

## ارزیابی روسازی باند بتنی فرودگاه تحت بار ضربه به روش عددی

### ایزوژنومتریک

#### مقاله علمی - پژوهشی

مهدی عباسی سردارآبادی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاداسلامی، شاهرود، ایران  
احمد گنجعلی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاداسلامی، شاهرود، ایران  
احسان کاشی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاداسلامی، شاهرود، ایران  
حمیدرضا ایرانی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاداسلامی، شاهرود، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ahmad.ganjali@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۵۰۰-۴۸۵

#### چکیده

امروزه با توسعه صنعت هوانوردی و پیدایش هواپیماهای پیکر نیاز به ساخت باندهای پرواز مناسب، جهت بهره برداری ضروری است از این رو روسازی باند فرودگاه به دلیل فرود سخت هواپیما همیشه در معرض بارهای ضربه ای شدید قرار می گیرند. با توجه به اینکه تحقیقات محدودی بر روی روسازی های صلب بتنی تحت بار ضربه صورت گرفته این تحقیق نسبت به توسعه روش نوین حل عددی ایزوژنومتریک بر روی باند فرودگاه تحت بارگذاری ضربه پرداخته و نتایج تحلیل ایزوژنومتریک با نتایج اجزا محدود و آزمایشگاهی WU (۲۰۱۸) اعتبار سنجی می گردد. با توجه به انتخاب درجات آزادی کمتر در روش ایزوژنومتریک نسبت به روش اجزا محدود مشاهده شد نتایج روش مذکور با هزینه محاسباتی و درصد خطا کمتر به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر بوده که علت آن بهره گیری از نرئز و بی اسپیلاین ها می باشد. در نهایت این پژوهش با استفاده از روش فوق پارامترهای مختلف سرعت، جرم وزنه و مقاومت فشاری بتن بر روی روسازی بتنی می پردازد که با توجه به نتایج مشاهده شد افزایش سرعت وزنه از ۴ به ۶ متر بر ثانیه باعث افزایش جابه جایی قائم روسازی در نقطه P2.P1 به ترتیب به میزان ۱۰۸، ۱۱۳ درصد و افزایش مقاومت بتن تا محدوده مشخصی در کاهش جابه جایی موثر نبوده و از محدوده ۵۴ به ۹۰ مگاپاسکال باعث کاهش جابه جایی قائم در نقطه P2.P1 به میزان ۶۰ و ۳۱ درصد و همچنین افزایش جرم وزنه از ۸۰۰ به ۱۴۰۰ کیلوگرم موجب افزایش انحراف قائم در نقطه P2.P1 به میزان ۳۸ و ۴۳ درصد می گردد. در نهایت پارامتر افزایش سرعت وزنه (سرعت فرود) نسبت به سایر پارامترها موجب تسریع در تخریب روسازی باند فرودگاه می گردد.

واژه های کلیدی: ایزوژنومتریک، باند فرودگاه، روسازی، ضربه

#### ۱- مقدمه

مواد خردشده، باد و طوفان، برخورد های تصادفی شامل وسایل نقلیه، هواپیماها، قطارها، وزنه ها و اشیای سقوط کننده، موشک و بمبها و ....، نمونه های بارگذاری غیرعادی می باشند که دامنه تغییرات گسترده ای دارند. بارهای ضربه ای در بسیاری از موارد

آنالیز و طراحی سازه ها در برابر بارگذاری غیرعادی مانند بارهای ناشی از ضربات و انفجارها، به خصوص در مورد سازه های خاص و ویژه از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. شرایط بارگذاری از جمله زلزله، انفجار و اثرات ناشی از پرتاب

و شفافبخش (۱۳۹۴). فخری و همکاران طی پژوهشی تحت عنوان ارزیابی عملکرد و مدل سازی سه بعدی روسازی های بتنی بلوکی فرودگاهی تحت بار قائم به بررسی راه کاری برای شبیه سازی نیروی وارده از سوی چرخ هواپیما با آزمایش بارگذاری صفحه و تخمین پارامتر مدول یانگ رویه بلوکی بعنوان یک سیستم مجزا در فرایند تحلیل اجزای محدود، با ساخت یک مدل نرم افزاری سه بعدی و ساخت نمونه کاملی از آن به مساحت ۴ متر مربع اقدام نمودند (فخری و همکاران ۱۴۰۱).

صدراپی و همکاران طی تحقیقاتی اثرات نوع میلگرد فولادی و GFRP، مقدار و آرایش آرماتورها، مقاومت بتن، ضخامت دال ها و میزان پیش تنیدگی دال ها بر روی عملکرد دینامیکی (بار ضربه) ۲۰ دال بتنی با استفاده از تست های آزمایشگاهی و روش های عددی بررسی نمودند. طی تحقیق صورت گرفته مودهای شکست و خرابی، گسترش ترک، پاسخ های جابه جایی-زمان، کرنش-زمان) کرنش آرماتورها بین نمونه های تست شده مقایسه گردید. علاوه بر تست های آزمایشگاهی، شبیه سازی نمونه ها و آنالیز اجزای محدود با استفاده از نرم افزار ال اس داینای LS-DYNA انجام شده است (صدراپی ۲۰۱۸). آزرول مطلب طی بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی با استفاده از نرم افزار LS-DYNA به منظور تعیین رفتار ضربه ای دال های تقویت شده توسط ورقه های اف آر پی انجام داده است. جهت تست های آزمایشگاهی چهار نمونه دال دو طرفه با ابعاد ۶۰×۶۰×۶۰ میلی متر با آرماتورگذاری با قطر ۵ میلی متر و فواصل ۲۵۰ میلی متر در وجه کششی دال با پوشش ۲۰ میلی متر ساخته شده بود.

نمونه های ساخته شده در چهار دسته ی بدون تقویت، تقویت شده با دو لایه اف آر پی، تقویت شده با لایه های اف آر پی که در آن ورقه های اف آر پی در گوشه های دال توسط پیچ مهار شده اند و تقویت شده با لایه اف آر پی که در آن ورقه ها علاوه بر گوشه های دال در نقاط میانی هم توسط پیچ مهار شده اند تقسیم بندی گردیده بود. مقاومت فشاری بتن دال ها ۴۰ مگاپاسکال، مقاومت کششی آرماتورهای استفاده شده ۵۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی ورقه های کربنی که در هر دو وجه دال استفاده شده است، ۳۵۰۰ مگاپاسکال بوده است. پس از ساخت و عمل آوری نمونه ها، تست ضربه به کمک رها سازی وزنه ی ۹۷ کیلوگرمی بر روی آنها گرفته و نتایج توسط دوربین با سرعت ۱۰۰۰ فریم در ثانیه ثبت گردیده است. تعداد تکرارهای

بر روی دال های بتنی وارد می شود که نمونه دال های بتنی تحت ضربه شامل عرشه سکوها و اسکله ها ناشی از سقوط اجسام بر روی آنها، روسازی باند فرودگاه هنگام نشستن هواپیما و ... می باشد. یک سازه قرار گرفته در برابر بارگذاری ضربه ای ممکن است به صورت کلی یا موضعی و یا هر دو صورت تغییر شکل دهد. به عنوان مثال، پاسخ موضعی یک سازه بتنی به شکل، تعدادی از مکانیزم های شکست مانند (خردشدگی و پرتاب شدن مواد خرد شده و تشکیل ترک های مخروطی شکل) نمایان می گردد. پاسخ کلی معمولاً با شکست خمشی همراه است. رویکردهایی برای بررسی پاسخ یک عضو در معرض بار ضربه ای وجود دارد که عبارت است از تست های آزمایشگاهی که عمدتاً منجر به شکل گیری فرمول های تجربی می شوند؛ رویکردهای تحلیلی با استفاده از سیستم ها و یا ارتعاشات جرم فنر و روش های عددی - مانند روش المان محدود و ایزوژئومتریکی می باشد.

## ۲- پیشینه تحقیق

فتحی و همکاران طی تحقیقی عملکرد بتن انعطافی روسازی در مقابل ضربه را بررسی نمودند محققین با استفاده از خرده لاستیک و پودر لاستیک با درصدهای وزنی متفاوت ۵، ۱۰، ۱۵ درصد وزنی در روسازی بتنی تحت بار ضربه با وزنه گوی ۴،۷۵ کیلوگرم و ابعاد دال بتنی ۵۰×۱۰×۱۰ سانتی متر با استاندارد ACI544 قرار داده و با توجه به تعداد ضربات شکست اولیه و نهایی مقدار نهایی انرژی شکست را مورد ارزیابی قرار داده است (فتحی و محمدی ۱۳۹۵). کاشی و همکاران طی پژوهشی تحت عنوان تحلیل سه بعدی اجزا محدود روسازی انعطاف پذیر باند پرواز فرودگاه تحت بارگذاری هواپیماها با آرایش چرخ های متفاوت انجام دادند که در آن با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس تحلیل دینامیکی بر روی روسازی انعطاف پذیر باند پرواز انجام و نتیجتاً بر روی تنش ها و تغییر شکل های روسازی در هنگام حرکت هواپیما با سرعت های متفاوت بررسی صورت پذیرفته و نقاط بحرانی در طول، عرض و عمق روسازی باند پرواز و بحرانی ترین سرعت هواپیما به لحاظ آسیب های وارده بر روی روسازی بدست آمده و در بخش نهایی اثر سرعت و زاویه فرود هواپیما بر روی باند پرواز و میزان تغییر شکل باند تحت بار ناشی از فرود هواپیما تعیین شده است (احسان کاشی

همکاران نسبت به مطالعه عملکرد باند بتنی تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن محافظ روسازی تحت بارگذاری ضربه ای هواپیما اقدام نموده و در آن دو نمونه مختلف روسازی باند بتنی به ابعاد هر دو نمونه  $49 \times 49 \times 30$  سانتی متر ساختند و توسط دستگاه وزن افتان نسبت به تست ضربه اقدام گردید شده است. ارتفاع جرم در حال سقوط  $550$  میلی متر،  $650$  میلی متر و  $750$  میلی متر و سرعت ضربه  $3,28$  متر بر ثانیه،  $3,57$  متر بر ثانیه و  $3,84$  متر بر ثانیه انتخاب شده بود. عملکرد بتن و الیاف تقویت شده نمونه های روسازی باند بتنی توسط اندازه گیری انحراف، کرنش عرضی و رکوردهای حالت شکست توسط دوربین سرعت بالا اندازه گیری گردید (سایما ۲۰۲۰). جین وو و همکاران نسبت بررسی پاسخ دینامیکی بتن مسلح بازیافتی روسازی تحت بارگذاری ضربه ای اقدام نمودند و در آن به بررسی پویایی و مکانیسم های شکست روسازی های بتنی سنگدانه های بازیافتی تقویت شده تحت بارگذاری ضربه ای پرداختند (جین وو ۲۰۲۲).

رهاسازی وزنه و اعمال نیروی ضربه تا ایجاد کامل سوراخ در دال های آزمایش شده در نظر گرفته شده بود (مطلب ۲۰۱۱). مدرس طی تحقیقاتی، نسبت به بررسی اثر بارگذاری ضربه هواپیما در طول زمان فرود بر پارامترهای انتشار ترک را بررسی نمود. مشخصات هواپیما بوئینگ ۷۷۷-۳۰۰ در نظر گرفته شد به منظور شبیه سازی شرایط بارگذاری و ویژگی های لایه های غیرخطی، دو کد توسط سابروتین نرم افزار ABAQUS پیاده سازی شدند و اثر سرعت عمودی هواپیما، ضریب اصطکاک روسازی، موقعیت ترک، عمق ترک و مدول الاستیک آسفالت مورد بررسی قرار گرفت. سرعت عمودی هواپیما و مدول الاستیک آسفالت به عنوان مهمترین پارامترها شناخته شدند. افزایش این پارامترها باعث افزایش قابل توجه عوامل شدت تنش و کاهش عمر خستگی شد (مدرس ۲۰۱۶). حیدر عباس و همکاران طی مطالعه پارامتریک فرورفتگی لایه های روسازی باند بتنی تحت بار ضربه ای را بررسی و نسبت به توسعه یک مدل FE برای شبیه سازی HPC (بتن با مقاومت بالا) تحت ضربه بار ارائه شده است، به دنبال اعتبار FE مدل با استفاده از داده های ادبیات Wu (۲۰۱۸ و ۲۰۱۲) که رویکرد تجربی روی روسازی بتنی معمولی دارد استفاده شد (حیدر عباس، ۲۰۲۲). سایما و



شکل ۱. خرابی باند فرودگاه ناشی از ضربه فرود (عکس از پاسکواله دیفولکو، دپارتمان هوانوردی پنسیلوانیا)

### ۳- روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی [2018] Wu و همچنین سایما و همکاران در سال (۲۰۲۰) و حیدر عباس در سال (۲۰۲۲) که نسبت به انجام تحقیق عددی به روش اجزا محدود بر روی مطالعه مذکور می باشد نسبت به توسعه روش عددی ایزو ژئومتری با استفاده از ادبیات های تحقیق فوق اقدام می گردد و نهایتاً نسبت به بررسی پاسخ روسازی بتنی فرودگاه پرداخته و نتیجه گیری خواهد شد.

### ۳-۱- روش تحلیل عددی ایزوژئومتریک

#### ۳-۱-۱- بی- اسپلین و نریز

در این بخش به طور خلاصه و در حد نیاز، به معرفی منحنی ها و سطوح بی- اسپلین و نریز پرداخته می شود. برای آشنایی بیشتر، مراجعه به مراجع (هیوز ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، پیگل ۱۹۹۷). پیشنهاد می شود. نریزها از بی- اسپلین ها ساخته می شوند. بی- اسپلین ها در یک فضای پارامتری (ناحیه) تعریف می شوند. نواحی مذکور دامنه مدلسازی شده را

هستند، که روی بردار گره‌ای نامتناوبی بصورت رابطه (۲) با فرض  $a = 0$  و  $b = 1$  تعریف می‌شوند.

اگر  $p$  درجه توابع پایه،  $n+1$  تعداد نقاط کنترلی و  $m+1$  تعداد گره‌ها باشند، آنگاه می‌توان رابطه  $m = n + p + 1$  را برای آنها نوشت. به طرز مشابهی سطوح بی-اسپلین بصورت زیر تعریف می‌شود (هیوز ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، پیگل ۱۹۹۷):

$$S(\xi, \eta) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(\xi) N_{j,q}(\eta) P_{i,j} \quad (5)$$

$$\Xi = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, \xi_{p+1}, \dots, \xi_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\}; \quad (6)$$

$$H = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, \eta_{q+1}, \dots, \eta_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\}$$

که در آن:

بطوری که تعداد نقاط کنترلی در جهت  $x$  برابر  $n+1$  و در جهت  $y$  برابر  $m+1$  است و بردار گره‌ای  $\Xi$  دارای  $r+1$  گره و  $\mathcal{H}$  دارای  $s+1$  گره می‌باشد. یک منحنی نربز از درجه  $p$  بصورت زیر تعریف می‌شود (هیوز ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، پیگل ۱۹۹۷):

$$C(\xi) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(\xi) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(\xi) w_i} \quad a \leq \xi \leq b \quad (7)$$

که در آن  $\{P_i\}$  نقاط کنترلی،  $\{w_i\}$  وزن‌ها و  $\{N_{i,p}(\xi)\}$  توابع پایه‌ای بی-اسپلین از درجه  $p$  هستند، که بر روی بردار گره‌ای بصورت رابطه (۲) تعریف شده‌اند و در نهایت، یک سطح نربز که در جهت  $\xi$  از درجه  $p$ ، و در جهت  $\eta$  از درجه  $q$  باشد، بصورت زیر تعریف می‌شود (هیوز ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، پیگل ۱۹۹۷).

$$S(\xi, \eta) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(\xi) N_{j,q}(\eta) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(\xi) N_{j,q}(\eta) w_{i,j}} \quad 0 \leq \xi, \eta \leq 1 \quad (8)$$

به چندین زیر دامنه تقسیم می‌کنند. یک بردار گره‌ی در فضای پارامتری یک بعدی از یک سری مختصات به صورت زیر تشکیل می‌شود (هیوز ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، پیگل ۱۹۹۷).

$$\Xi = \{ \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1} \}, \xi_{i+1} \geq \xi_i \quad i = 1, 2, \dots, n + p + 1 \quad (1)$$

که در آن  $\xi_i$  آمین گره،  $p$  مرتبه چند جمله‌ای و  $n$  تعداد توابع شکل تشکیل دهنده بی-اسپلین به شمار می‌رود. انواع مختلفی از بردارهای گره‌ای وجود دارد ولی در این بحث فقط از نوع خاصی از بردارهای گره‌ای بنام بردارهای گره‌ای نامتناوب (یا باز) استفاده می‌کنیم. این نوع بردارها به فرم زیر نشان داده می‌شوند.

$$\Xi = \left\{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, \xi_{p+1}, \dots, \xi_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \right\} \quad (2)$$

در این صورت آمین تابع پایه‌ای بی-اسپلین از درجه  $p$  (مرتبه  $p+1$ ) که با  $N_{i,p}(\xi)$  نشان داده می‌شود بصورت زیر تعریف می‌شود (هیوز ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، پیگل ۱۹۹۷):

$$N_{i,0}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{if } \xi_i \leq \xi < \xi_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

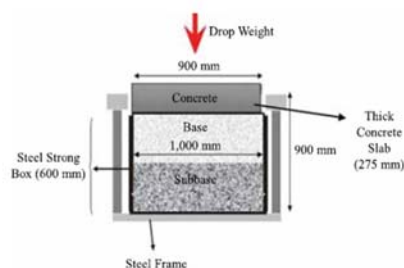
$$N_{i,p}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+1} - \xi_i} N_{i,p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\xi)$$

با استفاده از تعاریف بالا، منحنی بی-اسپلین از درجه  $p$  بصورت زیر تعریف می‌شود (هیوز ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، پیگل ۱۹۹۷).

$$C(\xi) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(\xi) P_i \quad a \leq \xi \leq b \quad (4)$$

$C(\xi)$  یک منحنی چند جمله‌ای قطعه‌ای است که در آن  $\{P_i\}$  نقاط کنترلی و  $\{N_{i,p}(\xi)\}$  توابع پایه‌ای بی-اسپلین

زیر بستر ۱ متر × ۱ متر است (شکل ۳). جرم قطره‌ای نیمکره‌ای برای اعمال بار ضربه در نقطه میانی سطح بالایی استفاده می‌شود. قطر جرم نیمکره ۱۰۰ میلی متر و طول جرم قطره ۱،۲۹۲ متر است. سرعت ضربه اعمال شده توسط جرم متفاوت و ۵،۱۳۳، ۴ و ۶ متر بر ثانیه است. خواص مواد مورد استفاده در تحلیل مدل در جداول (۱ الی ۳) آورده شده است.



شکل ۳. مدل آزمایشگاهی و عددی (wu2018, Hayder, 2022)



شکل ۴. مدل آزمایشگاهی (وزنه ضربه زنده) (wu2018)

#### ۴-۱- مشخصات مصالح مصرفی در نرم افزار و آزمایشگاه

##### بتن

با توجه به نوع روسازی صلب انتخاب شده خصوصیت مصالح انتخابی به شرح جدول (۱) می‌باشد برای مدل سازی در نرم افزار LS-dyna v13 از مدل ماده جانسون هولمکوئیست انتخاب می‌گردد.

جدول ۱. مشخصات بتن

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	۳۳
نسبت پواسون	۰/۲
چگالی (گیلوگرم بر مترمکعب)	۲۴۰۰
مقاومت فشاری بتن (مگا پاسکال)	۵۴
مقاومت کششی بتن (مگا پاسکال)	۲/۷

در عبارت فوق  $\{P_{i,j}\}$  شبکه نقاط کنترلی می باشد که در دو جهت تعریف شده است؛ همچنین  $\{w_{i,j}\}$  وزن‌ها و  $\{N_{i,p}(\xi)\}$  و  $\{N_{j,q}(\eta)\}$  توابع پایه‌ای بی-اسپلاین هستند که بر روی بردارهای گره‌ای تعریف شده‌اند. اگر توابع پایه‌ای نسبی قطعه‌ای را بصورت زیر تعریف کنیم.

$$R_{ij}(\xi, \eta) = \frac{N_{i,p}(\xi)N_{j,q}(\eta)w_{ij}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(\xi)N_{l,q}(\eta)w_{k,l}} \quad (9)$$

خواهیم داشت.

$$S(\xi, \eta) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{ij}(\xi, \eta)P_{ij} \quad (10)$$

در شکل ۲ شبکه نقاط کنترلی و سطح نریز بدست آمده از آن با توابع پایه درجه دو مشاهده می‌شود.



شکل ۲. شبکه نقاط کنترلی و سطح نریز مربوط به آن

#### ۴- مدل سازی

این تحقیق با استفاده از نرم افزار LS-DYNA v13 که قابلیت تولید بی اسپلاین و نریزها و تحلیل ایزوژئومتریکی را خواهد داشت انجام خواهد شد و با توجه به وجود نتایج آزمایشگاهی Wu(2018) و تحلیل المان محدود نتایج خروجی روش ایزوژئومتریکی اعتبار سنجی خواهد شد. در این مدل از دال بتنی به ضخامت ۲۷۵ میلی متر که بر روی بستر با ضخامت ۶۰۰ میلی متر و از ماسه تشکیل شده است استفاده می‌گردد. ابعاد نمونه بتنی ۹۰۰ میلی متر × ۹۰۰ میلی متر و ابعاد

#### ۲-۴- اساس و زیر اساس

در این تحقیق لایه اساس از شن و ماسه تقویت تقویت شده و لایه زیر اساس شن و ماسه بدون تقویت ژئوسل می باشد. پارامترهای الاستیک و پلاستیک با توجه به ادبیات تحقیق می شوند.

جدول ۲. مشخصات اساس و زیراساس

پارامتر	شن و ماسه تقویت شده (اساس)	شن و ماسه بدون تقویت (زیراساس)
مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	۱۰۳/۵	۴۰
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۶۰۰	۱۶۰۰
زاویه اصطکاک	۴۰	۴۰
چسبندگی (C)	۸۹	۱۳/۸

#### ۳-۴- وزنه برخوردی

خواص مکانیکی ضربه گیر همانطور که در (wu(2018) ارائه شده است استفاده می شود. مشخصات جزئیات ضربه گیر

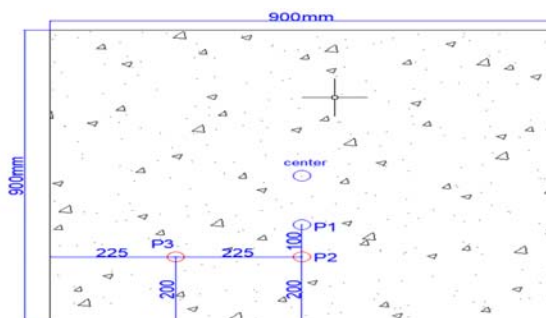
جدول ۳. مشخصات وزنه برخوردی

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	۲۰۷
نسبت پواسون	۰/۳
جرم (کیلوگرم)	۱۱۸۱
مقاومت تسلیم فولاد(مگا پاسکال)	۵۰۰

#### اعتبار سنجی روش ایزوژئومتری با نتایج آزمایشگاهی و روش عددی اجزا محدود

بنابراین، حداکثر انحراف عمودی در این سه نقطه برای اعتبار سنجی استفاده شد. شایان ذکر است در روش اجزا محدود مش بندی به فاصله ۵ میلی متر بوده در حالیکه در روش ایزوژئومتری فاصله نقاط کنترلی ۶ میلی متر انتخاب گردیده است.

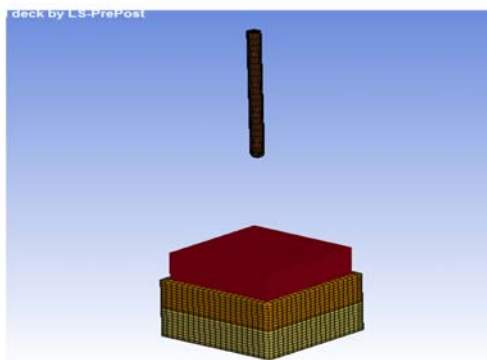
نتایج شبیه سازی ضربه به دست آمده از مدل های اجزا محدود و آزمایش های ضربه ای که بر روی روسازی باند بتنی توسط وو ۲۰۱۸ انجام شده است با استفاده از روش عددی ایزوژئومتری بررسی و در نهایت نتایج مقایسه گردید. حداکثر انحراف عمودی در سه نقطه خاص در سطح بالایی روسازی باند نشان داده شده در شکل ۵ تعیین شد.



شکل ۵. انتخاب موقعیت اندازه گیری جابه جایی (wu, ۲۰۱۸)



ب

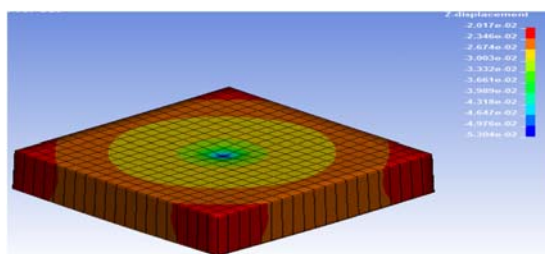


الف

شکل ۶. شکل الف مربوط به مدل آزمایشگاهی (WII) و شکل ب مدل سازی عددی به روش ایزوژئومتریک

جدول ۴. نتایج آزمایشگاهی و روش عددی ایزوژئومتریک و اجزا محدود

موقعیت	ماکزیمم جابه جایی قائم به روش ایزوژئومتریک (میلی متر)	ماکزیمم جابه جایی به روش اجزا محدود	ماکزیمم جابه جایی از طریق آزمایش نمونه در آزمایشگاه	نسبت نتیجه		درصد خطا	درصد خطا
				روش عددی اجزا محدود به نتیجه آزمایشگاه	روش عددی ایزوژئومتریک به نتیجه آزمایشگاه		
P1	۲۷/۲	۲۶/۳۴	۲۶/۰۷	۱/۰۱	۱/۰۴	۱/۱	۴
P2	۲۷/۱۶	۲۴/۶	۲۷/۰۶	۰/۹۱	۱/۰۰۳	۹	۰/۳
P3	۲۶/۶۳	۲۵/۳۲	۲۷/۹۸	۰/۹	۰/۹۵	۱۰	۵



شکل ۷. مدل و نتیجه حاصل از تحلیل ایزوژئومتریک

محدود در جدول ۴ مقایسه گردیده که نتایج خوبی بین مدل‌های آزمایشگاهی، ایزوژئومتریک و اجزا محدود در محل نقاط مشخص P1، P2، P3 حاصل گردیده است. با توجه به نتایج حاصل از روش ایزوژئومتریک و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در نقاط مورد نظر مشخص گردید نتایج روش عددی ایزوژئومتریک با توجه به خطای بسیار اندک حاصل

یک الگوریتم تماس عمومی برای برهمکنش بین وزنه ضربه نیمکره‌ای و روسازی بتنی با پیوند دادن به یکدیگر برقرار گردیده و با توجه به تحلیل ایزوژئومتریک صورت گرفته بر روی نمونه حداکثر انحرافات رو به پایین در سه نقطه مشخص از روسازی باند تحت سرعت ۵,۱۳۳ متر بر ثانیه اندازه‌گیری و با روش آزمایشگاهی و روش حل عددی اجزا

### جابه‌جایی روسازی باندهای فرودگاه با سرعت

۵,۳۳ متر بر ثانیه

جدول ۶. جابه‌جایی با سرعت ۵,۳۳ متر بر ثانیه

سرعت جرم ضربه (متر بر ثانیه)	۵,۳۳
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی متر)	۵/۳
جابه‌جایی در P1 (سانتی متر)	۲/۹۱
جابه‌جایی در P2 (سانتی متر)	۲/۸۲

### جابه‌جایی روسازی باندهای فرودگاه

با سرعت ۶ متر بر ثانیه

جدول ۷. جابه‌جایی با سرعت ۶ متر بر ثانیه

سرعت جرم ضربه (متر بر ثانیه)	۶
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی متر)	۷/۲
جابه‌جایی در P1 (سانتی متر)	۴/۳۲
جابه‌جایی در P2 (سانتی متر)	۴/۱۶

### جدول ۸. حداکثر جابه‌جایی با سرعت‌های متفاوت (جمع بندی)

سرعت جرم ضربه (متر بر ثانیه)	۴	۵,۳۳	۶
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی متر)	۳/۶۴	۵/۳	۷/۲
جابه‌جایی در P1 (سانتی متر)	۲/۰۷	۲/۹۱	۴/۳۲
جابه‌جایی در P2 (سانتی متر)	۱/۹۵	۲/۸۲	۴/۱۶

(جدول) به واقعیت نزدیک بوده و لذا با توجه به خاصیت نقاط کترلی و نربزها که به سرعت در برابر بارهای انی واکنش نشان می‌دهند می‌توان نتیجه گرفت روش مذکور در برابر بارهای آنی مانند ضربه و انفجار دارای کارایی مناسبی می‌باشد. از این رو روش پیشنهادی حل مسائل ضربه به روش عددی ایزوژئومتریکی می‌باشد.

### تحلیل پارامترهای مختلف روسازی صلب به روش

#### ایزوژئومتریکی

در این قسمت به منظور ارزیابی اثرات پارامترهای مختلف بر پاسخ روسازی بتنی تحت بارگذاری ضربه‌ای صورت می‌گیرد از این رو درک اهمیت پارامترهای مختلف در تأثیرگذاری بر عمق نفوذ سطحی روسازی‌های بتنی و پارامترهای انتخاب شده شامل سرعت ضربه، جرم ضربه، مقاومت دال بتنی، مورد استفاده در بتن بررسی و نتایج بر اساس تحلیل ایزو ژئومتریکی استخراج و مقایسه می‌گردد.

#### سرعت

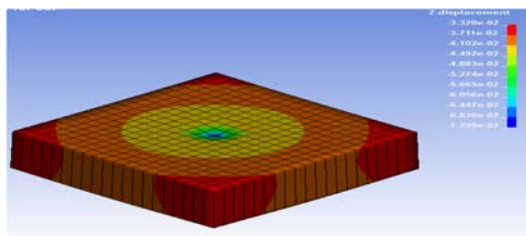
در این قسمت با توجه به تغییر سرعت جرم ضربه زننده نسبت به بررسی پاسخ جابه‌جایی در راستای قائم اقدام می‌گردد. سرعت‌های انتخابی ۴ متر بر ثانیه، ۶ متر بر ثانیه و ۵,۳۳ متر بر ثانیه بوده و جرم انتخابی وزنه رها شونده ۱۱۸۰ کیلوگرم و با مقاومت بتن ۵۴ مگا پاسکال می‌باشد.

### جابه‌جایی روسازی باندهای فرودگاه با سرعت ۴ متر

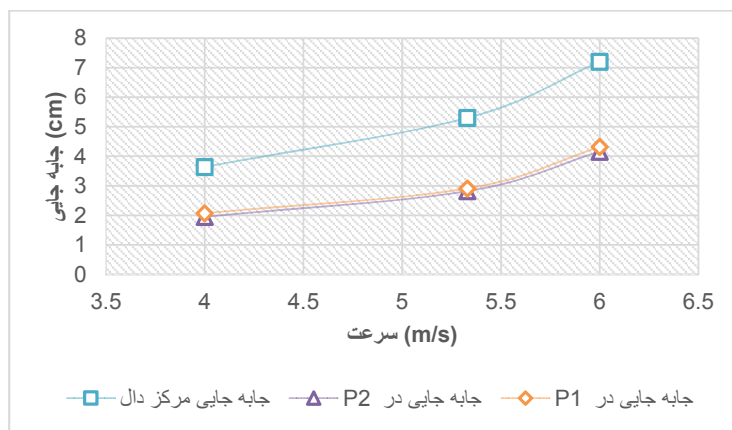
بر ثانیه

جدول ۵. جابه‌جایی با سرعت ۴ متر بر ثانیه

سرعت جرم ضربه (متر بر ثانیه)	۴
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی متر)	۳/۶۴
جابه‌جایی در P1 (سانتی متر)	۲/۰۷
جابه‌جایی در P2 (سانتی متر)	۱/۹۵



شکل ۸. مدل و نتیجه حاصل از تحلیل ایزوژنومتریک برای سرعت ۶ متر بر ثانیه



نمودار ۱. حداکثر جابه جایی موقعیت های مشخص با سرعت های متفاوت

#### جابه جایی روسازی باند فرودگاه با مقاومت ۳۰ مگا پاسکال

جدول ۹. جابه جایی با مقاومت ۳۰ مگا پاسکال

مقاومت بتن (مگا پاسکال)	۳۰
جابه جایی مرکز دال (سانتی متر)	۵/۶۳
جابه جایی در P1 (سانتی متر)	۲/۳۵
جابه جایی در P2 (سانتی متر)	۲/۲

#### جابه جایی روسازی باند فرودگاه با مقاومت ۴۰ مگا پاسکال

جدول ۱۰. جابه جایی باند فرودگاه با مقاومت ۴۰ مگا پاسکال

مقاومت بتن (مگا پاسکال)	۴۰
جابه جایی مرکز دال (سانتی متر)	۵/۴۱
جابه جایی در P1 (سانتی متر)	۲/۷۴
جابه جایی در P2 (سانتی متر)	۲/۵۶

با توجه به نمودار ۱ و جدول ۸ نتایج نشان می دهد با افزایش سرعت وزنه، جابه جایی روسازی بتنی بصورت غیر خطی افزایش یافته به نحوی که در صورت افزایش سرعت از ۴ متر بر ثانیه به ۵٫۳۳ متر بر ثانیه جابه جایی دال در نقطه p1 ۴۰ درصد و در نقطه p2 ۴۴ درصد افزایش و از سرعت ۵٫۳۳ به سرعت ۶ متر بر ثانیه در نقطه p1 ۴۸ درصد و در نقطه p2 ۴۷ درصد افزایش داشته است و جابه جایی مرکز دال با توجه به لحظه برخورد که منجر به شکستن و خرد شدگی آن قسمت از بتن می گردد نسبت به نقاط فوق بیشتر می باشد

#### تأثیر مقاومت بتن

در این قسمت با توجه به تغییر مقاومت بتن از ۴۰، ۴۰٫۳۰، ۵۴، ۹۰ مگا پاسکال و سرعت جرم ضربه زننده ۵٫۳۳ متر بر ثانیه جرم انتخابی وزنه رها شونده ۱۱۸۰ کیلوگرم نسبت به بررسی پاسخ جابه جایی در راستای قائم صورت می گیرد.

جابه‌جایی روسازی باند فرودگاه با مقاومت  
۹۰ مگا پاسکال

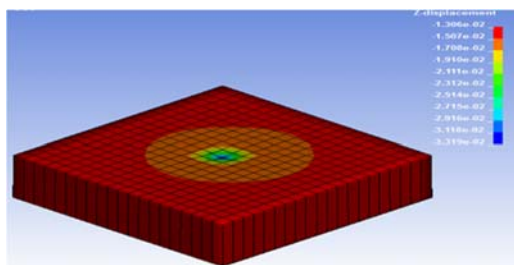
جدول ۱۲. جابه‌جایی با مقاومت ۹۰ مگا پاسکال

مقاومت بتن (مگا پاسکال)	۹۰
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی‌متر)	۳/۳۱
جابه‌جایی در P1 (سانتی‌متر)	۱/۵۸
جابه‌جایی در P2 (سانتی‌متر)	۲/۱۵

جابه‌جایی روسازی باند فرودگاه با مقاومت  
۵۴ مگا پاسکال

جدول ۱۱. جابه‌جایی با مقاومت ۵۴ مگا پاسکال

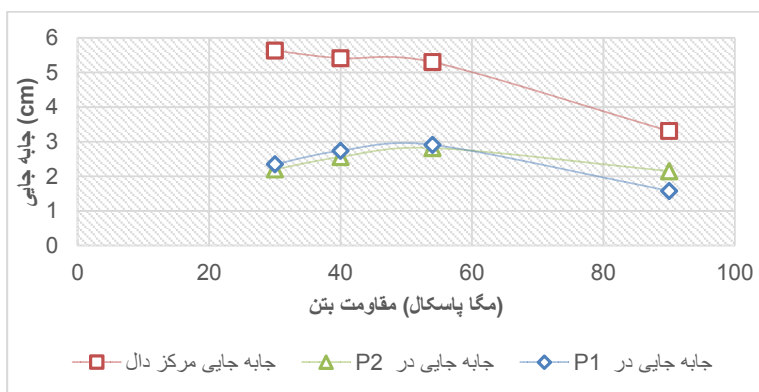
مقاومت بتن (مگا پاسکال)	۵۴
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی‌متر)	۵/۳
جابه‌جایی در P1 (سانتی‌متر)	۲/۹۱
جابه‌جایی در P2 (سانتی‌متر)	۲/۸۲



شکل ۹. مدل و نتیجه حاصل از تحلیل ایزوژئومتریک برای مقاومت ۹۰ مگا پاسکال

جدول ۱۳. جابه‌جایی حداکثر با مقاومت‌های مختلف (جمع بندی)

مقاومت بتن (مگا پاسکال)	۳۰	۴۰	۵۴	۹۰
جابه‌جایی مرکز دال	۵/۶۳	۵/۴۱	۵/۳	۳/۳۱
جابه‌جایی در P1	۲/۳۵	۲/۷۴	۲/۹۱	۱/۵۸
جابه‌جایی در P2	۲/۲	۲/۵۶	۲/۸۲	۲/۱۵



نمودار ۲. جابه‌جایی حداکثر موقعیت‌های مشخص با مقاومت‌های متفاوت

جابه‌جایی روسازی باند فرودگاه با جرم وزنه ضربه زنده

۱۱۸۰ کیلوگرم

جدول ۱۵. جابه‌جایی با جرم ۱۱۸۰ کیلوگرم

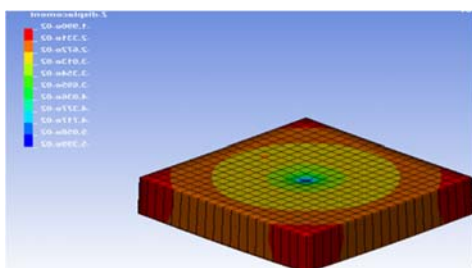
جرم (کیلوگرم)	۱۱۸۰
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی‌متر)	۵/۳
جابه‌جایی در P1 (سانتی‌متر)	۲/۹۱
جابه‌جایی در P2 (سانتی‌متر)	۲/۸۲

جابه‌جایی روسازی باند فرودگاه با جرم وزنه ضربه زنده

۱۴۰۰ کیلوگرم

جدول ۱۶. جابه‌جایی با جرم ۱۴۰۰ کیلوگرم

جرم (کیلوگرم)	۱۴۰۰
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی‌متر)	۵/۴
جابه‌جایی در P1 (سانتی‌متر)	۳/۰۴
جابه‌جایی در P2 (سانتی‌متر)	۲/۸۴



شکل ۱۰. مدل و نتیجه حاصل از تحلیل ایزوژنومتریک

جدول ۱۷. جابه‌جایی حداکثر با جرم متفاوت (جمع بندی)

جرم (کیلوگرم)	۸۰۰	۱۱۸۰	۱۴۰۰
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی‌متر)	۴/۵	۵/۳	۵/۴
جابه‌جایی در P1 (سانتی‌متر)	۲/۲	۲/۹۱	۳/۰۴
جابه‌جایی در P2 (سانتی‌متر)	۱/۹۸	۲/۸۲	۲/۸۴

با توجه به نمودار ۲ و جدول ۱۳ نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقاومت بتن تا محدوده مشخصی، جابه‌جایی روسازی بتنی بصورت غیرخطی افزایش یافته به نحوی که در صورت افزایش مقاومت از ۳۰ مگا پاسکال به ۴۰ مگا پاسکال جابه‌جایی دال در نقطه p1 ۱۶ درصد و در نقطه p2 نیز ۱۶ درصد افزایش و از ۴۰ مگا پاسکال به ۵۴ مگا پاسکال در نقطه p1 ۶ درصد و در نقطه p2 ۱۰ درصد افزایش داشته است و افزایش مقاومت از ۵۴ مگا پاسکال به ۹۰ مگا پاسکال جابه‌جایی دال در نقطه p1 ۴۵ درصد و در نقطه p2 نیز ۲۳ درصد کاهش و جابه‌جایی مرکز دال با توجه به لحظه برخورد که منجر به شکستن و خرد شدگی آن قسمت از بتن می‌گردد نسبت به نقاط فوق شاهد کاهش بیشتری می‌باشد.

تأثیر جرم وزنه ضربه برخورد

در این قسمت جرم وزنه ضربه زنده ۸۰۰ کیلوگرم، ۱۱۸۰ کیلوگرم و ۱۴۰۰ کیلوگرم برای روسازی بتنی با سرعت ضربه ثابت ۵,۱۳۳ متر بر ثانیه و مقاومت بتن ۵۴ مگا پاسکال انتخاب شده است و در نهایت نسبت به بررسی پاسخ حداکثر جابه‌جایی در راستای قائم در مرکز دال و موقعیت‌های p1، p2 بررسی می‌گردد.

جابه‌جایی روسازی باند فرودگاه با جرم وزنه ضربه زنده

۸۰۰ کیلوگرم

جدول ۱۴. جابه‌جایی با جرم ۸۰۰ کیلوگرم

جرم (کیلوگرم)	۸۰۰
جابه‌جایی مرکز دال (سانتی‌متر)	۴/۵
جابه‌جایی در P1 (سانتی‌متر)	۲/۲
جابه‌جایی در P2 (سانتی‌متر)	۱/۹۸



نمودار ۳. جابه‌جایی حداکثر موقعیت‌های مشخص با جرم‌های متفاوت

بر ثانیه موجب رشد چشمگیر جابه‌جایی قائم در نقاط P1 و P2 به ترتیب به میزان ۱۰۸ و ۱۱۳ درصد شده است. این موضوع بیانگر نقش مؤثر سرعت ضربه واردشده توسط چرخ هواپیما بر عملکرد سازه‌ای روسازی بتنی فرودگاه است.

#### تأثیر مقاومت فشاری بتن بر پاسخ روسازی

افزایش مقاومت فشاری بتن تا سطحی مشخص تأثیر قابل توجهی در کاهش جابه‌جایی قائم ندارد. با این حال، عبور از آستانه مقاومت مشخص (از ۵۴ مگاپاسکال به ۹۰ مگاپاسکال)، موجب کاهش محسوس جابه‌جایی قائم در نقاط P1 و P2 به میزان ۶۰٪ و ۳۱٪ شده است. این امر نشان‌دهنده آن است که بهبود خواص مکانیکی بتن می‌تواند پس از رسیدن به مقاومتی معین، تأثیر معناداری بر عملکرد سازه‌ای روسازی داشته باشد.

#### تأثیر جرم وزنه ضربه‌زننده بر جابه‌جایی قائم

بررسی اثر جرم وزنه ضربه‌زننده نشان داد که افزایش جرم در بازه ۸۰۰ تا ۱۱۸۰ کیلوگرم موجب افزایش جابه‌جایی قائم می‌گردد، در حالی که فراتر از این بازه (تا ۱۴۰۰ کیلوگرم) تأثیر چندانی ندارد. به‌طور خاص، افزایش جرم از ۸۰۰ به ۱۴۰۰ کیلوگرم منجر به افزایش جابه‌جایی قائم در نقاط P1 و P2 به میزان ۳۸٪ و ۴۳٪ شده است.

#### جمع‌بندی تأثیر پارامترهای دینامیکی

در مجموع، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که سرعت وزنه ضربه‌زننده نقش مؤثرتری در افزایش جابه‌جایی قائم روسازی

با توجه به نمودار ۳ و جدول ۱۳ نتایج نشان می‌دهد با افزایش جرم وزنه، جابه‌جایی روسازی بتنی بصورت غیرخطی افزایش یافته و با توجه به نتایج و نمودار (۳) در محدوده مشخصی با افزایش جابه‌جایی روسازی همراه خواهد بود و از یک محدوده مشخص جابه‌جایی در جابه‌جایی تأثیر چشمگیری نداشته است. لذا، در صورت افزایش جرم از ۸۰۰ کیلوگرم به ۱۱۸۰ کیلوگرم جابه‌جایی دال در نقطه p1 ۳۲ درصد و در نقطه p2 نیز ۴۲ درصد افزایش و از جرم ۱۱۸۰ کیلوگرم به ۱۴۰۰ کیلوگرم جابه‌جایی دال در نقطه p1 ۴٫۵ درصد و در نقطه p2 نیز یک درصد افزایش می‌یابد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

مدل تحلیلی با استفاده از نرم افزار Ls-dyna ایجاد و با استفاده از بی‌اسپیلاین و نربرها به روش تحلیل عددی ایزوژئومتریک بررسی گردید و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد که نهایتاً منجر به تایید روش تحلیلی گردید. پس از اعتبارسنجی، مطالعات برای ارزیابی یک سری از پارامترهای مؤثر بر نفوذ سطح روسازی بتنی تحت بار ضربه انجام شد. این پارامترها شامل جرم وزنه ضربه‌زننده، سرعت ضربه‌زننده و مقاومت فشاری در روسازی باند می‌باشد. بر اساس تجزیه و تحلیل، نتایج ذیل حاصل گردید.

#### تأثیر سرعت وزنه ضربه‌زننده بر جابه‌جایی قائم روسازی

نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت وزنه ضربه‌زننده، میزان جابه‌جایی قائم سطح روسازی نیز افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، افزایش سرعت از ۴ به ۶ متر

نقاط کنترلی، این روش قابلیت بالایی در مدل‌سازی دقیق و تحلیل پاسخ‌های لحظه‌ای سیستم‌های سازه‌ای دارد. یافته‌های این پژوهش نیز تأییدکننده کارایی و دقت بالای این روش در تحلیل رفتار دینامیکی روسازی بتنی می‌باشد.

ایفا می‌کند، در حالی که اثر جرم وزنه، در مقایسه با سرعت، کمتر و محدودتر ارزیابی می‌گردد.

## برتری روش ایزوژئومتری در تحلیل پاسخ دینامیکی روسازی

با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد روش ایزوژئومتری نظیر استفاده از پایه‌های B-Spline و NURBS و بهره‌گیری از

## ۶- مراجع

-فخری و طاهری (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد و مدل‌سازی سه بعدی روسازی‌های بتنی بلوکی فرودگاهی، مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۸، ۳۲، ۱۱۵-۹۹.

-صدرایی و همکاران، (۲۰۱۸). بررسی عملکرد دینامیکی دالهای بتنی مسلح شده با میلگرد اف آر پی و دال‌های پیش تنیده در برابر ضربه. رساله دکتری دانشگاه شریف.

-سلطانی و همکاران، (۱۴۰۱). عملکرد دالهای بتنی مسلح تقویت شده با الیاف فولادی و ورق‌های FRP، در برابر بارگذاری دینامیکی ناشی از ضربه، رساله دکتری دانشگاه شریف.

-G.T. Houlsby, (1991). How the Dilatancy of Soils Affects their Behavior, *Tenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Florence, Italy. (37)

-H. Kim, and W.G. Buttler, (2009). Finite Element Cohesive Fracture Modelling of Airport Pavements at Low Temperatures, *Journal of Cold Regions Science and Technology*, 57, Elsevier Science Limited. 123-131.

-Hayder Abbas Ashour AlAraza, Kharun Mahmud (2022). A parametric study of concrete runway pavement layers depression under impact load. *Monthly Journal on Construction and Architecture*, C. 1206-1217.

-Hughes, T.J.R.; Reali, A.; Sangalli, G. (2010). Efficient quadrature for NURBS-based isogeometric analysis. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 199 (5-8), 301-313.

-Hummeltenberg, A., Beckmann, B., Weber, T., and Curbach, M., (2011). Investigation of Concrete Slabs under Impact Load. *Applied Mechanics and Materials*, 82, 398-403.

-محمدی، یعقوب و فتحی جلفا، ایرج (۱۳۹۵). بررسی عملکرد بتن انعطافی روسازی باند فرودگاه حاوی پودر لاستیک و خرده لاستیک در مقابل ضربه، اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی.

-احسان کاشی و همکاران (۱۳۹۴). تحلیل سه بعدی اجزاء محدود روسازی انعطاف‌پذیر باند پرواز فرودگاه تحت بارگذاری هواپیماها با آرایش چرخ‌های مختلف، رساله دکتری دانشگاه سمنان.

-A. Moropoulou, N.P. Avdelidis, M. Kouri, and K. Kakaras, (2001). An Application of Thermography for Detection of Delamination in Airport Pavements, *Journal of NDT and E International*, 34, Elsevier Science Limited. 329-335,

-Amir modares and Hamed shabani (2015). Investigating the effect of aircraft impact loading on the longitudinal top-down crack propagation parameters in asphalt runway pavement using fracture mechanics. *Engineering Fracture Mechanics*.

-Chen, Y. and May, I.M. (2009). Reinforced Concrete Members under Drop Weight Impact. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 162, 45-56.

-D. Rufino and J. Roesler, (2006). Effect of Slab-Base Interaction on Measured Concrete Pavement Responses, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 132, 425-435.

- Kennedy, R.P. (1976). A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects. *Nuclear Engineering and Design*, 37, 183-203.
- Kishi, N., Kurihashi, Y., GhadimiKhasraghy, S., and Mikami, H. (2011). Numerical Simulation of Impact Response Behavior of Rectangular Reinforced Concrete Slabs under Falling-weight Impact loading. *Applied Mechanics and Materials*, 82, 266-271.
- Kumar, V, Iqbal, M.A, Mittal, A.K. (2018). Study of induced prestress on deformation and energy absorption characteristics of concrete slabs under drop impact loading. *Constr. Build. Mater.* 188, 656-675
- Kurihashi, Y., Taguchi, F., Kishi, N., and Mikami, H. (2006). Experimental Study on Static and Dynamic Response of PVA Short-fiber Mixed R.C. Slab. *fib Proceeding of the 2nd International Congress*, ID 13-20, Naples, Italy, June 5-8, 1-10.
- M. Bounsanti, and G. Leonardi (2011). A Finite Element Model to Evaluate Airport Flexible Pavements Response under Impact, *Journal of Applied Mechanics and Materials*, 138, 257-262.
- M. Kim, and E. Tutumluer, (2008). Multiple Wheel Load Interaction in Flexible Pavements, *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2068, 9-60.
- M.R. Taheri, M.M Zaman, and A. Alvappillai, (1990). Dynamic Response of Concrete Pavement to Moving Aircrafts, *Journal of Applied Math Modelling*, 14, 562-575.
- Mutalib, A.A. (2011). Experimental and Numerical Studies of FRP Strengthened RC Slabs under Impact Loads. *International Journal of Impact Engineering*, 100(3), 256- 263.
- Othman, H., Marzouk, H. (2016). An experimental investigation on the effect of steel reinforcement on impact response of reinforced concrete plates. *Int. J. Impact Eng.* 88, 12-21.
- I. Mijangos, and K.U. Kelly, (2009). Drucker-Prager Finite Element Constitutive Model of Microindentation in Polycrystalline Alumina, *Proc. of the SEM Annual Conference*, June 1-4, Albuquerque New Mexico, USA, (36).
- I. L. Al-Qadi, S. Portas, M. Coni, and S. Lahouar, (2010). Runway Instrumentation and Response Measurements, *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2153, 162-169.
- Iqbal, M.A., Kumar V., Mittal, A.K. (2018). Experimental investigation of prestressed and reinforced concrete plates under falling weight impactor. *Thin-Walled Struct.* 126, 106-116.
- J. Ozbolt, A. Sharma, B. Irhan, and E. Sola, (2014). Tensile Behaviour of Concrete under High Loading Rates, *International Journal of Impact Engineering*, 69, Elsevier Science Limited. 55-68.
- Jifeng Yuan, Jin Wu, Tian Su and Dadi Lin (2022). Dynamic Response of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Pavement under Impact Loading. *Sci. 12*, 8804.
- K. Gopalakrishnan and M.R. Thompson, (2007). Behaviour of Airfield Pavement Subgrades Under Blast Load Test. Proceedings of the institution of Civil Engineers, *Transport 160, TR2*, 79-87.
- K. Hoegh, L. Khazanovich, K. Maser, and N. Tran, (2012). Evaluation of Ultrasonic Technique for Detecting Delamination in Asphalt Pavements, *Journal of the Transportation Research Board*, 2316, 105-110.
- K. Su, Y. Hachiya, and R. Maekawa, (2009). Study on Recycled Asphalt Concrete for Use in Surface Course in Airport Pavement, *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier Science Limited. 54, 37-44,
- K.R. Maser, and I. Sande, (1996). Condition Assessment of Transportation Infrastructure Using Ground-Penetrating Radar, *Journal of Infrastructure Systems*, 2(2), 94-101.

- V. Khanna, M.A. Mooney, and G.A. Miller, (2012). Impulse Response Dynamic Stiffness Decay in Aging General Aviation Airfield Pavements, *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2153, 162-169.
- W. Jun, (2012). Development of Advanced Pavement Materials System for Blast Load, Thesis of Doctor of Philosophy, *National University of Singapore*.
- X. Yan, X. Weng, and Y. Kou, (2014). Influence of Fiber Grid on Interlayer Bond Property of Airport Double-Layer Pavement, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(1), 101-111.
- Y. Fujita, and R. Ishimaru, (1998). Study on Internal Friction Angle and Tensile Strength of Plain Concrete, *Proc. on Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Germany, 325-334.
- Piegl, L.; Tiller, W. (1997). *The NURBS Book*. 2nd ed., Springer-Verlag, New York
- Rogers D.F., (2001). *An Introduction to NURBS*, *Morgan Kaufmann Publishers*.
- S. Kuo, H.S. Mahgoub, R.D. (1896). Holliday, Pavement Responses Due to Hard Landing of Heavy Aircraft, *Journal of the Transportation Research Board*, 88-95.
- Saima Ali, Sabrina Fawz, (2020). Performance of protective concrete runway pavement under aircraft impact loadin.
- V. Carvelli, C. Corazza, and C. Poggi, (2007). Mechanical Modelling of Monofilament Technical Textiles. *Journal of Computational Materials Science*, 42, Elsevier, 671-691.
- Wu J., Wu H., Tan H.W.A., Chew S.H. (2018). Multilayer pavement system under blast load. *Springer Tracts in Civil Engineering*.  
**doi: 10.1007/978-981-10-5001-5**

# Evaluation of Airport Concrete Runway Pavement under Impact Load by Isogeometric Numerical Method

*Mahdi Abbasi Sardarabadi, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Sha.c.,  
Islamic Azad University, Shahrood, Iran.*

*Ahmad Ganjali, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sha.c.,  
Islamic Azad University, Shahrood, Iran.*

*Ehsan Kashi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sha.c.,  
Islamic Azad University, Shahrood, Iran.*

*Hamidreza Irani, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sha.c.,  
Islamic Azad University, Shahrood, Iran.*

*E-mail: [ahmad.ganjali@iau.ac.ir](mailto:ahmad.ganjali@iau.ac.ir)*

Received: January 2025- Accepted: April 2025

## ABSTRACT

Today, with the development of the aviation industry and appearance of wide-body airplanes, need to build suitable runways therefore the runway pavements are always exposed to the hard landing of the airplanes. Considering that limited research has been done on rigid concrete pavements under impact load, this research development isogeometric numerical solution method, and the results of the isogeometric analysis are validated with the finite element and laboratory results. Considering the selection of less degrees of freedom in the isogeometric method compared to the finite element observed the results of the mentioned method are closer to the laboratory results with a lower computational cost and error percentage, which is due to the use of splines. Finally, this research using The above method deals with different parameters of speed, weight mass and compressive strength of concrete it was observed that increasing the speed of the weight from 4 to 6 m/s increases the vertical displacement of the pavement at point P1 and P2, respectively amount of 108, 113% and the increase of concrete strength from the range of 54 to 90 Mpa, it causes a decrease in the vertical displacement at the point P1, P2 by 60 and 31%, and also the increase in the mass of the weight from 800 to 1400 kg causes an increase in the deviation Vertical at P1 and P2 points is 38 and 43%, therefore, increasing the speed of the weight compared to other parameters accelerates the destruction of the runway pavement.

**Keywords:** Impact load, Pavement, Airport Runway, Transverse Seam, Isogeometric