساخته در انگلستان به چاپ رسیده و اصول مدلسازی به روش اجزاء محدود، فرضیات و جزییات مدل روسازی بلوکی نیز در این دستورالعمل ارائه شده است [۸]. در خصوص مدلسازی رویه های بلوکی بتنی در تحقیقات مختلف از نرم افزار های تحلیل اجزای محدود سه بعدی بیشتر از نرم افزار های دو بعدی چند لایه ای انعطاف پذیر، استفاده کرده اند. بعنوان مثال در یک تحقیق از نرم افزار انسیس<sup>۱۲</sup>

<sup>1</sup> Apron

<sup>2</sup> Taxiway

<sup>3</sup> Interlocking Concrete Block Pavement (ICBP)

<sup>4</sup> Knapton

<sup>5</sup> Plate Loading Test (PLT)

<sup>6</sup> Jointing Sand

<sup>7</sup> Bedding Sand

<sup>8</sup> Herringbone

<sup>9</sup> Rutting

<sup>10</sup> Luton

<sup>11</sup> Cairns

<sup>12</sup> ANSYS

برای اعتبار سنجی و مطابقت با نتایج نمونه های واقعی روسازی بلوکی استفاده شد [۹]. در تحقیق انجام شده دیگر در زمینه ساخت مدل نرم افزاری روسازی بلوکی از نرم افزار *SAFE*<sup>۱</sup> بهره گرفته شد. با استفاده از این نرم افزار انواع چیدمان های روسازی بلوکی مدل شد و نهایتاً چارت های تعیین ضخامت لایه اساس سنگدانه ای ارایه گردید [۱۰]. در زمینه مقایسه عملکرد روسازی بلوکی بتنی با روسازی انعطاف پذیر نیز میتوان به تحقیقی اشاره کرد که در آن با استفاده از نرم افزار آباکوس<sup>۲</sup> دو نمونه روسازی بلوکی و آسفالتی ساخته شد و نمودار نشست - نیروی آنها مقایسه و سپس اقدام به معادلسازی رویه بلوکی با آسفالتی گردید [۱۱]. از دیگر تحقیقات مدلسازی مرتبط با روسازی بلوکی می توان به تحقیقی اشاره کرد که هدف از آن ارزیابی نقش زیرسازی در عملکرد روسازی بتنی بلوکی و انتخاب بهترین الگوی چیدمان بلوکها بود. دستیابی به هدف فوق با ساخت نمونه روسازی بلوکی بتنی به شکل مکعبی به ضلع ۱ متر و مدلسازی در نرم افزار *SAP2000* صورت پذیرفت. در این نمونه چهار نوع بارگذاری توسط جک هیدرولیک اعمال گردید و حوضچه تغییر شکل سطح روسازی اندازه گیری و ثبت شد [۱۲]. در همین زمینه با تلفیقی از مدلسازی سه بعدی و ساخت نمونه واقعی تحقیقی انجام شد که در آن نمونه واقعی روسازی به طول تقریبی ۲۰ متر در سه مقطع با سه نوع بلوک در ضخامت ها و ابعاد مختلف ساخته شد و در یک بازه زمانی ۱۴ ماهه آزمایش وزنه افت و خیز سنج افتان<sup>۳</sup> روی آن انجام شد. با نتایج این آزمایش و با روش محاسبات برگشتی، مدول الاستیک روسازی تعیین و از آن برای ساخت مدل سه بعدی به روش المان محدود استفاده گردید [۱۳]. با مطالعه تحقیقات گذشته این نتیجه بدست می آید که میزان تاثیر مشخصات مقاومتی خاک بستر بر پاسخ روسازی بتنی بلوکی به بارهای ترافیکی هواپیما از نوع ایستایی مورد بررسی قرار نگرفته است. در نگاه نخست به نظر میرسد در فرودگاه هایی که بر اساس الزامات سازمان هوانوردی فدرال از لایه اساس تثبیت شده (مثلا اساس سیمانی) استفاده شده باشد، نقش مصالح خاکی زیرین در میزان نشست رویه بتنی بلوکی کاهش می یابد. اینکه میزان این کاهش چقدر میتواند باشد و آیا در صورت بهبود مقاومت خاک بستر تاثیر وجود اساس سیمانی تا چه حد تعدیل میشود، موضوعی است که در این پژوهش بر روی آن بحث شده است.

## ۲. روش پژوهش

در این تحقیق با هدف بررسی تاثیر مشخصات مقاومتی خاک بستر که ساختار روسازی بر روی آن قرار دارد، نتایج تحلیل مدلی از روسازی بتنی بلوکی به روش اجزای محدود ارایه شده است. مشخصاتی که در این مدل سه بعدی برای لایه های روسازی بعنوان ورودی نرم افزار در نظر گرفته شده، همگی بر اساس نتایج بررسیهای میدانی و آزمایشگاهی بوده است. در این پژوهش نمونه ای از روسازی بتنی بلوکی به شکل مربع و به ضلع ۲ متر شامل لایه های خاک بستر، زیر اساس، اساس و اساس تثبیت شده سیمانی<sup>۴</sup>، هر یک به ضخامت ۱۵ سانتیمتر، بالشتک ماسه ای<sup>۵</sup> به ضخامت ۳ سانتیمتر و رویه بلوک بتنی به ابعاد ۲۲/۵\*۱۱/۵\*۸ سانتیمتر به همراه ماسه درزگیر و با چیدمان جناغ ماهی<sup>۶</sup> ساخته شد. در این تحقیق از نرم افزار آباکوس برای ساخت مدل سه بعدی استفاده شده است. همه کنترل ها و آزمایشهای لازم نیز مانند انتخاب دانه بندی، طرح اختلاط اساس سیمانی، مقاومت فشاری، خمشی، *CBR*<sup>۷</sup>، تراکم و دوام مصالح سنگدانه ای، مطابق معیار های سازمان هوانوردی فدرال

<sup>1</sup> Slab Analysis Finite Element (SAFE)

<sup>2</sup> ABAQUS

<sup>3</sup> Falling Weight Deflectometer (FWD)

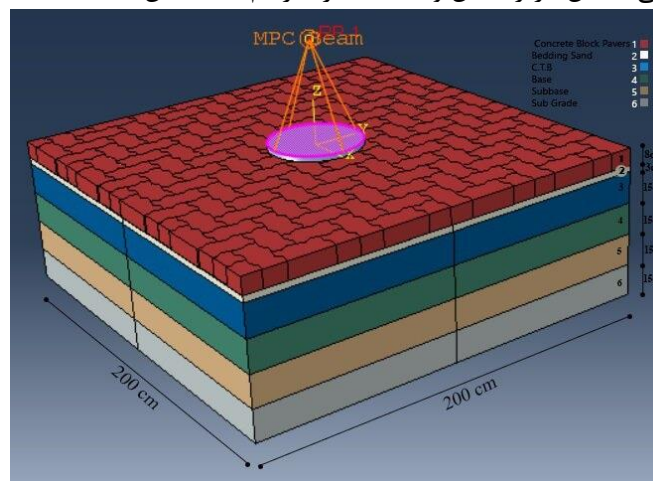
<sup>4</sup> Cement Treated Base (CTB)

<sup>5</sup> Bedding Sand

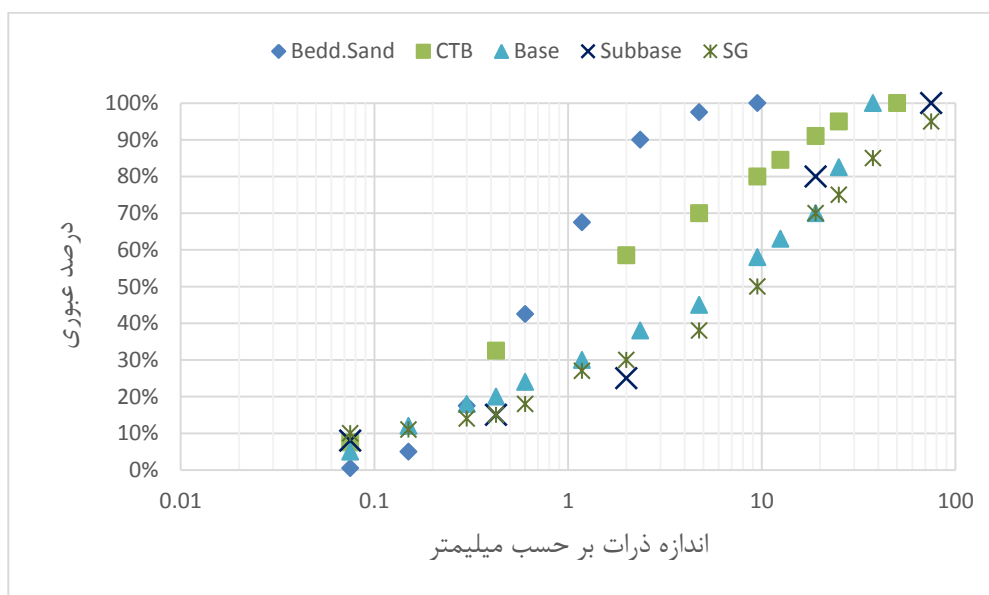
<sup>6</sup> Herringbone

<sup>7</sup> California Bearing Ratio (CBR)

<sup>۲۰</sup> انجام شدند. لایه اساس تثبیت شده سیمانی با این استدلال استفاده شد که فرض شده است این مقطع برای روسازی هایی استفاده شود که مطابق ضوابط سازمان هوانوردی فدرال، برای توقف هواپیماهایی با وزن ناخالص بیش از ۴۵ تن مورد بهره برداری قرار بگیرد. روش تحقیق روی مقطع مفروض در نرم افزار تحلیل اجزاء محدود بدین گونه انتخاب شد که تغییر مکان سطح روسازی ناشی از ورود بار قائم بر روی صفحه فولادی دایره ای شکل به قطر ۴۵ سانتیمتر در مقادیر مختلف نیروی قائم بدست آمده و به ازای مقادیر مختلف *CBR* شامل ۲،۵،۱۰،۱۵،۲۰ پاسخ روسازی و رفتار آن ارزیابی گردد. در شکل ۱ نمای کلی از مقطع روسازی بتنی بلوکی فرودگاهی<sup>۲۱</sup> ساخته شده در این تحقیق به همراه صفحه فولادی قرار گرفته روی آن به قطر 45cm و ضخامت 2.5 cm نشان داده شده است. در شکل ۲ منحنی دانه بندی مصالح سنگدانه ای لایه های زیر بلوکهای بتنی شامل بالشتک ماسه ای، اساس سیمانی، اساس، زیر اساس و خاک بستر متراکم شده نشان داده شده است.



شکل ۱- مشخصات مدل سه بعدی روسازی بتنی بلوکی فرودگاهی در این تحقیق.



شکل ۲- دانه بندی مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه روسازی بتنی بلوکی فرودگاهی (ACBP)

<sup>20</sup> Federal Aviation Administration (FAA)

<sup>21</sup> Airfield Concrete Block Pavement (ACBP)

در جدول ۱ مشخصات فنی مصالح خاک بستر و زیر اساس ارایه شده است. جهت کنترل کیفیت این مصالح ضوابط دستورالعمل سازمان هوانوردی فدرال مورد توجه قرار گرفته شده است. [۱۴]، [۱۵]

جدول ۱- برخی نتایج آزمایش های مکانیک خاک روی مصالح زیر اساس و خاک بستر

حدروانی (نکته ۱) L.L.	دامنه خمیری P.I.	هم ارز ماسه %	$\omega_{opt}$ درصد رطوبت بهینه %	$\gamma_{dmax}$ حداکثر دانسیته خشک (kg/cm <sup>3</sup> )	$\phi^\circ$ زاویه اصطکاک داخلی	C چسبندگی (kg/cm <sup>2</sup> )
ASTM D4318		ASTM D2419	AASHTO T180(D)		ASTM D3080	
۱۸	NP.(غیر خمیری)	۲۵/۲۵	۶/۲	۲۲۸۰	۳۸	۰/۰۷
نکته ۱: آزمایش حدود اتبرگ (تعیین حد روانی و خمیری) بر روی بخشی از مصالح که ریز تر از ۰/۴ میلیمتر (الک شماره ۴۰) هستند انجام شده است.						

مطابق الزاماتی که در دستورالعمل سازمان هوانوردی فدرال بند ۱۵۴ ذکر شده مهمترین مشخصه مصالح زیر اساس CBR است که باید حداقل ۲۰٪ باشد. در جدول ۲ میتوان خلاصه نتایج آزمایش CBR مصالح زیر اساس و خاک بستر مطابق استاندارد AASHTO-T193 را مشاهده نمود.

جدول ۲- نتایج آزمایش CBR روی مصالح زیر اساس و خاک بستر در درصد تراکم های مختلف

% CBR در حالت اشباع			% CBR در حالت خشک		
% تراکم			% تراکم		
۹۰	۹۵	۱۰۰	۹۰	۹۵	۱۰۰
۳۴	۷۹	۹۷	۴۴	۱۲۱	۱۴۰

در جدول ۳ مشخصات مصالح اساس سنگدانه ای ذکر شده است. در مدلسازی این مصالح باید مدول الاستیک و پارامترهای برشی آن در نرم افزار ثبت گردد. بنابراین مصالح سنگ شکسته تولید شده در کارخانه، انتخاب و پس از تفکیک و ساخت نمونه های آزمایشگاهی بر مبنای الزامات دستورالعمل سازمان هوانوردی فدرال، بند ۲۰۹ مورد آزمایش قرار گرفتند [16].

جدول ۳- خلاصه نتایج آزمایشهای مکانیک خاک روی مصالح اساس سنگدانه ای

سایش لس انجلس %	دوام در برابر $Na_2SO_4$ (افت وزنی) %		شکستگی در یک وجه %	پولکی و سوزنی %	هم ارز ماسه %	$\phi^\circ$ زاویه اصطکاک داخلی	C چسبندگی (kg/cm <sup>2</sup> )
	درشت دانه	ریزدانه					
۲۵	۱/۴۱	۲/۶۲	۱۰۰	۵	۸۰	۴۴	۰/۰۵

همانگونه که گفته شد یکی از مهمترین آزمایشها CBR است که میتوان بر مبنای آن اقدام به محاسبه مدول الاستیک مصالح نمود. این آزمایش بر روی نمونه مصالح اساس سنگدانه ای مطابق استاندارد AASHTO T- ۱۹۳ انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ آمده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش CBR روی مصالح اساس سنگدانه ای

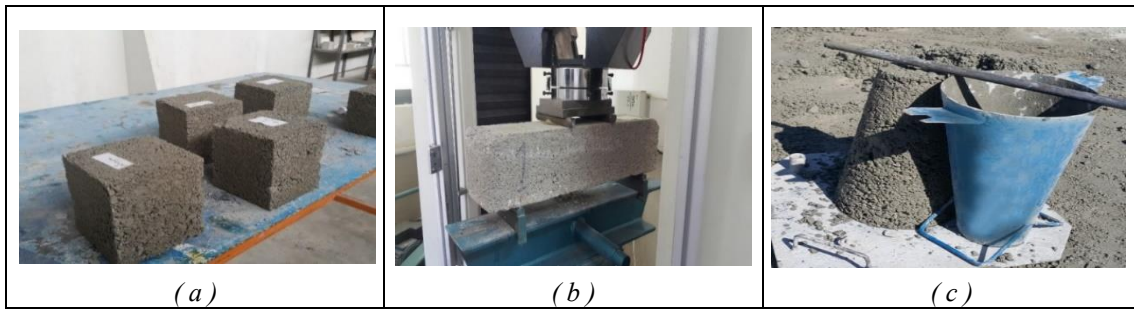
CBR % در حالت اشباع			CBR % در حالت خشک		
% تراکم			% تراکم		
۹۰	۹۵	۱۰۰	۹۰	۹۵	۱۰۰
۲۵	۹۳	۱۰۹	۶۵	۹۹	۱۴۲

همانطور که قبلاً در خصوص فرودگاههایی با بار هواپیماهای با وزن بیش از ۴۵ تن گفته شد می بایست بعد از اجرای لایه اساس سنگدانه ای، یک لایه مصالح تثبیت شده اجرا کرد. در این تحقیق مشخصاتی که در بند ۳۰۴ دستورالعمل سازمان هوانوردی فدرال، برای فرودگاهها ارزیاب شده، ملاک انتخاب این لایه قرار گرفت [۱۷]. نتیجه بررسی مصالح سنگدانه ای لایه اساس سیمانی در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵- خلاصه نتایج آزمایش روی مصالح سنگدانه منتخب در اساس سیمانی (CTB)

سایش لس آنجلس %	دوام در برابر Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%افت وزنی)		وزن مخصوص ظاهری Sp. g (Kg/m <sup>3</sup> )		جذب آب %		درصد وزنی دانه های سوزنی و پولکی %	دامنه خمیری %
	درشت دانه	ریزدانه	مانده روی الک 3/16 in	عبوری از الک 3/16 in	مانده روی الک 3/16 in	عبوری از الک 3/16 in		
۲۵	۱/۴۱	۲/۶۲	۲۷۰۰	۲۷۳۱	۰/۹	۱/۴	۵	NP.

مطابق بند ۳۰۴ دستورالعمل سازمان هوانوردی فدرال، مقاومت فشاری هفت روزه نمونه استوانه ای اساس سیمانی مطابق استاندارد ۱۶۳۳-ASTM D که برای آزمایش مقاومت فشاری خاک-سیمان ۲۲ بکار میرود، باید بین ۲۱ تا ۴۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باشد. لازم به ذکر است در این تحقیق از سیمان تیپ ۲ استفاده شده و هیچگونه ماده افزودنی نیز در ساخت نمونه ها بکار نرفت. در شکل ۳-a نمونه های ساخته شده اساس سیمانی برای آزمایش فشاری و در شکل ۳-b نمونه های خمشی برای تست مدول گسیختگی، طبق استاندارد ۷۸-ASTM C روی نمونه های مکعب مستطیلی به طول ۶۰ سانتیمتر و مقطع مربعی به ضلع ۱۵ سانتیمتر نشان داده شده است. یکی از ویژگیهای اساس سیمانی آن است که در پروژه های بزرگ به وسیله ماشین آلات ویژه ای مانند غلتک باید متراکم شود و بنابراین اسلامپ آن باید نزدیک به صفر باشد. در شکل ۳-c نمونه ساخته شده اساس سیمانی که تحت آزمایش اسلامپ قرار گرفت، مشاهده میشود.



شکل ۳. نمونه ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر اساس سیمانی (a)، آزمایش مدول گسیختگی (b)، آزمایش اسلامپ روی اساس سیمانی (c)

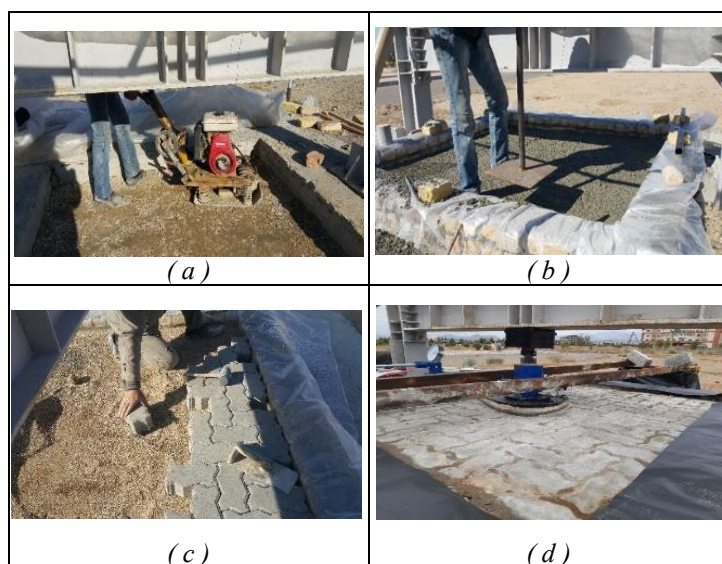
در جدول ۶، طرح اختلاط اساس سیمانی مطابق ضوابط سازمان هوانوردی فدرال و میانگین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و همچنین میانگین مدول گسیختگی نمونه های خمشی قابل مشاهده است. همانگونه که گفته شد برای تعیین مدول گسیختگی، می بایست مطابق استاندارد ASTM C-۷۸ عمل شود. در این استاندارد پارامتر نرخ افزایش تنش (S) در تار تحتانی بر مبنای دو پارامتر به نام های نرخ بارگذاری (بر حسب نیرو در واحد زمان) و ابعاد نمونه محاسبه میشود. مطابق این استاندارد نرخ بارگذاری بگونه ای باید باشد که مقدار S بین ۹ تا ۱۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ازای هر دقیقه ( $kg/cm^2/min$ ) باشد [۱۸].

جدول ۲. مشخصات اساس سیمانی (CTB) ساخته شده

مدول گسیختگی ( $kg/cm^2$ )	نرخ افزایش تنش در تار تحتانی ( $kg/cm^2$ ) /min	مقاومت فشاری ۲۸ روزه ( $kg/cm^2$ )	مقاومت فشاری ۷ روزه ( $kg/cm^2$ )	وزن حجمی ( $kg/m^3$ )	عیار سیمان ( $kg/m^3$ )
۱۴/۹	۱۰	۷۰	۴۰	۲۱۹۵	۱۴۵

در این تحقیق پس از ساخت سامانه ای شامل شالوده صلب بتنی و قاب فولادی بعنوان تکیه گاه جک هیدرولیک و ایجاد فضای خالی در وسط آن به مساحت ۴ متر مربع، مصالح سنگدانه ای خاک بستر، زیر اساس، اساس و اساس سیمانی بصورت جداگانه دانه بندی، توزین و در لایه های ۱۵ سانتیمتری به ابعاد ۲×۲ متر پخش و پس از اختلاط و آبپاشی به میزان رطوبت بهینه، با کوبنده مکانیکی، متراکم گردید. شکل 4-a مرحله کوبیدن لایه های سنگدانه ای و شکل 4-b اجرای لایه اساس سیمانی را نشان می دهند. این لایه پس از پخش شدن روی اساس سنگدانه ای به خوبی توانست وزن عوامل اجرایی را قبل از تکمیل شدن تراکم تحمل بنماید.

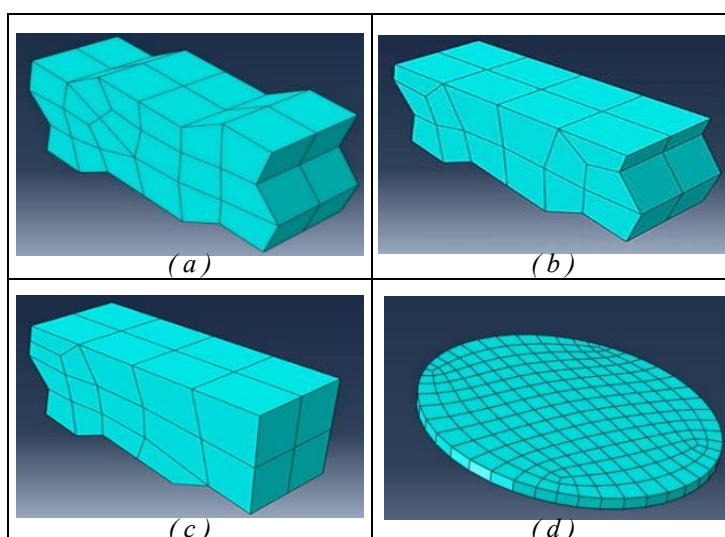




شکل ۴. مراحل اجرای لایه های خاکی (a)، لایه اساس سیمانی (b)، بلوک چینی روی بالشتک ماسه ای (c) و بارگذاری صفحه (d)

پس از اجرای اساس سیمانی و طی دوره عمل آوری آن به مدت یک ماه، اقدام به پخش و تراکم بالشتک ماسه ای و سپس استقرار بلوک های بتنی گردید (شکل c-۴). برای مصالح بالشتک ماسه ای نیز باید از مصالحی استفاده کرد که قطر آنها از ۹/۵ میلیمتر یا الک 3/8 اینچ کوچکتر باشد [۱۹]. پس از اتمام بلوک چینی و حدود یک هفته فاصله زمانی، مطابق شکل d-۴ اقدام به بارگذاری صفحه شد و به ازای بارگذاری از نوع استاتیکی تا حداکثر ۱۲ تن که به صورت پلکانی از ۲ تن شروع شد، میزان نشست در وسط روسازی ثبت شد. قرائت ها جهت ثبت میزان نشست نیز در فواصل زمانی ۲، ۴، ۶، ۸ دقیقه ای پس از اعمال بار قائم انجام گردید. پس از این مرحله در فرایند مدلسازی به روش سعی و خطا مدول الاستیک رویه بلوک و ماسه درزبند آن برابر ۲۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (به جدول ۷ رجوع شود) بدست آمد که مبنای مقایسات بعدی نشست به ازای مقادیر مختلف CBR قرار گرفت. در این پژوهش برای ساخت مدل سه بعدی از نرم افزار آباکوس استفاده شد.

در شکل a-۵ تا d-۵ مدل های مختلف بلوک بتنی و صفحه فولادی به همراه مش بندی مفروض نشان داده شده است.



شکل ۵. بلوکهای بتنی شبیه سازی شده (a,b,c) و صفحه فولادی به قطر ۴۵ و ضخامت ۲/۵ سانتیمتر در تست بارگذاری صفحه (d)

در این تحقیق برای ارزیابی رفتار روسازی در برابر بار عمودی یک چرخ هواپیما و رسم نمودار نیروی قائم - نشست، یک نقطه مرجع در بالای روسازی که با تیرهای فرضی به محیط صفحه فولادی متصل بود، تعریف شد. برای مصالح تشکیل دهنده لایه های مختلف این مدل نرم افزاری در بخش خصوصیت مواد<sup>۲۳</sup> با توجه به نتایج آزمایشهایی که بر روی مصالح انجام شده بود، مطابق جدول ۷ اقدام به تعیین مشخصات فنی و رفتاری اجزای مدل گردید [۲۰].

جدول ۷. مشخصات مصالح تعریف شده در مدلسازی سه بعدی بر اساس نتایج آزمایشگاهی

خصوصیات مصالح	ضخامت (cm)	$\phi$	C (kg/cm <sup>2</sup> )	ضریب پواسون (ν)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	دانسیته (D) (kg/m <sup>3</sup> )			
صفحه بارگذاری	۲/۵۴	--	--	۰/۳	۲۱۰۰۰۰۰	۷۸۵۰			
لایه بلوک و ماسه درزبند	۸	--	--	۰/۳	[۲۰]۲۰۰۰۰	۲۲۵۰			
بالشتک ماسه ای	۳	۳۲	۰/۰۳۹	۰/۳۵	۷۰۰	۱۷۰۰			
اساس سیمانی	۱۵	--	--	۰/۲	۱۲۷۰۰۰	۲۱۹۵			
اساس سنگدانه ای	۱۵	۴۴	۰/۰۴۹	۰/۳	۹۷۲۰	۲۲۹۰			
زیر اساس	۱۵	۳۸	۰/۰۶۸	۰/۳	۶۲۲۰	۲۱۶۶			
خاک بستر	۱۵	۳۸	۰/۰۶۸	۰/۳	%CBR				
					۲۰	۱۵	۱۰	۵	۲
					D=۲۱۳۸ E=۲۰۶۰	D=۲۱۳۰ E=۱۵۵۰	D=۲۱۲۰ E=۱۰۳۰	D=۲۱۱۳ E=۵۱۶	D=۲۱۰۰ E=۲۰۶

در خصوص ردیف مربوط به خاک بستر مشاهده می شود که با توجه به هدف تحقیق که بررسی تاثیر مشخصات مقاومتی خاک بستر در عملکرد روسازی بلوکی بود، ۵ مقدار مختلف برای CBR فرض شد و به ازای هر یک، مقادیر وزن مخصوص و مدول الاستیک محاسبه گردید و بعنوان ورودی نرم افزار در هر یک از دفعات تحلیل استفاده شد. برای تعیین مدول الاستیک بر حسب پوند بر اینچ مربع ( $psi$ )، از رابطه ۱ مندرج در دستورالعمل سازمان هوانوردی استفاده شده است [۲۱].

$$E=1500 \times CBR$$

رابطه ۱:

برای مدول الاستیک اساس سیمانی، بر مبنای مقاومت 28 روزه استوانه بتنی ( $f'c$ ) بر حسب  $psi$  رابطه ۲ بر قرار است [۲۲]، [۲۳]

$$E=57000\sqrt{f'c}$$

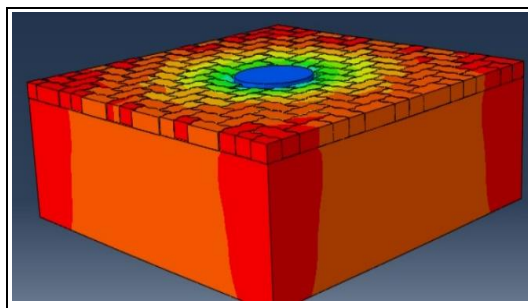
رابطه ۲:

با توجه به اینکه مقاومت نمونه اساس سیمانی مطابق آنچه در جدول ۶ برابر با ۷۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (۶/۹ مگاپاسکال) یا ۱۰۰۶ پوند بر اینچ مربع بود، مدول الاستیک آن از رابطه ۲ تقریباً برابر است با ۱۲۷۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع.

### ۳. یافته ها

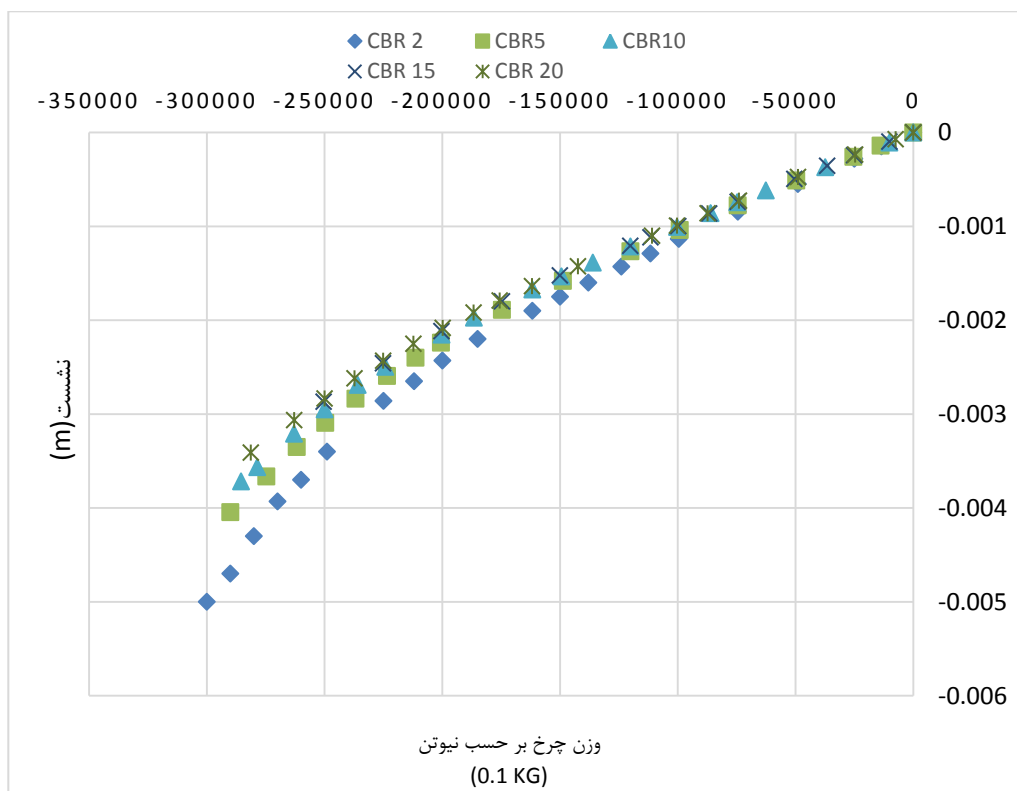
در شکل ۶ نمونه وضعیت تغییر شکل یافته مدل روسازی بتنی بلوکی، به ازای یکی از مقادیر CBR خاک بستر، نشان داده شده است.

<sup>23</sup> Material Property



شکل ۶: نمایی از مدل سه بعدی روسازی بتنی بلوکی به همراه صفحه فولادی در مرکز آن برای شبیه سازی بارگذاری صفحه

در خصوص اندازه و مقدار بار قائم تحمیل شده به روسازی از جانب چرخ هواپیما باید متذکر شد که معمولا ۹۵٪ وزن ناخالص هواپیما توسط محورهای اصلی نشست و فقط ۵٪ آن توسط محور دماغه تحمل میشود. باید در نظر داشت نوع خاصی از هواپیما مانند بوئینگ ۷۴۷ دارای وزن ناخالصی در حدود ۴۵۰ تن میباشد و فشار یک چرخ در محور اصلی نشست این هواپیما در حدود ۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع معادل ۲۲۰ پوند بر اینچ مربع میباشد. بنابراین تحلیل مدل نرم افزاری، بگونه ای انجام شد که در نمودار فشار - نشست، مقادیر نیرو یا فشار معادل آن نزدیک به مقادیر واقعی باشند. در شکل ۷ تغییرات نشست سطح روسازی ناشی از نیروی قائم یک چرخ به ازای CBR های مختلف خاک بستر نشان داده شده است.



شکل ۷. تغییرات نشست سطح روسازی در برابر وزن چرخ هواپیما به ازای CBR های مختلف خاک بستر

در شکل ۷ مشاهده میشود که تغییر شکل کلی روسازی به ازای CBR های ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ خیلی به هم نزدیک است و تقریباً به ازای طیف وسیعی از مقادیر نیرو تقریباً بر هم منطبق می باشند. فقط در مقاومت های پایین یعنی CBR ۲ و ۵٪ است که نتایج را میتوان به آسانی از هم تفکیک نمود. به عبارتی دیگر رفتار روسازی بلوکی مدل شده در این تحقیق در صورت استفاده از خاک بستری که دارای CBR ۱۰٪ است، مشابه حالتی است که در آن CBR خاک بستر ۱۵ یا ۲۰٪ باشد. به یقین میتوان علت را وجود لایه اساس سیمانی دانست که نقش مهمی را در توزیع بهتر بار ترافیکی در یک سطح وسیع ایفا مینماید. بنابر آنچه گفته شد انتخاب مقطع روسازی بلوکی از مصالح مورد استفاده در این تحقیق و با ضخامت های در نظر گرفته شده، نیازی به خاک بستری با CBR بیش از ۱۰٪ ندارد. با رسم نمودار نیرو - نشست مشخص شد که در مقاومت های پایین خاک بستر، با وجود لایه های مترکم شده سنگریزه ای و همچنین اساس سیمانی، تغییر مکان زیادی به روسازی تحمیل میشود اما با افزایش مقاومت خاک بستر، این حساسیت تا حد زیادی کاهش می یابد. با انجام یک آنالیز حساسیت میتوان به مقادیری دست یافت که به طراحان روسازی کمک خواهند کرد تا بر اساس نوع ترکیب بندی لایه ها از خاک بستر مناسب و البته مقرون بصرفه استفاده نمایند. در جدول ۸ نتیجه تحلیل حساسیت نشست روسازی به ازای مقادیر مختلف CBR خاک بستر و اعمال تغییرات پلکانی آن ارایه شده است.

جدول ۸. تحلیل حساسیت نشست نسبت به افزایش CBR خاک بستر به ازای مقادیر مختلف وزن چرخ هواپیما

	وزن چرخ: ۲۰۰۰۰ کیلوگرم فشار معادل وارده بر صفحه فولادی به قطر ۴۵ سانتیمتر حدود ۱۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (۱۸۰ پوند بر اینچ مربع)				وزن چرخ: ۲۵۰۰۰ کیلوگرم فشار معادل وارده بر صفحه فولادی به قطر ۴۵ سانتیمتر حدود ۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (۲۲۳ پوند بر اینچ مربع)											
	تاثیر افزایش CBR ۲٪ به CBR ۵٪		تاثیر افزایش CBR ۵٪ به CBR ۱۰٪		تاثیر افزایش CBR ۱۰٪ به CBR ۱۵٪		تاثیر افزایش CBR ۱۵٪ به CBR ۲۰٪		تاثیر افزایش CBR ۲٪ به CBR ۵٪		تاثیر افزایش CBR ۵٪ به CBR ۱۰٪		تاثیر افزایش CBR ۱۰٪ به CBR ۱۵٪		تاثیر افزایش CBR ۱۵٪ به CBR ۲۰٪	
	%۲CBR	%۵CBR	%۵CBR	%۱۰CBR	%۱۰CBR	%۱۵CBR	%۱۵CBR	%۲۰CBR	%۲CBR	%۵CBR	%۵CBR	%۱۰CBR	%۱۰CBR	%۱۵CBR	%۱۵CBR	%۲۰CBR
نشست (mm)	۲/۴۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۱	۲/۸	۲/۴۳	۲/۱	۲/۱	۲/۹۵	۲/۹۵	۲/۸۵	۲/۸۵	۲/۸۵	
درصد تغییرات نشست (کاهش)	۸/۲	۲/۲۳	۱/۸	۱/۴	۹/۶	۴/۸	۳/۳	۰/۷								
	تاثیر افزایش CBR ۲ به ۵٪ به ۱۰٪				تاثیر افزایش CBR ۱۰ به ۱۵٪ به ۲۰٪				تاثیر افزایش CBR ۲ به ۵٪ به ۱۰٪				تاثیر افزایش CBR ۱۰ به ۱۵٪ به ۲۰٪			
درصد تغییرات نشست (کاهش)	۱۱/۵				۳/۲				۱۳/۹				۴/۱			

با بررسی مقادیر جدول ۸ و روند کاهش درصد تغییرات نشست سطحی روسازی، در می یابیم که به دلیل رفتار غیر خطی روسازی (شکل ۷)، هرچه وزن چرخ هواپیمای طرح سنگین تر باشد (۲۵ تن در برابر ۲۰ تن)، روند کاهش درصد تغییرات نشست روسازی به ازای افزایش مقاومت خاک بستر شدید تر است. نکته اینجاست که این مقدار شدت در روند کاهش، صرف نظر از وزن چرخ، فقط تا  $CBR 10\%$ ، چشمگیر است و در مقادیر بیشتر از آن میتوان از تاثیر افزایش  $CBR$  صرف نظر کرد زیرا هرچه  $CBR$  خاک بستر افزایش یابد، نقش اساس سیمانی در توزیع تنش ها تعدیل میشود و به همین دلیل است که از روند کاهش نشست روسازی بتنی بلوکی هم کاسته میشود.

به نظر می رسد وجود لایه اساس سیمانی که مدول الاستیک آن در این مدل با توجه به کیفیت مصالح انتخاب شده حدود ۱۵ برابر مدول الاستیک لایه اساس سنگدانه ای بوده است، نقش زیادی در باز توزیع فشار ناشی از چرخ دارد که این امر بطور قابل ملاحظه ای از نقش لایه خاک بستر در تحمل فشار قائم کاسته است.

#### ۴. جمع بندی و نتیجه گیری

با هدف ارزیابی تاثیر مقاومت خاک بستر بر رفتار روسازی بتنی بلوکی فرودگاهی که معمولاً بین دو نوع سیستم روسازی صلب بتنی و انعطاف پذیر آسفالتی قرار گرفته و به آن روسازی نیمه صلب نیز اطلاق میشود، یک سامانه تحقیقاتی شامل شالوده صلب بتنی و یک قاب فولادی بعنوان تکیه گاه جک بارگذاری صفحه اجرا و یک نمونه روسازی بتنی بلوکی به ابعاد ۲ در ۲ متر و ضخامت تقریبی ۷۰ سانتیمتر با رعایت الزامات دستورالعمل سازمان هوانوردی فدرال شامل لایه های سنگریزه ای و اساس سیمانی ساخته شد و رویه بلوکی با چیدمان جناغ ماهی متشکل از بلوکهای کفپوش بتنی و بالشتک ماسه ای روی آن اجرا گردید. هدف ویژه این تحقیق ارزیابی تاثیر مقاومت خاک بستر (پارامتر  $CBR$ ) بر روی میزان نشست سطحی روسازی بتنی بلوکی تحت اثر بار قائم از نوع ایستایی بود. علت استفاده از ماهیت ایستایی بار قائم آن بود که روسازی بتنی بلوکی در نواحی که سرعت حرکت کم باشد توجیه اجرایی و اقتصادی دارد. پس از اجرای نمونه روسازی و انجام بارگذاری با صفحه فولادی دایره ای به ضخامت ۲/۵ و قطر ۴۵ سانتیمتر و ثبت نشست در مرکز نمونه به ازای مقادیر مختلف بار قائم، از نرم افزار آباکوس برای شبیه سازی بارگذاری صفحه استفاده گردید. بر اساس نتایج آزمایشهای  $CBR$  و تراکم خاک در آزمایشگاه و در محل و اندازه گیری درصد تراکم صحرائی هر یک از لایه ها، متغیرهای ورودی نرم افزار آباکوس برای مدلسازی، تعیین و در نهایت با اعمال تغییرات پله ای برای  $CBR$  خاک بستر که خود متغیری برای تخمین مدول الاستیک لایه هاست، میزان نشست سطح روسازی بلوکی به ازای مقادیر مختلف وزن استاتیکی یک چرخ هواپیما بدست آمد. در انتها یک تحلیل حساسیت به ازای دو وزن مختلف که نزدیک به وزن استاتیکی یک چرخ در محور اصلی نشست هواپیمایی مانند بوئینگ ۷۴۷ پهن پیکر با وزن تقریبی ۴۵۰ تن (۴۵۰۰۰۰ کیلوگرم) بودند انجام شد تا مشخص شود تغییرات  $CBR$  خاک بستر چقدر بر میزان نشست رویه بلوکی بتنی اثر گذار است. در ضمن با این تحقیق مشخص شد که استفاده از چه خاکی با چه مقدار  $CBR$  بعنوان خاک بستر در زیر لایه های روسازی بتنی بلوکی صرفه اقتصادی دارد. بدین ترتیب میتوان به این سوال که آیا استفاده از مصالح خاک بستر با  $CBR$  زیاد منجر به بهبود عملکرد روسازی میشود یا خیر؟ پاسخ داده شود. طرح این بحث در روسازی های بتنی بلوکی که الزاماً باید در سطوح پروازی با هواپیمای طرحی مشابه بوئینگ ۷۴۷ شامل حداقل یک لایه تثبیت شده باشند، اهمیت زیادی دارد. بطور کلی موارد ذیل بعنوان نتیجه گیری نهایی از این تحقیق میدانی - نرم افزاری قابل ارایه است:

\* تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش *CBR* خاک بستر از ۲٪ به ۱۰٪، نشست روسازی بطور میانگین به ازای دو وزن مختلف ۲۰ و ۲۵ تن، ۱۲/۵٪ که دلیل اصلی آن بهبود توانایی قشر خاک بستر و مشارکت بهتر آن با اساس تثبیت شده با سیمان در توزیع بارهای وارده است، کاهش می یابد.

\* در صورت افزایش *CBR* از ۱۰٪ به ۲۰٪ کاهش میزان نشست به ازای وزن های مختلف، کمتر از ۴٪ است که از جمله دلایل آن علاوه بر رفتار غیر خطی مصالح، میتوان به تعدیل نقش اساس سیمانی در مقایسه با حالتی که *CBR* خاک بستر کمتر از ۱۰٪ باشد، اشاره نمود. لذا می توان ادعا نمود که در صورت اجرای لایه های در نظر گرفته شده در این تحقیق، استفاده از خاک بستری با *CBR* حداکثر برابر ۱۰٪، اقتصادی تر است.

\* میتوان دلیل کلی این مقدار کاهش درتاثیر *CBR* خاک بستر را به رفتار غیر خطی و استفاده از اساس سیمانی مرتبط دانست. به طور حتم در این فرایند، استفاده از لایه اساس سیمانی که نسبت به لایه اساس سنگدانه ای از مدول الاستیک بالاتری برخوردار است، تاثیر مهمی دارد.

##### ۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مدیریت مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه ای و بتن توانمند دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان و مدیریت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان سمنان تقدیر و تشکر بعمل می آید.

##### ۶-مراجع:

1. Ziari, H., P. Hayati, and J. Sobhani, *Airfield self-consolidating concrete pavements (ASCCP): Mechanical and durability properties. Construction and Building Materials*, 2014. 72: p. 174-181.
2. Ziari, H., P. Hayati, and J. Sobhani, *Air-Entrained Air Field Self-Consolidating Concrete Pavements: Strength and Durability. International Journal of Civil Engineering*, 2016. 15.
3. Jamshidi, A., et al., *State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement. Construction and Building Materials*, 2019. 200: p. 713-755.
4. Knapton, J. and S.D. Barber, *UK Research into block pavement design. The first Int. conf. on concrete block paving*, 1980: p. 33-37.
5. Shackel, B., *The design of interlocking concrete block pavements for road traffic. concrete block paving*, 1980: p. 23-32.
6. Emery, J.A., *Concrete block paving for aircraft hardstandings and turning areas. Second Int. conf. on concrete block paving*, 1984.
7. Vroombout, F., R. Monteith, and K.G. Sharp, *The use of interlocking concrete blocks on an aircraft pavement in Australia. pave92*, 1992: p. 217-230.
8. Knapton, J., *The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries. 4 ed. 2008, UK: interpave, the precast concrete paving and kerb association. 38.*
9. Moghadas Nejad, F. and M.R. Shadravan, *A study on behavior of block pavement using 3D finite element method, in 8th International Conference on Concrete Block Paving. 2006: San Francisco, California, USA. p. 349-358.*
10. Hassani, A. and A. Jamshidi. *Modeling and structural design of a concrete block pavement system. in 8th international conference on concrete block paving. 2006.*
11. Shafabakhsh, G., A. Family, and B.P.H.J.E.J. Abad, *Numerical analysis of concrete block pavements and comparison of its settlement with asphalt concrete pavements using finite element method. 2014. 18(4): p. 39-51.*

12. Mampearachichi, W.K. and W.P.H. Gunarathna, *Finite-Element Model approach to determine support conditions and effective layout for concrete block paving. Materials in civil engineering*, 2010: p. 1139-1147.
13. Nishizawa, T., et al., *A model for predicting permanent deformation of interlocking concrete block pavements on heavy duty roads, in 12th International Conference on Concrete Block Pavement*. 2018: Seoul, Korea.
14. FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports, in Item P-152 Excavation, Subgrade, and Embankment*. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 103.
15. FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports, AC 150/5370-10H, in Item P-154 Subbase Course*. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 121.
16. FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports, AC 150/5370-10H, in Item P-209 Crushed Aggregate Base Course*. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 173.
17. FAA, *Standard Specifications for Construction of Airports, AC 150/5370-10H, in Item P-304 Cement-Treated Aggregate Base(CTB)*. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 231,232.
18. ASTM C78, *in Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading) ASTM C78*. 2018.
19. McQueen, R.D., et al., *Airfield pavement design with concrete pavers, a comprehensive guide*. 4 ed. 2010, USA: Interlocking Concrete Pavement Institute. 62.
20. Taheri, V., M. Fakhri, and P. Hayati, *Evaluation of airfield concrete block pavements based on 3-D modelling and plate loading test. Construction and Building Materials*, 2021. 280: p. 122441.
21. FAA, *Airport Pavement Design and Evaluation AC 150/5320-6F, in Pavement Design*. 2016, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 3-42.
22. Huang, Y.H., *Pavement Analysis and Design*. 2 ed. 2004, USA: Pearson.
23. Organization, I.N.S., *Concrete paving blocks-Requirements and test methods*. 2015, INSO: IRAN. p. 70.