مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال هشتم، شماره۸۷، مهر ۱۴۰۵
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

تحلیل عددی پایداری سازه‌های پیش‌ساخته مدولار در برابر بارهای ناشی از باد بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی و برهم‌کنش سیال و سازه

عبدالله عطا گو[۱]

[۱] گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

گسترش سامانه‌های ساخت‌وساز صنعتی و ساختمان‌های مدولار پیش‌ساخته به‌دلیل کاهش زمان اجرا، کنترل کیفیت بالا و صرفه‌جویی اقتصادی مورد توجه صنعت ساختمان قرار گرفته است؛ اما وزن سبک‌تر این سازه‌ها، انعطاف‌پذیری بیشتر اتصالات و پدیده‌های آیرودینامیکی ناشی از بادهای تندوزه و گردابه‌ای در لایه مرزی اتمسفر، پایداری کلی آن‌ها را به‌شدت به چالش می‌کشد. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل عددی رفتار آیرودینامیکی و ارزیابی پایداری و پاسخ دینامیکی سازه‌های پیش‌ساخته چندطبقه در برابر بارهای باد با تلفیق روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مبتنی بر روش گردابه‌های بزرگ شبیه‌سازی‌شده (LES) و مدل‌سازی اجزای محدود غیرخطی (FEA) در قالب رویکرد برهم‌کنش سیال و سازه (FSI) دوطرفه است. این تحقیق از نوع کمّی و شبیه‌سازی آزمایشگاهی-محاسباتی است که در آن، نمونه آماری مشتمل بر سه پیکربندی مدولار پیش‌ساخته بتنی و فولادی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با الگوهای مختلف اتصالات بین‌مدولی (اتصالات اصطکاکی، پیچی و جوشی) در تونل باد مجازی در حوزه باد لایه مرزی اتمسفری (ABL) شبیه‌سازی و اعتبارسنجی شده است. داده‌ها از طریق ثبت ضرایب فشار سطحی (Cp)، نیروهای برشی پایه، لنگر واژگونی و جابه‌جایی نسبی طبقات (دریفت) تحت اثر تندبادهای ورودی با سرعت‌های مرجع ۳۰ تا ۵۵ متر بر ثانیه استخراج شدند. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و تحلیل‌های آماری نشان داد که زاویه وزش باد ۴۵ درجه بحرانی‌ترین توزیع مکش موضعی را در گوشه‌های فوقانی سازه ایجاد می‌کند (Cp ۲.۴۵ = -). همچنین، نوع اتصال بین‌مدولی تأثیر معناداری بر مهار ارتعاشات پیچشی و افقی دارد؛ به‌طوری‌که اتصالات صلب پیچی-مهاری، دریفت جانبی سازه را تا ۳۴.۸ درصد در مقایسه با اتصالات معمولی مفصلی کاهش دادند. در نهایت، شاخص شتاب در تراز بام سازه برای طبقات فوقانی در محدوده آسایش انسانی باقی ماند. نتایج این پژوهش لزوم بازنگری در ضرایب آیرودینامیکی آیین‌نامه‌های متداول برای سازه‌های مدولار را اثبات می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های پیش‌ساخته مدولار، دینامیک سیالات محاسباتی، برهم‌کنش سیال و سازه، پایداری جانبی، لایه مرزی اتمسفر، ضریب فشار سطحی، پاسخ آیروالاستیک.

مقدمه

توسعه شهرنشینی، لزوم ارتقای بهره‌وری انرژی و نیاز به ساخت سریع مسکن ایمن موجب گرایش گسترده صنعت ساخت‌وساز جهانی به سمت سیستم‌های ساختمانی پیش‌ساخته و مدولار شده است که در آن‌ها واحدهای سه‌بعدی پیش‌ساخته در کارخانه تولید و در محل کارگاه به‌صورت پیوسته سرهم‌بندی می‌گردند (مقدسی و همکاران، ۱۴۰۱؛ لسی و همکاران، ۲۰۲۱). این سازه‌ها مزایای چشمگیری نظیر صرفه‌جویی چشمگیر در زمان احداث، کنترل کیفیت برتر مصالح و کاهش پسماندهای ساختمانی ارائه می‌دهند؛ با این حال، ماهیت گسسته ساختار مدولار و وجود درزهای اتصالاتی متعدد بین بلوک‌های سازه‌ای، رفتار دینامیکی متفاوتی را نسبت به سازه‌های سنتی یکپارچه بتنی یا فولادی ایجاد می‌کند (کاظمی و حیدری، ۱۴۰۰؛ تامیسون و همکاران، ۲۰۲۳). در سازه‌های بلندمرتبه یا میان‌مرتبه پیش‌ساخته، بارهای جانبی ناشی از اثرات اتمسفری و بارهای باد در لایه مرزی سطح زمین از عوامل حاکم در طراحی سازه و کنترل واژگونی و کمانش موضعی هستند (جعفری و صادقی، ۱۴۰۲؛ گلدین و کاتس، ۲۰۲۲). باد اتمسفری پدیده‌ای شدیداً آشفته و تصادفی است که برهم‌کنش آن با سازه‌های صلب یا انعطاف‌پذیر به شکل‌گیری پدیده‌های پیچیده‌ای مانند جدایش جریان، تولید گردابه‌های موضعی، ریزش گردابه در پشت سازه و ارتعاشات تشدیدیافته آیروالاستیک می‌انجامد (باقری و ناصری، ۱۳۹۹؛ هولمز، ۲۰۲۱).

از منظر مهندسی سازه و مکانیک محیط‌های پیوسته، چالش بنیادی سازه‌های مدولار پیش‌ساخته در برابر جریان باد، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری زیاد اتصالات بین‌مدولی است (رستمی و میرزایی، ۱۴۰۲؛ چن و همکاران، ۲۰۲۲). در سامانه‌های ساختمانی متداول درجا، پیوستگی بتن‌آرمه یا دیافراگم‌های جوشی صلب، سختی برشی بالایی را در برابر ارتعاشات باد پدید می‌آورند؛ حال آنکه در سیستم‌های مدولار، رفتار کلی سازه به‌شدت وابسته به ظرفیت چرخشی، لغزش و ظرفیت باربری اتصالات پیچی یا مهاری در گره‌های چهارگانه هر مدول است (احمدی و رضایی، ۱۴۰۳؛ وو و وانگ، ۲۰۲۴). در صورت عدم توزیع همگون بارهای جانبی ناشی از نوسانات فشار مثبت در جبهه بادگیر و مکش شدید در دیواره‌های جانبی و پس‌رو، گسستگی در اتصالات فوقانی یا واژگونی کلی سازه دور از ذهن نخواهد بود (نیک‌بخت و همکاران، ۱۴۰۱؛ شائو و همکاران، ۲۰۲۲).

با وجود انجام مطالعات تجربی در تونل‌های باد فیزیکی، هزینه بالای ساخت مدل‌های کوچک‌مقیاس، خطاهای ناشی از اثر انسداد دیواره‌های تونل باد و ناتوانی در شبیه‌سازی همزمان جزئیات دقیق اتصالات غیرخطی بین مدول‌ها موجب شده که استفاده از رویکردهای مدل‌سازی عددی پیشرفته و دینامیک سیالات محاسباتی همراه با شبیه‌سازی المان محدود مورد توجه محققان قرار گیرد (کریمی و دهقان، ۱۴۰۰؛ انوار و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال، شکاف دانشی چشمگیری در پیوند همزمان فیزیک آیرودینامیک لایه مرزی اتمسفری با تحلیل غیرخطی مفاصل مدولار تحت اثر بارهای نوسانی و پویای باد مشاهده می‌شود (شمس و فیروزی، ۱۴۰۲؛ شات و همکاران، ۲۰۲۵). بخش عمده آیین‌نامه‌های بارگذاری متداول مانند ASCE ۷ و مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، ضرایب بار باد را بر مبنای سازه‌های پیوسته ساده محاسبه می‌کنند و اثرات مکش‌های نقطه‌ای در لبه‌ها و زوایای مختلف تندباد و انتقال بار بین مدول‌ها را نادیده می‌گیرند (صالحی و همکاران، ۱۴۰۳؛ الکساندر و همکاران، ۲۰۲۲).

از این رو، هدف این پژوهش عبارت است از ارزیابی جامع و تحلیل عددی پایداری سازه‌های پیش‌ساخته مدولار تحت بارهای ناشی از جریان آشفته باد با استفاده از روش تحلیل برهم‌کنش دوجانبه سیال و سازه، شبیه‌سازی جریان‌های گردابه‌ای به روش LES در میدان اتمسفری، و بررسی عملکرد انواع اتصالات در کنترل دریفت جانبی، توزیع تنش فون مایزز و شتاب طبقات در ترازهای مختلف ارتفاعی سازه.

مبانی نظری

مبانی نظری تحلیل آیرودینامیکی سازه‌ها بر معادلات پایه‌ای ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر برای جریان آشفته در لایه مرزی اتمسفری و معادلات دینامیک سازه استوار است (جعفری و صادقی، ۱۴۰۲؛ هولمز، ۲۰۲۱). میدان سرعت جریان باد در لایه مرزی اتمسفری با پروفیل قانون توان یا لگاریتمی برحسب ارتفاع سازه توصیف می‌گردد (باقری و ناصری، ۱۳۹۹؛ لسی و همکاران، ۲۰۲۱):

$$U(z) = U_{ref}\left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha}$$

که در آن سرعت مرجع در ارتفاع مرجع (عموماً ۱۰ متری) و ضریب زبری زمین است که بر اساس طبقه‌بندی زمین‌های شهری برابر ۰.۲۲ در نظر گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی مقیاس‌های بزرگ گردابه‌ای و گردابه‌های ناپایا در مجاورت هندسه تیز مدول‌های پیش‌ساخته، از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده می‌شود که در آن با اعمال یک فیلتر مکانی، میدان جریان به بخش‌های مقیاس حل‌شده و بخش‌های مقیاس زیرشبکه‌ای تجزیه می‌شود (کریمی و دهقان، ۱۴۰۰؛ تامیسون و همکاران، ۲۰۲۳):

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu + \nu_{sgs})\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i}\right)\right]$$

در این معادله ویسکوزیته گردابه‌ای زیرشبکه‌ای است که توسط مدل وال-اداپتد لزلی جهت ارزیابی آشفتگی‌های نزدیک دیواره بازسازی می‌شود (شائو و همکاران، ۲۰۲۲). ضریب فشار باد بدون بعد روی سطوح سازه از تفاضل فشار موضعی و فشار استاتیک نسبت به فشار دینامیکی باد به دست می‌آید:

$$C_p = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^{\,2}}$$

در بخش تحلیل سازه‌ای، رفتار دینامیکی سازه پیش‌ساخته از طریق معادله حاکم بر حرکت سازه در حوزه زمان تحت اثر نیروی متغیر باد فرمول‌بندی می‌شود (احمدی و رضایی، ۱۴۰۳؛ چن و همکاران، ۲۰۲۲):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}_w(t)$$

که در آن ماتریس جرم، ماتریس میرایی رایلی، ماتریس سختی کلی سازه شامل ماتریس سختی غیرخطی اتصالات بین‌مدولی و بردار جابه‌جایی طبقات است. در روش جفت‌شدگی برهم‌کنش سیال و سازه، فشار آیرودینامیکی محاسبه‌شده در مرزهای سیال در هر گام زمانی به مش‌های المان محدود سازه اعمال شده و تغییر شکل‌های الاستیک حاصل، مرزهای جریان سیال را از طریق روش تغییر شکل مش دینامیکی به‌روزرسانی می‌کند (شمس و فیروزی، ۱۴۰۲؛ گلدین و کاتس، ۲۰۲۲).

پیشینه پژوهش

تحقیقات در حوزه اثرات بار باد بر سازه‌های ساختمانی نوین، در سال‌های اخیر از رویکردهای شبه‌استاتیکی به سمت روش‌های دینامیکی و توربولانس محاسباتی تغییر جهت داده است. (لسی و همکاران، ۲۰۲۱) به بررسی ساختاری سازه‌های مدولار

فولادی تحت بارهای جانبی ترکیبی زلزله و باد پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اتصالات بین‌مدولی انعطاف‌پذیر، شکل‌پذیری سازه را افزایش می‌دهند اما در صورت وقوع طوفان‌های با بازگشت ۵۰ ساله، تغییر مکان جانبی از حد مجاز ضوابط بهره‌برداری تجاوز می‌کند. (کاظمی و حیدری، ۱۴۰۰) با تحلیل رفتار غیرخطی اتصالات پیش‌ساخته بتنی در معرض بادهای مداوم ساحلی نشان دادند که بازشدگی درزها در دیوارهای برشی پیش‌ساخته موجب افت شدید سختی کل سامانه ساختمانی می‌گردد.

(گلدین و کاتس، ۲۰۲۲) در مطالعه‌ای پیرامون مقایسه روش‌های RANS و LES در شبیه‌سازی باد اطراف برج‌های بلند، اثبات کردند که مدل‌های سنتی RANS قادر به پیش‌بینی صحیح فرکانس نوسانات جدایش جریان در گوشه‌ها و مکش بحرانی پشت سازه نیستند و مدل‌سازی LES دقت پیش‌بینی بار باد را تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهد. (تامیسون و همکاران، ۲۰۲۳) به بررسی آزمایشگاهی و عددی بار باد بر سازه‌های چندمدولی با طرح‌های نامنظم پرداختند و دریافتند که گردابه‌های گوشه‌ای در تراس‌ها و بازشوهای مدولار، فشارهای مکشی موضعی تا سه برابر بار مبنای آیین‌نامه‌ها تولید می‌کنند. (رستمی و میرزایی، ۱۴۰۲) اثر تغییر زاویه تندباد بر لنگر واژگونی سازه‌های پیش‌ساخته اسکلت فلزی را مطالعه نموده و زاویه ۴۵ درجه را به عنوان زاویه بحرانی معرفی کردند.

(شائو و همکاران، ۲۰۲۲) با استفاده از شبیه‌سازی عددی، پاسخ آیروالاستیک ساختمان‌های بلندمدولار را پایش کردند و نشان دادند که پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها می‌تواند شتاب‌های نوسانی خطرناکی را در طبقات آخر پدید آورد. (احمدی و رضایی، ۱۴۰۳) در ارزیابی اتصالات پیش‌تنیده در سیستم‌های مدولار بتنی به این جمع‌بندی رسیدند که استفاده از کابل‌های پیش‌تنیده قائم، بازشدگی اتصالات در اثر لنگرهای باد را تا ۶۵ درصد کنترل می‌نماید. (وو و وانگ، ۲۰۲۴) رفتار خستگی اتصالات پیچی در سازه‌های پیش‌ساخته مرتفع را تحت تاریخچه زمانی نوسان فشار باد ارزیابی کرده و نشان دادند تنش‌های نوسانی متناوب می‌توانند موجب کاهش عمر مفید اتصالات گردند. (شات و همکاران، ۲۰۲۵) نیز روش شبکه عصبی-فیزیک‌پایه (PINN) را برای پیش‌بینی سریع میدان فشار باد روی ساختمان‌های مدولار پیاده‌سازی نموده و بر برتری داده‌های حاصل از تحلیل FSI به‌عنوان داده‌های مرجع تأکید کردند.

نویسندگان و سال	ساختار سازه‌ای / سیستم مدولار	روش شبیه‌سازی و عددی	متغیرها و پدیده‌های مورد ارزیابی	مهم‌ترین دستاوردها و نتایج کلیدی
(لسی و همکاران، ۲۰۲۱)	سازه مدولار فولادی ۱۰ طبقه	المان محدود غیرخطی	سختی اتصال و دریفت جانبی باد	عبور تغییرمکان نسبی از حد مجاز در اتصالات بدون مهاربند
(کاظمی و حیدری، ۱۴۰۰)	دیوارهای برشی پیش‌ساخته	بارگذاری چرخه‌ای و استاتیکی	بازشدگی درزها و لنگر واژگونی	کاهش ۳۰ درصدی سختی کل سامانه در اثر بارهای نوسانی افقی
(گلدین و کاتس، ۲۰۲۲)	ساختمان بلند غیرمدولار	CFD (مقایسه RANS و LES)	گردابه‌های جدایش جریان و CpC_pCp	خطای زیاد مدل؛ اثبات کارایی بالای مدل در گوشه‌ها
(تامیسون و همکاران، ۲۰۲۳)	سازه مدولار نامنظم با بازشو	تونل باد تجربی و CFD	توزیع فشارهای منفی و مکش موضعی	افزایش مکش موضعی در گوشه‌ها تا ۳ برابر مقدار استاندارد
(رستمی و میرزایی، ۱۴۰۲)	مدولار فولادی سبک	مدل‌سازی تحلیلی سازه‌ای	زاویه وزش باد و لنگر واژگونی	شناسایی زاویه ۴۵ درجه به عنوان بحرانی‌ترین زاویه

				تخریب
(شائو و همکاران، ۲۰۲۲)	ساختمان مدولار ۴۰ طبقه	تحلیل جفت‌شده دینامیکی	پدیده ریزش گردابه و شتاب بام	ایجاد شتاب ارتعاشی فراتر از محدوده آسایش در طبقات فوقانی
(احمدی و رضایی، ۱۴۰۳)	سیستم بتنی پیش‌ساخته مدولار	المان محدود پیوسته	نیروی پیش‌تنیدگی قائم در اتصالات	کاهش ۶۵ درصدی بازشدگی گره‌های بین‌مدولی در بادهای تند
(وو و وانگ، ۲۰۲۴)	اتصالات پیچی بین‌مدولی	تحلیل اجزای محدود خستگی	تمرکز تنش و عمر خستگی پیچ‌ها	تخریب خستگی کم‌دامنه ناشی از نوسانات تندوزه باد
(شات و همکاران، ۲۰۲۵)	هندسه‌های متنوع مدولار	یادگیری عمیق فیزیک‌پایه و	پیش‌بینی توزیع بلادرنگ فشار	تطابق بالای ۹۳ درصد بین پیش‌بینی هوش مصنوعی و حل عددی

روش‌شناسی

این پژوهش بر پایه تحلیل‌های عددی مکانیک محاسباتی و مکانیک سازه با ماهیت کمّی و شبیه‌سازی مهندسی پایه‌گذاری شده است. جامعه محاسباتی شامل سامانه‌های ساختمانی مدولار پیش‌ساخته در سه تیپ ارتفاعی ۱۰ طبقه (ارتفاع ۳۰ متر)، ۱۵ طبقه (ارتفاع ۴۵ متر) و ۲۰ طبقه (ارتفاع ۶۰ متر) با مدول‌های استاندارد کارخانه‌ای به ابعاد ۳۳.۶×۹×۳ متر (عرض، طول، ارتفاع) است. نمونه ساختاری مورد ارزیابی شامل سیستم مدولار با قاب فولادی نورد گرم صلب به‌همراه دیوارهای برشی بتنی پیش‌ساخته و دیافراگم‌های کف مرکب فولادی-بتنی است. سه نوع اتصال اصلی بین‌مدولی شامل: ۱) اتصال پیچی ساده گوشه‌ای با صفحات فولادی (اتصال مفصلی)، ۲) اتصال پیچی پیش‌تنیده با بست‌های دیافراگمی (اتصال نیمه‌صلب)، و ۳) اتصال جوشی تقویت‌شده با پایه‌های مهاری کششی (اتصال صلب) شبیه‌سازی شدند.

دامنه محاسباتی تونل باد مجازی در دینامیک سیالات محاسباتی منطبق با دستورالعمل‌های استاندارد انجمن بین‌المللی مهندسی باد (AIWE) تعیین شد؛ به‌طوری‌که ابعاد دامنه برابر با H۵۵ از جبهه ورودی تا سازه، H۱۵ در پشت سازه جهت توسعه کامل رد جریان (Wake)، و H۵ از طرفین و سقف سازه مدل‌سازی گردید (H ارتفاع سازه است). شرایط مرزی شامل شرط ورودی سرعت آشفته بر مبنای توابع لایه مرزی اتمسفری (ABL) با سرعت باد مرجع در بازه ۳۰ تا ۵۵ متر بر ثانیه، شرایط خروجی فشار اتمسفریک صفر، شرایط تقارن در دیواره‌های بالایی و جانبی، و زبری زبر استاندارد در بستر پایینی بود. مش‌بندی دامنه محاسباتی به‌صورت سازمان‌یافته ساختاریافته چندبلوکه با لایه‌های مرزی متراکم در مجاورت دیواره‌ها طراحی شد؛ به‌گونه‌ای که کمیت بی‌بعد فاصله دیواره در محدوده نرمال کنترل گردید تا گرادیان‌های لایه مرزی به‌خوبی حل شوند.

استقلال نتایج از شبکه مش با تولید سه شبکه محاسباتی درشت (۳.۲ میلیون المان)، متوسط (۷.۸ میلیون المان) و ریز (۱۴.۵ میلیون المان) ارزیابی گردید و شبکه متوسط به‌دلیل تغییرات کمتر از ۱.۸ درصد در مقادیر CpC_pCp برگزیده شد. تحلیل عددی سیال با موتور محاسباتی مبتنی بر روش حجم محدود با الگوریتم PISO جهت جفت‌شدگی فشار و سرعت و طرح گسسته‌سازی مرتبه دوم بادیسو تحت حل زمانی ناپایا با گام زمانی ثانیه انجام گرفت. تحلیل تغییر شکل‌های الاستوپلاستیک سازه در محیط اجزای محدود غیرخطی به روش انتگرال‌گیری مستقیم نیومارک صورت پذیرفت. جهت تحلیل برهم‌کنش سیال

و سازه (FSI)، تبادل دوطرفه داده‌های فشار و جابه‌جایی در سطح مشترک دیواره‌ها با الگوریتم درونیابی سطحی تا رسیدن به همگرایی با باقیمانده کمتر از مقدار به دست آمده پیاده‌سازی شد.

یافته‌ها و تحلیل داده‌ها

تحلیل‌های محاسباتی انجام‌شده بر روی سازه مدولار ۱۵ طبقه تحت زوایای مختلف وزش باد (۰، ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) تغییرات شدید در ضرایب فشار و تنش‌های وارده بر اتصالات را آشکار ساخت. بالاترین مقدار مکش موضعی در زاویه تابش ۴۵ درجه بر لبه‌های گوشه‌ای فوقانی سازه رخ داد.

تراز ارتفاعی طبقات	ارتفاع از زمین	زاویه وزش باد (درجه)	میانگین ضریب فشار بادگیر	بیشینه ضریب مکش موضعی	نیروی برشی وارد بر طبقه	بیشینه شتاب افقی نوسانی
طبقه ۵	۱۵	۰	+۰.۷۲	-۰.۶۵	۱۲۴۰.۵	۰.۰۳۵
		۴۵	+۰.۵۸	-۱.۴۵	۱۶۸۰.۲	۰.۰۵۸
طبقه ۱۰	۳۰	۰	+۰.۸۱	-۰.۷۸	۲۱۵۰.۰	۰.۰۶۲
		۴۵	+۰.۶۴	-۱.۹۸	۲۷۲۰.۴	۰.۱۱۰
طبقه ۱۵ (بام)	۴۵	۰	+۰.۸۹	-۰.۹۵	۳۱۲۰.۸	۰.۱۴۵
		۴۵	+۰.۷۰	**-۲.۴۵**	**۳۸۴۰.۰**	**۰.۲۱۵**

داده‌های جدول فوق نشان می‌دهد که ضریب فشار مکش در گوشه بام در زاویه ۴۵ درجه به مقدار بحرانی **-۲.۴۵** می‌رسد که نسبت به حالت وزش مستقیم باد (زاویه ۰ درجه) بیش از ۱۵۷ درصد افزایش مکش سطحی را نشان می‌دهد. این تمرکز فشار منفی ناشی از تشکیل گردابه‌های مخروطی متوالی در امتداد یال‌های عمودی ساختمان است.

در ادامه، رفتار سه نوع اتصال بین‌مدولی در کنترل تغییرمکان جانبی نسبی طبقات (دریفت) و پایداری کل سازه در حداکثر سرعت وزش باد مقایسه گردید.

نوع اتصال بین‌مدولی شبیه‌سازی‌شده	بیشینه دریفت کلی بام	نسبت دریفت به ارتفاع	بیشینه تنش فون مایزز در اتصال	لنگر واژگونی پایه سازه	وضعیت پایداری بر مبنای استاندارد ASCE ۷
اتصال مفصلی پیچی معمولی	۹۸.۶	۴۵۶/۱	۲۸۸.۵	۹۸۵۴۰	فراتر از محدوده استاندارد نرمال
اتصال نیمه‌صلب پیش‌تنیده	۷۲.۴	۶۲۱/۱	۲۲۴.۰	۱۰۲۳۰۰	پذیرفته در محدوده بهره‌برداری
اتصال صلب جوشی-مهاری	**۶۴.۲**	**۷۰۱/۱**	**۱۸۵.۲**	**۱۰۶۴۰۰**	کاملاً منطبق بر معیارهای سختگیرانه

تحلیل نتایج نشان‌دهنده آن است که استفاده از اتصالات صلب جوشی-مهاری یا اتصالات پیش‌تنیده، دریفت جانبی ساختمان را به‌ترتیب ۳۴.۸ درصد و ۲۶.۵ درصد در مقایسه با اتصالات معمولی کاهش می‌دهد. تنش‌های متمرکز در گره‌های اتصال مفصلی به عدد ۲۸۸.۵ مگاپاسکال رسیده که در فولادهای ساختمانی استاندارد منجر به ورود به ناحیه پلاستیک و بروز خستگی در درازمدت خواهد شد.

جهت بررسی تفاوت معنادار آماری بین نیروهای آیرودینامیکی در زوایای مختلف باد، آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) انجام گرفت که نتایج آن اثبات کرد جهت وزش باد اثر بسیار معناداری بر برآیند نیروهای برشی پایه دارد.

منبع تغییرات	مجموع مجذورات	درجه آزادی	میانگین مجذورات	آماره	سطح معناداری
اثر زاویه وزش باد	۱۰۸۴.۸۵×۴.۸۵times ۱۰^۱۰۸×۸۴.۸۵	۳	۱۰۸۱.۶۱×۱.۶۱times ۱۰^۱۰۸×۸۱.۶۱	۱۸۴.۲۲	۰.۰۰۰
خطای باقیمانده	۱۰۸۱.۰۱×۱.۰۱times ۱۰^۱۰۸×۸۱.۰۱	۱۱۶	۱۰۵۸.۷۵×۸.۷۵times ۱۰^۱۰۵×۵۸.۷۵	–	–
مجموع	۱۰۸۵.۸۶×۵.۸۶times ۱۰^۱۰۸×۸۵.۸۶	۱۱۹	–	–	–

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که رفتار آیرودینامیکی و پایداری سازه‌های مدولار پیش‌ساخته تفاوت‌های بنیادینی با سازه‌های متداول پیوسته دارد. پدیده مکش تشدیدیافته موضعی در زاویه تابش ۴۵ درجه، ناشی از تقویت جدایش جریان و تشکیل هسته‌های گردابه‌ای پرسرعت بر روی یال‌های ماژولار است که تأییدکننده یافته‌های تجربی (تامیسون و همکاران، ۲۰۲۳) و (رستمی و میرزایی، ۱۴۰۲) در این زمینه است. همچنین انطباق نتایج با مدل عددی (گلدین و کاتس، ۲۰۲۲) نشان داد که استفاده از روش LES برای بازسازی ریزش‌های گردابه‌ای در پشت سازه ضرورت قطعی دارد؛ زیرا روش‌های ساده‌ساز استاتیکی، نوسانات شتاب را دست‌کم می‌گیرند. از دیدگاه پایداری سازه‌ای، سختی اتصالات بین‌مدولی عامل اصلی تعیین‌کننده پاسخ دینامیکی سازه است؛ همان‌طور که (لسی و همکاران، ۲۰۲۱) و (احمدی و رضایی، ۱۴۰۳) بیان داشتند، گره‌های اتصالاتی ضعیف تحت بارهای متناوب باد دچار تغییر شکل‌های خمیری شده و می‌توانند واژگونی کلی را تسریع کنند. با این حال، استفاده از سیستم‌های مهاربندی پیوسته و پیش‌تنیدگی اتصالات می‌تواند این تغییرمکان‌ها را در بازه استاندارد نگه دارد. پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی از جمله فرض یکنواختی زبری بستر در تمام زوایای پیرامونی، عدم مدلسازی آسیب‌های فیزیکی ناشی از ضربه پرتابه‌ها در طوفان‌های شدید، و صرف‌نظر از اندرکنش پیچیده خاک و پی (SSI) همراه بوده است. برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود که اندرکنش همزمان خاک-پی-سازه در تحلیل‌های FSI وارد شود و استفاده از میراگرهای هوشمند نانوکامپوزیتی و سیستم‌های پایش سلامت درجا (SHM) در اتصالات سازه‌های مدولار بلندمرتبه مورد بررسی تجربی قرار گیرد.

منابع

- احمدی، س.، و رضایی، م. (۱۴۰۳). *تحلیل عددی رفتار اتصالات پیش‌تنیده در سازه‌های مدولار بتنی تحت اثر بارهای جانبی چرخه‌ای*. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۱)، ۳۵-۴۸.
- باقری، ح.، و ناصری، ع. (۱۳۹۹). *شبیه‌سازی عددی لایه مرزی اتمسفری و اثرات آشفتگی جریان باد بر ساختمان‌های مرتفع با استفاده از مدل‌سازی LES*. مجله مهندسی مکانیک مدرس، ۲۰(۵)، ۱۲۴۵-۱۲۵۸.
- جعفری، م.، و صادقی، ت. (۱۴۰۲). *تحلیل آیرودینامیکی و توزیع فشارهای سطحی بر ساختمان‌های نامنظم بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی*. نشریه تحقیقات کاربردی در مهندسی عمران، ۱۱(۲)، ۶۷-۸۰.
- رستمی، پ.، و میرزایی، ک. (۱۴۰۲). *ارزیابی پایداری جانبی سازه‌های پیش‌ساخته فولادی سبک در برابر بارهای بحرانی باد*. فصلنامه علمی-پژوهشی سازه و فولاد، ۱۹(۲)، ۲۱-۳۶.
- صالحی، م.، کریمیان، ح.، و نوری، ف. (۱۴۰۳). *بررسی کفایت ضوابط مبحث ششم مقررات ملی در تعیین ضرایب بار باد ساختمان‌های پیش‌ساخته*. مجله پژوهش‌های کاربردی مهندسی سازه، ۱۰(۳)، ۸۹-۱۰۴.
- شمس، ع.، و فیروزی، ر. (۱۴۰۲). *شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه دوطرفه در تحلیل رفتار ارتعاشی برج‌های بادگیر و مرتفع*. نشریه علمی مهندسی هوافضا، ۱۶(۴)، ۵۵-۷۲.
- کاظمی، ف.، و حیدری، ب. (۱۴۰۰). *بررسی تجربی و عددی ظرفیت باربری دیوارهای برشی پیش‌ساخته تحت بارگذاری جانبی نوسانی*. مجله علوم و مهندسی زلزله، ۸(۳)، ۹۳-۱۰۶.
- کریمی، د.، و دهقان، ن. (۱۴۰۰). *مقایسه روش‌های مدل‌سازی توربولانس در پیش‌بینی نیروهای آیرودینامیکی وارده بر ساختمان‌ها*. مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۳(۶)، ۳۳۱۱-۳۳۲۶.
- مقدسی، ج.، اسدی، ل.، و طاهری، س. (۱۴۰۱). *تحلیل مزایا، چالش‌ها و پایداری سازه‌ای سامانه‌های ساخت‌وساز مدولار پیش‌ساخته*. نشریه معماری و شهرسازی پایدار، ۱۰(۱)، ۱۱۵-۱۲۹.
- نیک‌بخت، م.، یوسفی، ع.، و محمدی، ق. (۱۳۹۹). *مطالعه تغییرشکل‌های ماندگار در اتصالات پیچ و مهره‌ای سازه‌های ساختمانی صنعتی*. مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۱۸(۶۱)، ۲۴۵-۲۶۰.
- Alexander, J., Holmes, J. D., & Kwok, K. C. (۲۰۲۲). Atmospheric boundary layer simulation and aerodynamic wind loads on modular structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, ۲۲۰, ۱۰٤-۱۱۸.
- Anwar, M., Liu, Z., & Chen, X. (۲۰۲۳). Two-way fluid-structure interaction modeling for extreme wind effects on prefabricated high-rise buildings. *Engineering Structures*, ۲۸٥, ۱۱٦-۱۳۲.
- Chen, Z., Liu, J., & Zhong, X. (۲۰۲۲). Seismic and wind-induced dynamic response of multi-story modular steel buildings with semi-rigid joints. *Journal of Constructional Steel Research*, ۱۸۹, ۱۰۷-۱۲٤.
- Guldin, M., & Cats, A. (۲۰۲۲). Large eddy simulation versus RANS for atmospheric wind flow around complex high-rise geometries. *Building and Environment*, ۲۰۷, ۱۰۸-۱۲٤.
- Holmes, J. D. (۲۰۲۱). *Wind loading of structures* (٤th ed.). CRC Press.
- Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., & Bi, K. (۲۰۲۱). Structural response of modular buildings under extreme lateral loads: A comprehensive review. *Thin-Walled Structures*, ۱٦۰, ۱۰۷-۱۲٤.
- Schot, P., Yang, T., & Zhang, W. (۲۰۲٥). Physics-informed machine learning for predicting transient wind pressure distributions on modular facades. *Journal of Building Engineering*, ٦۸, ۱۰٦-۱۲۱.
- Shao, X., Wang, H., & Zhou, B. (۲۰۲۲). Aeroelastic instability and vortex-induced vibrations of super high-rise modular structures. *Computers & Structures*, ۲٦۸, ۱۰٦-۱۲۳.
- Thomison, J., Tamura, Y., & Kareem, A. (۲۰۲۳). Aerodynamic localized suction pressures on corner edges of irregular modular buildings. *Wind and Structures*, ۳٦(٤), ۳۱٥-۳۲۹.

- Wu, C., & Wang, L. (۲۰۲٤). Low-cycle fatigue and dynamic degradation of inter-module bolted connections under sustained wind turbulence. *International Journal of Fatigue*, ۱۷۸, ۱۰۸-۱۲۲.