

شبیه‌سازی عددی اثر نیروی محوری بر تغییر شکل جانبی ستون بتنی

با غلاف فولادی دوپوسته زیر بار انفجار

رمضانعلی ایزدی فرد^{۱*}، رزا رهبری^۲

۱- استادیار، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(دریافت: ۹۷/۰۶/۲۱، پذیرش: ۹۷/۰۹/۱۳)

چکیده

با افزایش روزافزون کاربرد ستون‌های بتنی با غلاف فولادی دوبل، این مطالعه به بررسی اثر نیروی محوری فشاری بر تغییر شکل جانبی ستون ناشی از موج انفجار با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار AUTODYN پرداخته است. بدین منظور ستون بتنی CFDST با مقطع مربع و سطوح مختلف بار محوری (نسبت بار به ظرفیت محوری ستون از ۰ تا ۰/۸۰) مدل‌سازی و تحت بارگذاری انفجار ۳۵ کیلوگرم TNT قرار گرفتند. تحقیق حاضر نشان می‌دهد برای سطوح پایین بار محوری تغییر مکان بیشینه و ماندگار و نیز شاخص آسیب ستون ناشی از بار جانبی انفجار، با افزایش بار محوری فشاری کاهش یافته است ولی با افزایش بار فشاری از ۰/۶ ظرفیت محوری ستون، پارامترهای فوق افزایش می‌یابند. همچنین با استفاده از ضخامت برابر برای ورق‌های فولادی داخلی و خارجی، می‌توان به کمترین تغییر شکل و آسیب ستون نسبت به حالتی که پوشش‌ها دارای ضخامت‌های مختلف هستند رسید.

کلیدواژه‌ها: ستون بتنی با غلاف فولادی، نیروی محوری، بار انفجار، تغییر شکل

Numerical Simulation of the Axial Load Effects on Lateral Deformation of Concrete Filled Double Skin Steel Tubular under Blast Loading

R. A. Izadifard*, R. Rahbari

Imam Khomeini International University
(Received: 12/09/2018; Accepted: 04/12/2018)

Abstract

According the increasing use of concrete filled double-skin steel tubular (CFDST), this study investigate the effect of axial compressive force on the lateral deformation caused via blast wave by using numerical simulation by AUTODYN software. For this purpose, CFDST with square section and different levels of axial load (p/p_u from 0 to 80%) were modeled and subjected to 35 Kg TNT explosion loading. The current research shows that the residual and maximum displacements as well as columns' damage index caused by blast load are decreased with increasing axial compressive load for lower values of axial force, but by exceeding the axial force over 0.6 of ultimate capacity, the aforementioned parameters are increased. Compared when using plates of different thickness, the minimum deformation and damage could be achieved by applying steel sheets of the same thickness for external and internal cover.

Keywords: Concrete Filled Double Skin Steel Tubular, Axial Force, Blast Loading, Deformation

۱. مقدمه

قابل توجهی در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی از خود نشان دهند. همچنین این مطالعه نشان داده است اگرچه محصورشدگی بتن توسط فولاد موجب افزایش شکل‌پذیری ستون می‌گردد ولی افزایش بار محوری موجب کاهش شکل‌پذیری خواهد شد. علی‌رغم مطالعه نسبتاً گسترده روی این المان سازه‌ای در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی، تحقیقات محدودی در زمینه رفتار آن در برابر بارهای انفجاری انجام شده است.

وانگ و همکاران [۹] پارامترهایی از قبیل شکل سطح مقطع، نسبت قطر به ضخامت و مقاومت فولاد و بتن را تحت بار انفجار با روش المان محدود تحلیل کرده و بر این اساس فرمولاسیون‌های تحلیلی جهت پیش‌بینی ظرفیت ستون ارائه نموده‌اند. عیسی و همکاران [۱۰] با بهره‌گیری از نرم‌افزار ABAQUS ظرفیت باربری ستون‌های بتن مسلح را تحت مقادیر مختلف بار انفجاری مورد مطالعه قرار دادند و اثر مقدار ماده منفجره و ابعاد مقطع را در مقدار تغییر شکل ماکزیمم و ماندگار ستون و نیز تأثیر آرماتورهای عرضی بر تغییر شکل ستون بررسی نمودند. مازورکی و همکاران [۱۱] تأثیر پل‌های محافظ از جنس فوم، آلومینیوم و کامپوزیت را در جذب انرژی ناشی از بار انفجار بررسی کرده و نشان داده‌اند استفاده از پوشش‌ها می‌تواند به کاهش کرنش‌های پلاستیک مقطع و افزایش ظرفیت باربری ستون فلزی منجر شود.

ایزدی فرد و همکاران [۱۲] به کمک روش المان محدود به بررسی پاسخ غیرخطی ستون فولادی در برابر انفجاری که به هنگام وقوع آتش‌سوزی رخ می‌دهد پرداختند و نشان دادند بالا رفتن دمای لحظه انفجار به بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس، می‌تواند سبب تغییر مکان‌های بزرگ و نهایتاً فروریزش ستون فولادی گردد.

با توجه به حضور بار محوری در ستون‌ها، هم‌زمانی بار محوری قائم و بار جانبی انفجار مورد توجه برخی محققین قرار گرفته است. لی و همکاران [۱۳] ظرفیت محوری باقیمانده چند نمونه ستون بتن مسلح را تحت بار جانبی انفجار در فاصله نزدیک با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA مورد مطالعه قرار داده و با ارائه دو رابطه تجربی نشان داده‌اند با افزایش بار محوری ستون، آسیب ناشی از انفجار کاهش می‌یابد. اگرچه این نتیجه تابع مقادیر آرماتور طولی و عرضی استفاده‌شده در مقطع است. پنج نمونه از ستون‌های مرکب فولاد و بتن با درصد متغیر آرماتور طولی، نسبت ابعادی و ارتفاع متفاوت تحت بار جانبی انفجار و بار محوری توسط لی و همکاران تحلیل عددی گردید. این مطالعه نشان داده است ظرفیت باقیمانده باربری ستون به موقعیت و

ستون‌های بتنی تقویت‌شده با غلاف فولادی دوگانه^۱ برای اولین بار در دهه ۶۰ میلادی مطرح شد ولی به دلیل مشکلات اجرایی و هزینه‌بر بودن بتن‌ریزی در داخل پوشش فولادی، کاربرد آن در سازه‌های واقعی محدود بوده است. با ظهور و پیشرفت تکنیک‌های پمپاژ بتن از سال‌های آغازین دهه ۸۰ میلادی، کاربرد ستون‌های بتنی تقویت‌شده با غلاف فولادی^۲ به تدریج توسعه یافته به طوری که امروزه به صورت گسترده‌ای در صنعت سازه به کار می‌رود [۱]. این ستون‌ها نسبت به ستون‌های متعارف بتن مسلح و فولادی مزایایی قابل توجهی دارند، از جمله [۲]:

- لرزش موضعی لوله‌های فولادی توسط پرکن بتن به تأخیر می‌افتد و از طرفی دیگر ورقه ورقه شدن بتن توسط لوله فولادی مهار می‌گردد.

- به دلیل موقعیت مکانی لوله فولادی در خارجی‌ترین لایه سطح مقطع، لوله فولادی در مقابل خمش با تمام قدرت مقاومت می‌کند.

- لوله فولادی می‌تواند به صورت مستقیم به عنوان قالب به کار برده شود و با بتن‌ریزی توسط پمپ که منجر به تمیزتر بودن محل سازه می‌شود زمان انجام و هزینه پروژه به صورت قابل توجهی کاهش یابد.

در دهه اخیر مطالعات زیادی به منظور بررسی رفتار ستون‌های CFST تحت شرایط مختلف بارگذاری با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی صورت گرفته است. الچلکانی و همکاران [۳] ۱۲ نمونه قطعه CFST با مقطع دایره‌ای را تحت خمش خالص مورد آزمایش قرار داده و مقاومت بتن و ورق‌های فولادی را بررسی نمودند. پریچارد و همکاران [۴] تأثیر ضربه محوری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی تقویت‌شده با ورق‌هایی از جنس‌های متفاوت (فولادی، آلومینیومی و پلاستیکی) را بررسی و مقایسه نمودند.

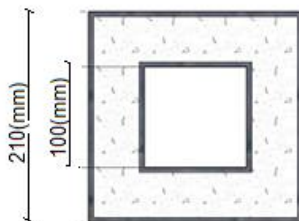
هان و همکاران [۵] بر اساس نتایج آزمایشگاهی و عددی فرمولاسیون ساده‌ای برای محاسبه ظرفیت خمشی ستون‌های دایره‌ای CFST ارائه کردند. رن و همکاران [۶] رفتار ستون‌های CFST با سطح مقطع متفاوت را تحت بارگذاری محوری مورد بررسی قرار دادند. آلام و همکاران [۷] رفتار ستون‌های CFST تقویت شده با FRP را تحت بارگذاری جانبی مورد بررسی قرار دادند. وو و همکاران [۸] با مطالعه عددی رفتار خمشی ستون‌های CFST نشان داده‌اند چنین ستون‌هایی می‌توانند مقاومت

^۱ Concrete Filled Double-skin Steel Tubular

^۲ Concrete Filled Steel Tubular

شده‌اند. غلاف تقویتی فولادی که در درون ستون بتنی نهاده شده است دارای ابعاد 110×110 میلی‌متر و ضخامتی برابر ۵ میلی‌متر است. غلاف فولادی بیرونی نیز دارای ابعاد 210×210 میلی‌متر و ضخامتی برابر ۵ میلی‌متر است. همچنین ارتفاع ستون ۲۵۰۰ میلی‌متر است.

در مدل‌سازی مقطع بتنی تعداد ۲۱ المان در جهت x و y و ۵۰ المان در راستای z انتخاب شده است. به‌عنوان دیگر اندازه ابعاد مش در راستای x ، y و z به ترتیب ۱۰، ۱۰ و ۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است. برای ورق‌های تقویتی فولادی نیز اندازه ابعاد مش در راستای x ، y و z به ترتیب فوق‌منظور شده است. اتصال بین پوشش تقویتی فولادی و بتن به‌صورت صلب در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. مقطع عرضی ستون CFST

شرایط مرزی: منظور از شرایط مرزی همان شرایط تکیه گاهی است. در این تحقیق شرط مرزی پایین ستون‌ها گیردار فرض شده است. همچنین بالای ستون در جهت y و x بسته شده است و در جهت z باز و در برابر حرکت قائم آزاد است. به منظور تعریف تکیه‌گاه گیردار، سرعت در جهت موردنظر صفر در نظر گرفته شد. برای بستن انتهای دیگر ستون در جهت x و y نیز سرعت در هریک از این جهات صفر در نظر گرفته می‌شود.

اعمال بارگذاری انفجاری: بارگذاری دینامیکی انفجار به چندین روش بر روی سازه قابل اعمال است. این بارگذاری بر روی سازه به روش مدل‌سازی مستقیم ماده منفجره و همچنین شبکه‌بندی آن و هوای اطراف سازه امکان‌پذیر است. در این روش باید از حل‌گر ALE یا اویلری استفاده کرد. روش دیگر مبتنی بر روش غیرمستقیم است. در این روش پارامترهای بارگذاری انفجاری بر اساس یک سری روابط تجربی تخمین زده شده و سپس این بارگذاری به‌صورت مستقیم بر روی سازه اعمال خواهد شد. این روش نیازی به تعریف شبکه‌بندی اویلری در سازه نبوده و در نتیجه زمان تحلیل کوتاه‌تر خواهد بود. در این تحقیق از روش اول یعنی مدل‌سازی مستقیم ماده منفجره و شبکه‌بندی هوای اطراف سازه استفاده شده است.

مقدار ماده منفجره بستگی شدیدی دارد. در مطالعه‌ای آزمایشگاهی توسط ژانگ و همکاران [۱۴] دو نوع ستون CFDST با مقطع دایره‌ای و مربعی تحت بارگذاری انفجاری قرار گرفتند. با مقایسه‌ی ستون‌ها در دو حالت بدون بار محوری و با بار محوری معادل $1000(N)$ مشاهده شده است که وجود بار محوری، حداکثر جابجایی جانبی و جابجایی ماندگار ستون را کاهش داده است. در این تحقیق، ستون زیر بار محوری معینی بوده است لذا نمی‌توان این نتیجه را تعمیم داد که به ازای همه مقادیر مختلف بار محوری، کاهش جابجایی ناشی از بار انفجار به وجود خواهد آمد، همچنین این پرسش که آیا چنین اثری تابعی از ضخامت فولاد محصورکننده بتن است یا خیر، بدون پاسخ است.

در تحقیق حاضر، با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN [۱۵] ستون‌های CFDST با ضخامت جداره فولادی متفاوت، تحت بارهای محوری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر بار محوری و ضخامت ورق فولادی بر رفتار ستون‌های CFDST تحت بار انفجار بررسی شده است.

۲. روش تحقیق

مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار AUTODYN به شرح زیر است:

تعریف مواد: در این تحقیق برای مدل‌سازی ستون از دو ماده بتن و فولاد استفاده شده است. همچنین هوای اطراف ستون نیز تعریف شده است. مدل ماده بتن RHT CONCRETE، و مدل ماده فولاد JOHNSON COOK انتخاب شد. در جدول‌های (۱) و (۲) پارامترهای مربوط به این دو مدل آورده شده است. برای بتن و فولاد به ترتیب حل‌گر Lagrange و Shell در نظر گرفته شد. همچنین برای مدل‌سازی هوای اطراف ستون از حل‌گر Euler استفاده شده است.

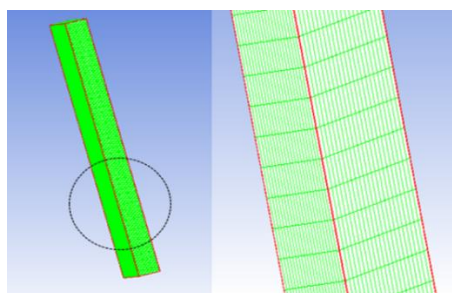
جدول ۱. پارامترهای مدل RHT CONCRETE [۹]

Shear modulus	2.206×10^7 (kPa)
Compressive strength (f_c)	140×10^5 (kPa)
Tensile strength (f_t/f_c)	0.1
Shear strength (f_s/f_c)	0.18

جدول ۲. پارامترهای مدل JOHNSON COOK [۱۲]

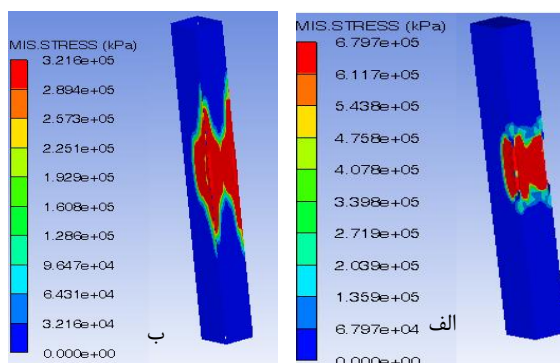
Shear modulus	8.18×10^7 (kPa)
Yield stress (f_y)	3.5×10^5 (kPa)
Ultimate stress (f_u)	5×10^5 (kPa)

مدل‌سازی هندسی: ابعاد هندسی ستون بتنی 200×200 میلی‌متر است، که به کمک عناصر پوسته‌ای فولادی تقویت

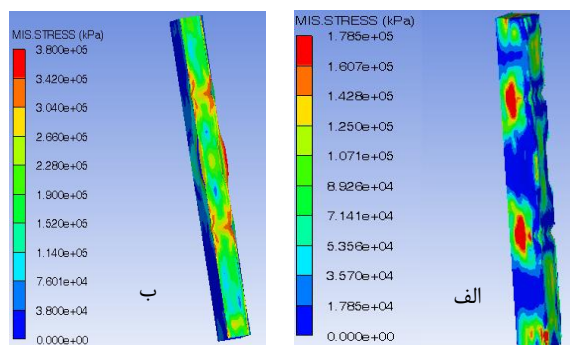


شکل ۳. مش بندی ستون

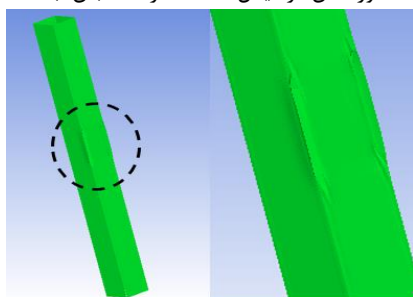
شکل‌های (۴) و (۵) تنش‌های موجود در بخش‌های بتنی و فولادی ستون در دو سیکل تحلیلی را نشان می‌دهد. همچنین تپله شدن و کماتش موضعی در غلاف فولادی در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۴. کانتور تنش در سیکل ۸۵۰۰ در الف) بتن ب) غلاف فولادی

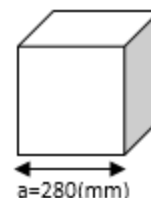


شکل ۵. کانتور تنش در سیکل ۱۰۷۰۰ در الف) بتن ب) غلاف فولادی



شکل ۶. خرابی در غلاف فولادی

برای بارگذاری انفجار، از ۳۵ کیلوگرم TNT با وزن مخصوص $1630 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ و در فاصله ۱/۵ متری از ستون استفاده شده است. اگر TNT را مکعب شکل در نظر بگیریم ابعاد هندسی آن بر اساس چگالی (ρ) و وزن (m) به صورت زیر به دست می‌آید:



$$\rho = \frac{m}{V} \quad \rho_{TNT} = 1630 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad m = 35(kg)$$

$$V = \frac{35}{1630} = 0.215(m^3) \rightarrow a = 280(mm)$$

هوای اطراف ماده منفجره با انرژی 2.06×10^5 در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) نمای مختلفی از ستون بتنی با غلاف فولادی، هوای اطراف ستون و ماده منفجره مدل سازی شده در نرم افزار AUTODYN و در شکل (۳) مش بندی ستون آورده شده است.



شکل ۲. مدل سازی الف) ستون و ماده منفجره ب) هوای اطراف ستون ج) نمای بالای ستون و ماده منفجره

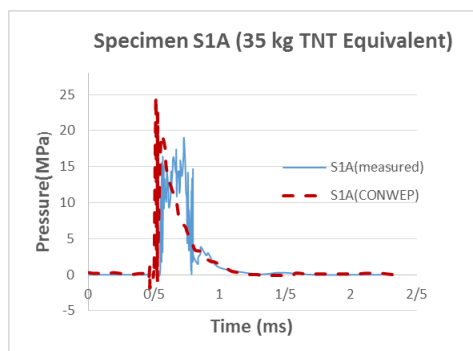
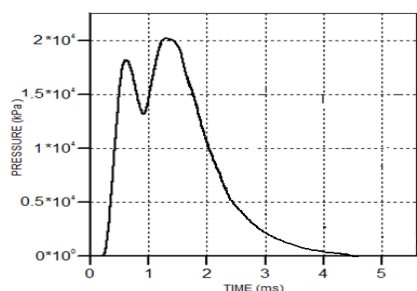
۳. راستی‌آزمایی

به منظور راستی‌آزمایی مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار AUTODYN، نمونه‌های آزمایشگاهی گزارش [۱۴] با مشخصات هندسی درج‌شده در جدول (۳) و شکل (۷)، تحلیل عددی گردیده‌اند.

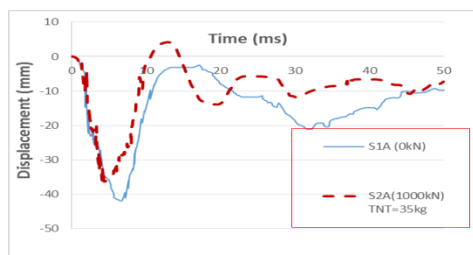
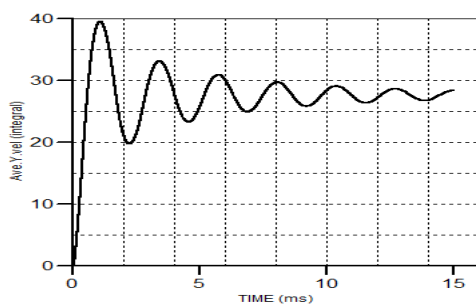
در آزمایش انجام‌شده توسط ژانگ از جک برای وارد آوردن نیروی محوری در یک انتهای ستون استفاده شد. همچنین در این انتها به منظور آزادسازی جابجایی در امتداد طول ستون از غلتک استفاده گردید. مقاومت تسلیم ورق‌های فولادی 360 (MPa) و مقاومت نهایی آن 515 (Mpa) است. برای ثبت تغییر مکان از ۳ گیج جابجایی (LVDT) به فاصله ۳۸۰ میلی‌متر از یکدیگر استفاده شد. برای ثبت تاریخچه فشار ناشی از انفجار TNT که به فاصله ۱/۵ متری از ستون قرار داشت از مبدل‌های فشار به فاصله ۷۶۰ میلی‌متر از مرکز نمونه استفاده گردید.

جدول ۳. مشخصات نمونه‌های ستون

ابعاد مقطع بتنی (میلی‌متر)	۲۰۰×۲۰۰
ارتفاع آزاد ستون (میلی‌متر)	۲۵۰۰
ابعاد ورق فولادی خارجی (میلی‌متر)	۲۱۰×۵
ابعاد ورق فولادی داخلی (میلی‌متر)	۱۰۰×۵
وزن TNT (کیلوگرم)	۳۵



شکل ۸. مقایسه تاریخچه فشار ناشی از انفجار - مدل تحلیلی بدون بار محوری (بالا) و مدل آزمایشگاهی (پایین)



شکل ۹. مقایسه تغییر مکان ستون - مدل تحلیلی بدون بار محوری (بالا) و مدل آزمایشگاهی (پایین)

جدول ۴. مقایسه حداکثر فشار مدل عددی و آزمایشگاهی (مگاپاسکال)

مدل آزمایشگاهی	مدل عددی	درصد خطا
۱۸/۷	۲۰	۶/۹

جدول ۵. مقایسه حداکثر تغییر مکان مدل عددی و آزمایشگاهی (میلی‌متر)

مدل آزمایشگاهی	مدل عددی	درصد خطا
۳۹/۵	۴۱	۳/۷



شکل ۷. مقطع عرضی ستون CFDST

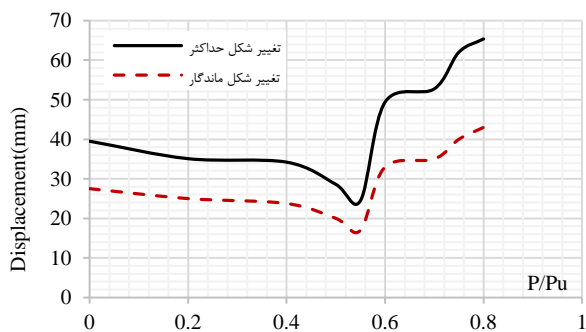
پس از مدل‌سازی هندسه و ماده نمونه‌ها در نرم‌افزار، بار انفجار به آن اعمال و تحلیل انجام می‌شود. شکل‌های (۸) و (۹) مقایسه تاریخچه زمانی فشار و جابجایی جانبی ستون که از تحلیل عددی در نرم‌افزار به دست آمده است با نتایج حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد. در جدول‌های (۴) و (۵) نتایج مدل عددی با نتایج آزمایش مقایسه و میزان خطای مدل عددی آورده شده است.

۴. نتایج و بحث

برشی افزوده بر اثر کاهش سختی غلبه دارد و لذا تغییر شکل ستون از حالت بدون بار محوری کمتر است. اما به تدریج با افزوده شدن بار محوری، تأثیر کاهش سختی بر افزایش مقاومت برشی غلبه کرده و ستون تحت بار انفجاری ثابت، تغییر شکل بیشتری از خود نشان می‌دهد. بدیهی است بررسی تحلیلی این پدیده که مبتنی بر روابط حاکم بر پایداری سازه‌ها است خارج از موضوع این مقاله است.

جدول ۶. تغییر شکل ستون برای سطوح مختلف بار محوری

P/P _u	جابجایی جانبی (mm)	
	مماندار	حداکثر
۰	۲۷/۵	۳۹/۵
۰/۲	۲۵	۳۵/۰۹
۰/۴	۲۳/۷۵	۳۴/۲۱
۰/۵	۲۰	۲۸/۶
۰/۵۵	۱۷	۲۴/۴۸
۰/۶	۳۳	۴۹/۴
۰/۷	۳۵	۵۲/۷۵
۰/۷۵	۴۰	۶۲/۰۳
۰/۸	۴۳	۶۵/۳۷

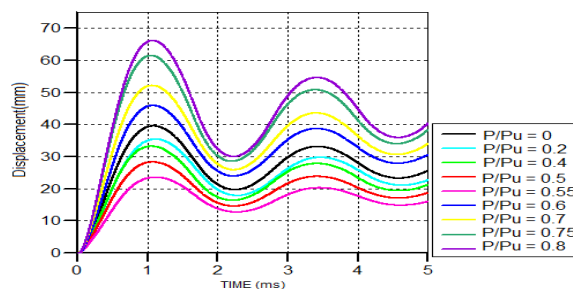


شکل ۱۱. تغییر شکل حداکثر و ماندگار برای سطوح مختلف بار محوری

در این بخش اثر دو پارامتر "بار محوری" و "ضخامت صفحات فولادی" بر تغییر شکل جانبی ستون تحت بار انفجار بررسی می‌گردد.

۴-۱. بررسی اثر بار محوری بر تغییر شکل جانبی ستون

شکل (۹) تغییر شکل جانبی ستون CFDST با مشخصات داده‌شده در جدول (۳) را تحت بار انفجار ۳۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۱/۵ متری از وسط ستون در غیاب بار محوری نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود حداکثر تغییر شکل در اولین ارتعاش به مقدار ۳۹/۵ میلی‌متر ایجاد می‌شود، و با پایان یافتن موج انفجار، ارتعاش ستون به تدریج حذف و تغییر شکل به مقدار ۲۷/۵ میلی‌متر در ستون ماندگار خواهد شد. تغییر شکل جانبی ستون فوق تحت همان بار انفجار (۳۵ کیلوگرم TNT) تحت بارهای مختلف محوری در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقادیر بار محوری نسبتی از ظرفیت نهایی ستون (مطابق با مرجع آزمایشی برابر با ۵۰۰۰ کیلو نیوتن) در نظر گرفته شده است. مقادیر حداکثر جابجایی و نیز تغییر شکل ماندگار به‌ازای نسبت بار محوری به ظرفیت محوری از ۰ تا ۰/۸ در جدول (۶) ارائه شده است.



شکل ۱۰. مقایسه تغییر شکل ستون برای سطوح مختلف بار محوری

برای ارزیابی آسیب ستون می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۸]:

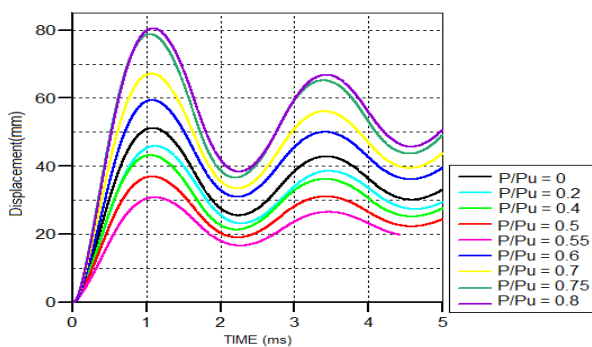
$$DI = 1 - \frac{D_p}{D_{max}}$$

در این رابطه D_p تغییر شکل ماندگار، D_{max} حداکثر تغییر شکل تحت بار وارده و DI شاخص آسیب است. DI معادل ۱ معرف ایجاد نشدن تغییر شکل پلاستیک و عدم آسیب عضو است. با افزایش آسیب در المان سازه‌ای، تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد و به تدریج تفاوت آن با تغییر شکل حداکثر تقلیل می‌یابد. میل کردن DI به صفر معرف ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ و آسیب شدید خواهد بود.

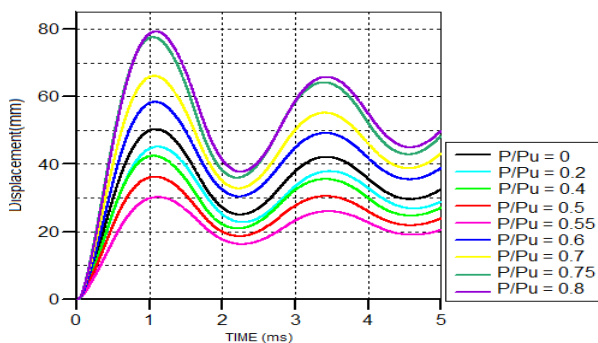
تغییرات جابجایی جانبی ستون به ازای بارهای محوری متفاوت در شکل (۱۱) ترسیم شده است. شکل (۱۱) و جدول (۶) نشان می‌دهند جابجایی جانبی ستون با افزایش بار محوری اعمالی بر ستون تا نسبت $\frac{P}{P_u} = 0.55$ ، کاهش می‌یابد ولی با گذر بار محوری از نسبت فوق، تغییر شکل ستون به شدت افزایش خواهد یافت. با توجه به اینکه نیروی محوری فشاری از طرفی موجب افزایش مقاومت برشی مقطع [۱۶] و از طرف دیگر سبب کاهش سختی جانبی عضو سازه‌ای می‌شود و این کاهش سختی در نسبت‌های P/P_{Cr} بیش از ۰/۴ مشهود است [۱۷]، پدیده فوق با توضیح زیر قابل توجیه است. در بار محوری کم، اثر مقاومت

مقدار تغییر مکان ستون در دو حالت ذکرشده برای سطوح مختلف بار محوری (نسبت بار محوری به ظرفیت محوری ستون برابر با ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۵۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸) در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. مقادیر حداکثر تغییر مکان جانبی ستون‌ها با ضخامت فولاد و بار محوری متفاوت، در جدول (۸) ارائه شده است.

مقادیر ارائه شده در جدول (۸) نشان می‌دهد تغییر ضخامت صفحات فولادی مشروط بر اینکه وزن کل فولاد مصرفی تغییر نکند، تأثیر محسوسی در رفتار ستون‌های CFDST نداشته است. به‌طوری‌که در همه این حالات افزودن به بار محوری تا $P/P_u=0.55$ موجب کاهش تغییر مکان جانبی و پس از آن موجب افزایش تغییر شکل خواهد شد. همچنین این جدول نشان می‌دهد استفاده از صفحاتی با ضخامت برابر در مقطع فولادی داخلی و خارجی ستون به کمترین مقدار تغییر شکل منجر خواهد شد.



شکل ۱۳. مقایسه تغییر شکل ستون برای سطوح مختلف بار محوری در حالت اول



شکل ۱۴. مقایسه تغییر شکل ستون برای سطوح مختلف بار محوری در حالت دوم

در جدول (۹) تغییر شکل ماندگار سه ستون مورد مطالعه آورده شده است. مقادیر این جدول نشان می‌دهد با تغییر ضخامت ورق‌های تقویتی در هر دو حالت (کاهش ضخامت ورق خارجی، افزایش ضخامت ورق داخلی و یا افزایش ضخامت ورق خارجی،

در شکل (۱۲) تغییرات شاخص آسیب ستون ناشی از بار انفجاری ثابت به ازای نسبت‌های مختلف بار محوری مشاهده می‌شود. با اعمال بار محوری بر سازه و افزایش آن تا حدود ۰/۲ ظرفیت محوری ستون، شاخص آسیب ناشی از موج انفجار روندی کاهشی دارد. با افزایش نسبت P / P_u ، روند منحنی شاخص آسیب صعودی می‌شود و در نسبت ۰/۵۵ معادل آسیب عضو بدون بار محوری است. پس از آن بر شیب نمودار شاخص آسیب افزوده خواهد شد. لازم به ذکر است در اکثر ساختمان‌ها در شرایط متعارف بهره‌برداری، بار محوری ستون به‌ندرت از پنجاه درصد ظرفیت محوری آن تجاوز می‌کند، لذا در آن‌ها نیروی محوری اثری کاهنده بر تغییر شکل جانبی دارد.

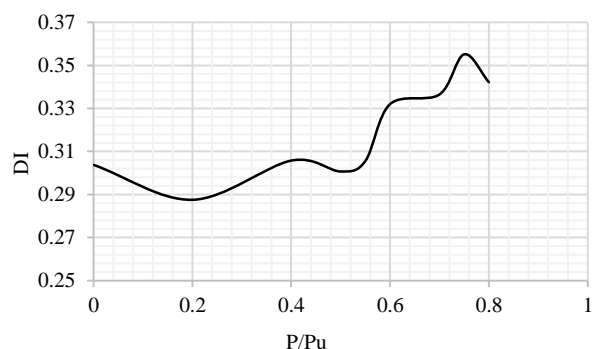
۲-۴. بررسی ضخامت صفحات فولادی تقویتی داخلی و خارجی

به منظور بررسی تأثیر ضخامت صفحات تقویتی، دو حالت زیر در نظر گرفته شد:

حالت اول: افزایش ضخامت ورق فولادی داخلی و کاهش ضخامت ورق فولادی خارجی.

حالت دوم: کاهش ضخامت ورق فولادی داخلی و افزایش ضخامت ورق فولادی خارجی.

تغییر ضخامت ورق‌ها در دو حالت فوق به گونه‌ای است که مقدار فولاد مصرفی نسبت به حالت اولیه تقریباً یکسان باشد. با توجه به ابعاد ورق‌های تقویتی، ضخامت آن‌ها مطابق جدول (۷) در نظر گرفته شد:

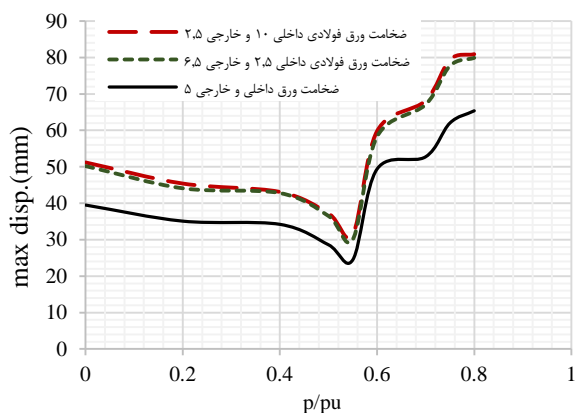


شکل ۱۲. شاخص آسیب ستون برای سطوح مختلف بار محوری

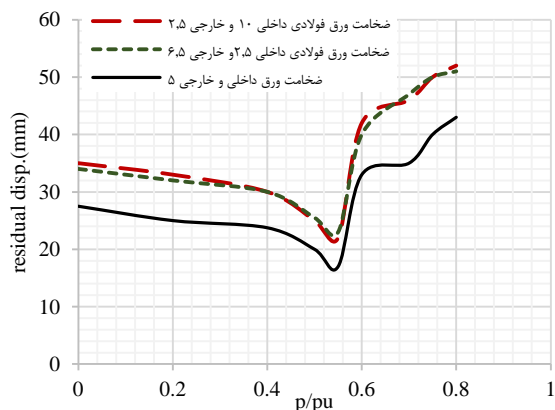
جدول ۷. ضخامت ستون در حالت اول و دوم

ضخامت ورق داخلی (میلی‌متر)	ضخامت ورق خارجی (میلی‌متر)	ضخامت حالت
۱۰	۲/۵	حالت اول
۲/۵	۶/۵	حالت دوم

موج انفجار می‌شود و بارهای محوری بزرگ‌تر، تغییر شکل را با شیب تندتری افزایش می‌دهد.

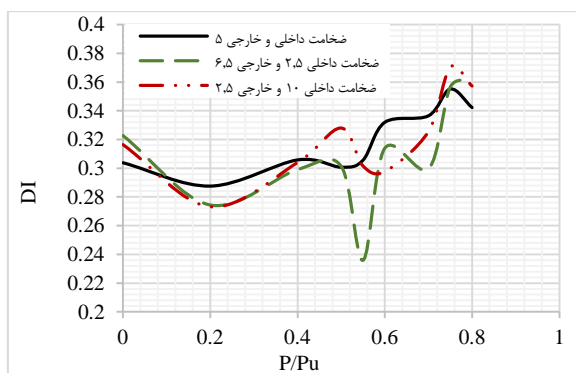


شکل ۱۵. حداکثر تغییر مکان ستون در سه حالت برحسب سطوح مختلف بار محوری



شکل ۱۶. تغییر شکل ماندگار ستون در سه حالت برای سطوح مختلف بار محوری

شکل (۱۷) مقادیر شاخص آسیب در حالات سه‌گانه مقطع ستون را نشان می‌دهد. اثر تغییر ضخامت پوشش فولاد جز در برخی از نسبت‌های P/P_u در راستای کاهش آسیب است.



شکل ۱۷. شاخص آسیب ستون در سه حالت برای سطوح مختلف بار محوری

کاهش ضخامت ورق داخلی) تغییر مکان و نیز تغییر شکل ماندگار ستون افزایش یافته است. در حالت اول که ضخامت ورق خارجی کاهش و ورق داخلی افزایش یافته است، افزایش تغییر مکان بیشتر است.

جدول ۸. تغییر مکان حداکثر ستون در سه حالت

P/P _u	تغییر مکان حداکثر (میلی‌متر)		
	ضخامت ورق فولادی داخلی و خارجی (mm) ۱۰ و ۲/۵	ضخامت ورق فولادی داخلی و خارجی (mm) ۲/۵ و ۶/۵	ضخامت ورق فولادی داخلی و خارجی (mm) ۵
۰	۵۲/۲	۵۰/۲	۳۹/۵
۰/۲	۴۵/۴	۴۴/۱	۳۵/۰۹
۰/۴	۴۳/۱	۴۲/۲	۳۴/۲۱
۰/۵	۳۷/۲	۳۶/۵	۲۸/۶
۰/۵۵	۳۱/۵	۳۰/۱	۲۴/۴۸
۰/۶	۵۹/۸	۵۸/۳	۴۹/۴
۰/۷	۶۸/۲	۶۷/۱	۵۲/۷۵
۰/۷۵	۷۹/۴	۷۷/۷	۶۲/۰۳
۰/۸	۸۰/۹	۷۹/۹	۶۵/۳۷

جدول ۹. تغییر شکل ماندگار ستون در سه حالت

P/P _u	تغییر شکل ماندگار (میلی‌متر)		
	ضخامت ورق فولادی داخلی و خارجی (mm) ۱۰ و ۲/۵	ضخامت ورق فولادی داخلی و خارجی (mm) ۲/۵ و ۶/۵	ضخامت ورق فولادی داخلی و خارجی (mm) ۵
۰	۳۵	۳۴	۲۷/۵
۰/۲	۳۳	۳۲	۲۵
۰/۴	۳۰	۳۰	۲۳/۷۵
۰/۵	۲۵	۲۵/۵	۲۰
۰/۵۵	۲۲	۲۳	۱۷
۰/۶	۴۲	۴۰	۳۳
۰/۷	۴۶	۴۷	۳۵
۰/۷۵	۵۰	۵۰	۴۰
۰/۸	۵۲	۵۱	۴۳

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) حداکثر تغییر مکان و تغییر شکل ماندگار ستون‌ها در سه حالت ذکر شده برحسب سطوح مختلف بار محوری نشان داده شده است. نسبت بار محوری $P/P_u = 0.55$ همچنان مرز تغییر رفتار ستون تحت بار انفجار است به طوری که بارهای محوری کمتر، موجب کاهش تغییر مکان جانبی ناشی از

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر نیروی محوری بر تغییر شکل ستون‌های بتنی با پوشش‌های فولادی داخلی و خارجی (CFDST) تحت نیروی جانبی انفجار پرداخته شد. به این منظور چند نمونه ستون با مقطع مربع شکل و صفحات فولادی تقویت‌کننده بیرونی و داخلی به ضخامت‌های متفاوت زیر بارهای محوری مختلف در معرض انفجار ثابت قرار گرفتند و تغییر شکل جانبی و شاخص آسیب نمونه‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار DYN AUTO مطالعه و بررسی شده‌اند. به‌منظور اعمال بارگذاری انفجار، ماده منفجره از نوع TNT و با وزن ۳۵ کیلوگرم با فاصله ۱۵۰۰ میلی‌متر در راستای وسط ارتفاع ستون مدل‌سازی شده است. نتایج تحقیق نشان داد که وجود نیروی محوری در ستون تأثیر متفاوتی بر رفتار آن دارد. نتایج این مطالعه نشان داد تا زمانی که بار محوری اعمالی به ۰/۶ ظرفیت محوری ستون نرسیده باشد، حداکثر تغییر مکان ستون و تغییر مکان ماندگار آن ناشی از بار انفجار نسبت به حالتی که بار محوری وجود ندارد کاهش می‌یابد. با گذر بار محوری اعمالی از ۰/۶ ظرفیت محوری ستون، حداکثر تغییر مکان ستون و تغییر مکان ماندگار آن ناشی از بار انفجار نسبت به حالت بدون بار محوری افزایش می‌یابد. در حالتی که ضخامت ورق‌های فولادی پوششی داخلی و بیرونی یکسان بوده‌اند تغییر مکان جانبی ستون نسبت به دو حالت "کاهش ضخامت ورق خارجی- افزایش ضخامت ورق داخلی" و "افزایش ضخامت ورق خارجی- کاهش ضخامت ورق داخلی" کمتر است (در همه این حالات وزن فولاد مصرفی یکسان است). البته در حالت افزایش ضخامت ورق فولادی خارجی و کاهش ضخامت ورق داخلی، افزایش تغییر مکان محسوس‌تر است. با اعمال بار محوری و افزایش آن تا حدود ۰/۲ ظرفیت محوری ستون، شاخص آسیب ناشی از موج انفجار روندی کاهشی دارد. با افزایش نسبت P/P_u ، روند منحنی شاخص آسیب صعودی می‌شود و در نسبت ۰/۵۵ معادل آسیب عضو بدون بار محوری است. پس از آن بر شیب نمودار شاخص آسیب افزوده شد. با توجه به این‌که در اکثر ساختمان‌ها در شرایط متعارف بهره‌برداری، بار محوری ستون به‌ندرت از ۰/۵۰ ظرفیت محوری آن تجاوز می‌کند، نیروی محوری اثری کاهنده بر تغییر شکل جانبی و مقدار آسیب دارد. تغییر ضخامت ورق‌های پوششی فولادی تأثیری در مقادیر نسبت بار محوری به ظرفیت ستون که در آن، مقادیر (۰/۳ و ۰/۶) تفاوت رفتار تغییر مکانی و شاخص آسیب‌دیده شده است نداشته است.

۶. مراجع‌ها

- [1] Deng, Y.; Tuan, C. Y.; Xiao, Y. "Flexural Behavior of Concrete-Filled Circular Steel Tubes under High-Strain Rate Impact Loading"; J. Struct. Eng. 2011, 138, 449-456.
- [2] Yousuf, M.; Uy, B.; Tao, Z.; Remennikov, A.; Liew, J. Y. R. "Transverse Impact Resistance of Hollow and Concrete Filled Stainless Steel Columns"; J. Constr. Steel Res. 2013, 82, 177-189.
- [3] Elchalakani, M.; Zhao, X. L.; Grzebieta, R. "Concrete-Filled Circular Steel Tubes Subjected to Pure Bending"; J. Constr. Steel Res. 2001, 57, 1141-1168.
- [4] Prichard, S. J.; Perry, S. H. "The Impact Behavior of Sleeved Concrete Cylinders"; Struct. Eng. 2000, 78, 23-27.
- [5] Han, L. H.; Hou, C. C.; Zhao, X. L.; Rasmussen, K. "Behavior of High-Strength Concrete Filled Steel Tubes Under Transverse Impact Loading"; J. Constr. Steel Res. 2014, 92, 25-39.
- [6] Ren, Q. X.; Han, L. H.; Lam, D.; Li, W. "Tests on Elliptical Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Beams and Columns"; J. Constr. Steel Res. 2014, 99, 149-160.
- [7] Alam, M. I.; Fawzia, S.; Zhao, X. L.; Remennikov, A. M. "Experimental Study on FRP-Strengthened Steel Tubular Members under Lateral Impact"; J. Compos. Constr. 2017, 21, 04017022.
- [8] Zhang, F. "Numerical Simulation of Concrete Filled Steel Tube Columns against Blast Loads"; Thin Wall Struct. 2015, 92, 82-92.
- [9] Wang, R.; Han, L. H.; Hou, C. C. "Behavior of Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Members under Lateral Impact: Experiment and FEA Model"; J. Constr. Steel Res. 2013, 80, 188-201.
- [10] Eisa, A. S. "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Columns under Different Range of Blast Loads"; Int. J. Civ. Struct. Eng. Res. 2014, 5, 155-164.
- [11] Malachowski, J.; Mazurkiewicz, L.; Klasztorny, M.; Koodziejczyk, D.; Damaziak, K.; Baranowski, P. "Load Carrying Capacity Numerical Study of I-Beam Pillar Structure with Blast Protective Panel"; B. Pol. Acad. Sci-Tech. 2013, 61, 451-457.
- [12] Izadifard, R.; Hajikarimian, H. "The Effect of the Explosion during Fire on Steel Column Using Dynamic Explicit Method"; Adv. Def. Sci. & Technol. 2018, 9, 141-150 (In Persian).
- [13] Wu, K. C.; Li, B.; Tsai, K. C. "The Effects of Explosive Mass Ratio on Residual Compressive Capacity of Contact Blast Damaged Composite Columns"; J. Constr. Steel Res. 2011, 67, 602-612.
- [14] Zhang, F.; Wu, C.; Zhao, X. L.; Xiang, H.; Li, Z. X.; Fang, Q.; Liu, Z.; Zhang, Y.; Heidarpour, A.; Pacher, J. A. "Experimental Study of CFDST Columns Infilled with UHPC Under Close-Range Blast Loading"; Int. J. Impact Eng. 2016, 93, 184-195.
- [15] Century Dynamics, "AUTODYN Training Course Manual, Release 11.0"; Century Dynamics, Concord: California, 2007.
- [16] Code, A. C. I. "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary"; American Concrete Institute: Michigan, 2011.
- [17] Simitse, G. J.; Hodges, D. M. "Fundamentals of Structural Stability"; Butterworth-Heinemann, 2006.
- [18] Williams, M. S.; Sexsmith, R. G. "Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review"; Earthq. Spectra 1995, 11, 319-349.