



بررسی آزمایشگاهی شکل پذیری ستون های فولادی پر شده با بتن (CFST)

طالب مرادی شقاقی^۱، فریبرز ناطقی الهی^۲

چکیده

دیوارهای برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی دارای توانایی بالایی در میرایی انرژی زلزله ستون های فولادی پر شده با بتن CFST نوعی از ستون های مرکب می باشند، که به دلیل مزایای فراوانی که نسبت به ستون های بتن آرمه و فولادی دارند استفاده از آنها مخصوصاً در ساختمان های بلند در سال های اخیر رواج زیادی پیدا کرده است. از جمله این مزایا میتوان به سادگی نصب و اجرا، مسائل اقتصادی، حذف هزینه های قالب بندی، عملکرد خوب در مقابل نیروهای لرزه ای، مقاومت بیشتر با حجم کمتر و شکل پذیری بالا اشاره نمود. پارامترهای موثر در ظرفیت باربری ستون های CFST و همچنین شکل پذیری این ستونها، شامل چسبندگی بین جدار فولادی و هسته بتنی، کماتش موضعی جدار فولادی، نسبت بعد مقطع به ضخامت جدار فولادی (D/t)، نسبت طول به بعد مقطع (L/D) و شکل مقطع عرضی می باشند. در این تحقیق اثر تعدادی از پارامترهای مؤثر در رفتار ستون های CFST به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می گیرند. در بررسی آزمایشگاهی این ستون ها ۱۲ نمونه ستون با مقیاس حدود ۱/۳ ساخته شده و در آزمایشگاه تحت بار محوری فشاری برابر با $0.2 Pu$ توام با بار جانبی متناوب افزایش یابنده تا انهدام کامل ستون قرار می گیرند و منحنی های رفتاری نمونه ها ترسیم شده و مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرند. از لحاظ شکل مقطع عرضی، سه شکل دایره، مربع و هشت ضلعی در نظر گرفته شده است تا شکل بهینه از لحاظ رفتار تحت بارهای متناوب مشخص گردد. در تعدادی از نمونه ها ورق های سخت کننده در داخل ستون تعبیه شده است تا اثرات آنها در رفتار این نوع ستون ها بررسی شود.

کلمات کلیدی:

ستون های فولادی پر شده با بتن، جدار فولادی، ورق های سخت کننده، ضریب فشردگی مقطع، شکل پذیری

Experimental Study of Concrete Filled Steel Tube Columns Ductility (CFST)

Taleb Moradi Shaghghi, Fariborz Nateghi – A

ABSTRACT

Concrete filled steel tube columns (CFST) are a kind of composite columns according to advantages of CFST relative to reinforced concrete and steel columns. Use of these materials is common in recent years especially in high buildings, unnecessary of moulding, high ductility, proportionate resistance with low volume, economical, low deformation relative to steel columns are among advantages. In these columns, development of full load bearing capacity depends on, bond strength between steel and concrete, local buckling of steel encasing, ratio of side dimension of the column to steel thickness, D/t , length to dimension ratio, L/D and finally the shape of column.

In this paper, effective parameters on CFST columns behavior are investigated experimentally by testing specimens in laboratory. For this experimentally research, twelve specimens loaded axially with enhancing cyclic lateral load. The results of experimental investigation are compared with regulation relations and proposal analytical relation of some of the researchers.

Key words:

Concrete Filled Steel Tube Columns (CFST), Steel Tube, Section Coefficient of Compressibility, Steel Stiffener, Ductility

۱. استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ta.moradi@yahoo.com

۲. استاد پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله Nateghi@iiees.ac.ir



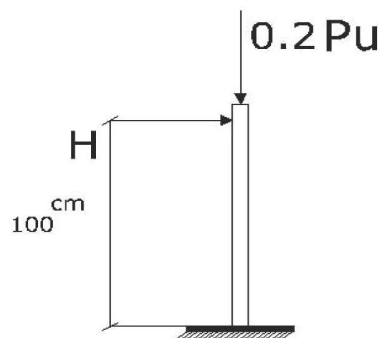
شکل (۲): تصویر تعدادی از نمونه‌های آزمایش

برای بررسی رفتار ستون‌های CFST، دوازده نمونه ستون با اشل حدود ۱/۳ ساخته شده و در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تحت نیروی فشاری توام با نیروی جانبی متناوب افزایش یابنده مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف از آزمایشات بررسی اثر نسبت بعد مقطع به ضخامت جداره فولادی (D/t) و نسبت طول نمونه به بعد مقطع ستون (L/D) و شکل مقطع عرضی ستون در رفتار و شکل پذیری ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFST) می‌باشد.

در آزمایش این دوازده نمونه از Actuator با ظرفیت پانصد کیلونیوتن برای اعمال بار محوری و از Actuator دویست و پنجاه کیلو نیوتنی برای وارد کردن بار جانبی در انتهای ستون بصورت اعمال تغییر مکان جانبی استفاده گردید [۱].

۲- مدل نمونه‌های تحت آزمایش

مدل نمونه‌های تحت بار محوری توام با بار جانبی بصورت شکل (۱) می‌باشد. این نمونه‌ها به صورت یک سر گیردار مدل شده و در انتهای آزاد تحت بار محوری تا حدود $0.2 Pu$ ، توام با بار جانبی افزایش یابنده به صورت اعمال تغییر مکان جانبی (Displacement control) و بصورت رفت و برگشتی قرار گرفتند [۲]. تصویر تعدادی از نمونه‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): مدل نمونه‌های CFST

۳- مشخصات مصالح نمونه‌ها

۳-۱- مشخصات فولاد جداره نمونه‌ها

فولادهای مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه تحت کشش مورد آزمایش قرار گرفتند. مشخصات کلی فولاد نمونه‌ها بر اساس آزمایشات در جدول (۱) ارائه شده است [۳ و ۱۳].

۳-۲- مشخصات بتن مصرفی در نمونه‌ها

با توجه به اینکه نمونه‌های مورد آزمایش کوچکتر از مقادیر واقعی و با مقیاس حدود ۱/۳ می‌باشند. لذا مواد نمونه‌های ستون با مواد ستون‌های واقعی مقداری فرق خواهد داشت. دانه‌بندی مواد دانه‌ای در نمونه‌های با دانه‌بندی مواد دانه‌ای در اشل واقعی ستون‌ها متفاوت خواهد بود. در نمونه‌های مورد آزمایش با توجه به

$$f'_c = 25 \text{ MPa} = 3640 \text{ psi}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.003$$

$$E_c = 5000\sqrt{25\text{MPa}} = 3.64 \times 10^6 \text{ psi}$$

و با استفاده از منحنی‌های موجود در فصل 4.8 مرجع [۱۳] نسبت وزنی مواد تشکیل دهنده بتن را بصورت ۱:۴:۵/۵ ($W/C, C, Agg$) می‌توان به دست آورد.

دانه‌ها بایستی از الک نمره ۶ عبور کنند و مقدار عبور از الک نمره ۱۰۰ حداکثر ۱۰ درصد باشد. نمونه‌های بتن در قالب‌های استوانه‌ای و مکعبی در حین بتن‌ریزی نمونه‌ها برداشته شده و در روز آزمایش نمونه‌ها، مورد آزمایش قرار

گرفته‌اند، که مشخصات آنها به صورت جدول (۲) می‌باشد. سیمان مورد استفاده در ساختن بتن، سیمان نوع یک کارخانه آبیگ و آب مصرفی در ساخت نمونه‌ها، آب آشامیدنی بوده است.

۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشی

نمونه‌های آزمایشی ستون‌های CFST شامل ۱۲ نمونه بوده که شکل مقاطع نمونه‌ها دایره (C)، مربع (S) و هشت ضلعی (O) انتخاب شده‌اند. تا شکل مقطع بهینه از نتایج آزمایشات استخراج گردد. مشخصات نمونه‌ها در جدول (۳) آمده است.

شکل (۳)، شکل مقطع عرضی نمونه‌های بدون ورق‌های سخت‌کننده و شکل ۴، شکل مقطع عرضی نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده را نشان می‌دهند. در جدول (۳)، ظرفیت فشاری خالص نهایی نمونه‌ها (P_u) از رابطه آیین‌نامه ACI محاسبه شده است

$$P_u = A_g F_y + 0.85 A_c f'_c \quad (۴ و ۵)$$

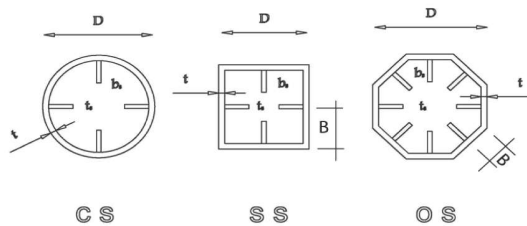
نمونه‌های C3, S3, O2, O3 بدون ورق‌های سخت‌کننده و

نمونه‌های C3S, S2S, O2S, O4S با ورق‌های سخت‌کننده در سرتاسر طول ستون و نمونه‌های C3N, O2SN, O3SN, S3SN ناحیه بحرانی ستون (۳۰ سانتیمتر پائین ستون) می‌باشند.

۵- دستگاه آزمایش و نحوه اعمال بارها

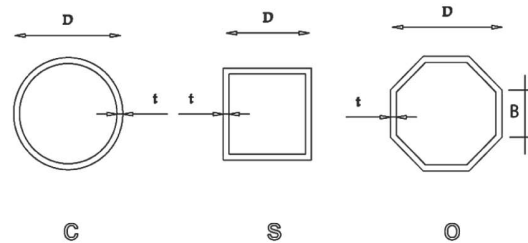
در آزمایش نمونه‌ها، بار محوری توسط Actuator با ظرفیت 500KN و بار جانبی در انتهای نمونه توسط Actuator با ظرفیت 250KN با اعمال تغییر مکان جانبی وارد گردید (Displacement control). شکل (۵) منحنی اعمال تغییر مکان در انتهای ستون را نشان می‌دهد [۱۱]. δ_{y0} تغییر مکان انتهای نمونه در شروع تسلیم جدار فولادی و δ_y تغییر مکان اعمال شده به انتهای ستون می‌باشد.

شکل (۶) دستگاه آزمایش و نحوه اعمال بارهای محوری و جانبی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این شکل محل کرنش سنج‌ها و تغییر مکان‌سنج‌ها نشان داده شده است. شکل (۷) یکی از نمونه‌ها را حین آزمایش نشان می‌دهد.

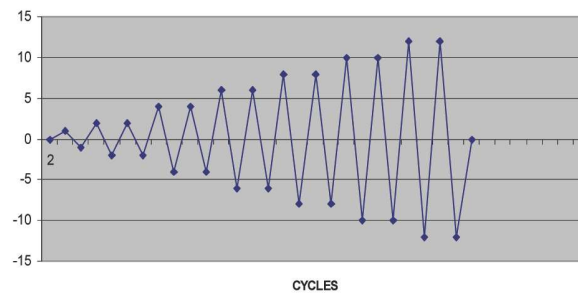


شکل (۴): مقاطع عرضی نمونه‌های با ورق‌های

$$\frac{\delta_y}{\delta_{y0}} \text{ سخت‌کننده}$$



شکل (۳): مقاطع عرضی نمونه‌های بدون ورق‌های سخت‌کننده



شکل (۵): منحنی اعمال تغییر مکان در انتهای ستون

۶- آزمایشات و منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌ها

نمونه‌های ستون CFST تحت نیروی فشار محوری و بار جانبی رفت و برگشتی در انتهای نمونه تا حد گسیختگی مورد آزمایش قرار گرفتند.

در جدول (۴) تغییر مکانهای جانبی نمونه‌ها در آزمایش‌ها و نتایج آنها ارائه شده است، در این جدول δy_0 تغییر مکان انتهای نمونه در شروع تسلیم و δy_1 تغییر مکان جانبی انتهای نمونه در شروع افت مقاومت و δy_{max} حداکثر تغییر مکان جانبی انتهای نمونه در شروع گسیختگی و μ ضریب

شکل‌پذیری انتقالی و drift نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی انتهای نمونه در شروع گسیختگی به طول نمونه و ϵ_{cu} حداکثر کرنش وارد شده به بتن با فرض تغییرات خطی کرنش در مقطع و p_u ظرفیت فشاری نهایی ستون می‌باشد. در شکل (۸) منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های بدون ورق‌های سخت‌کننده و در شکل (۹) منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده در سرتاسر طول نمونه‌ها و شکل (۱۰) منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌ها با ورق‌های سخت‌کننده در ناحیه بحرانی ستون نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات فولاد جداره نمونه‌ها

نمونه‌ها	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_y (%)	ϵ_u (%)
فولاد نمونه‌های با مقطع هشت ضلعی (O)	۳۰۷	۴۲۴	۲/۵	۲۴
فولاد نمونه‌های با مقطع مدور (C)	۳۳۳	۴۲۸	۴	۲۳
فولاد نمونه‌های با مقطع مربعی (S)	۴۰۱/۶	۴۴۵/۶	۲	۱۰

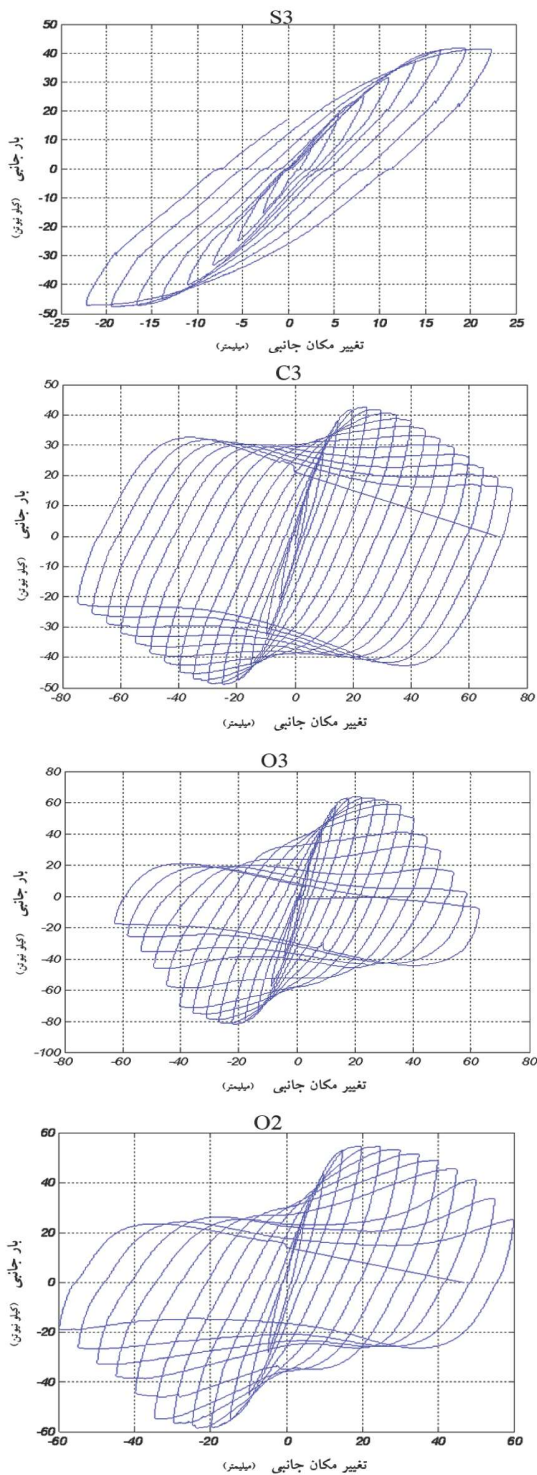
جدول (۲): مشخصات بتن نمونه‌ها

نمونه‌ها	$(KN/m^3) W_c$	f_c (MPa)
مکعبی ۱	۲۲/۵۷	۳۰/۸
مکعبی ۲	۲۲/۷۴	۲۷/۲
استوانه‌ای ۱	۲۲/۴۴	۳۰/۴
استوانه‌ای ۲	۲۱/۸۵	۲۶/۹

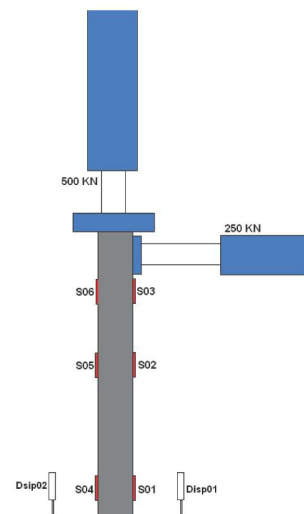
جدول (۳): مشخصات نمونه‌های CFST

نمونه‌ها	$D-B$ (mm)	t (mm)	$\frac{D}{T}$	$\frac{B}{T}$	$\frac{L}{D}$	$\frac{B_s}{ts}$	A_s (mm ²)	A_c (mm ²)	F_y (MPa)	f_c (MPa)	P_u (kn) ACI
C3	۱۶۰-۱۶۰	۴	۴۰	-	۶/۷۵	-	۱۹۵۹/۳	۱۸۱۳۶	۳۳۰	۲۸	۸۲۵/۲
S3	۱۳۸-۱۳۸	۴	۳۴/۵	-	۷/۸۲	-	۲۰۸۰	۱۶۹۰۰	۴۰۰	۲۸	۸۳۵/۶
O2	۱۴۴-۸۰	۳	۶۶/۳	۲۶/۷	۵/۴۲	-	۱۴۲۰	۳۰۴۰۲	۳۰۰	۲۸	۱۰۴۷/۷
O3	۲۰۱-۸۰	۴	۵۰/۵	۲۰	۵/۳۲	-	۲۵۶۰	۳۰۴۰۲	۳۰۰	۲۸	۱۲۱۰/۹
C3S	۱۶۰-۴۹	۴	۴۰	۱۰	۵/۳۷	۴۰/۳	۲۴۳۹/۳	۱۷۶۵۶	۳۳۰	۲۸	۹۴۰/۹۴
S2S	۱۳۶-۶۸	۳	۴۵/۳	۲۲/۶	۶/۸	۴۰/۳	۲۰۴۰	۱۶۴۲۰	۴۰۰	۲۸	۸۱۶/۸
O2S	۱۴۴-۸۰	۳	۶۶/۸	۲۶/۶	۷/۹	۴۰/۳	۲۸۸۰	۲۹۹۴۲	۳۰۰	۲۸	۱۲۷۵/۲
O4S	۱۴۴-۸۰	۳	۶۶/۸	۲۶/۶	۵/۴	۴۰/۳	۲۴۰۰	۳۰۴۲۲	۳۰۰	۲۸	۱۱۶۱/۴
C3N	۱۶۶-۴۱	۴	۴۱/۵	۱۰/۴	۶/۵	۴۰/۳	۱۴۴۰/۲	۱۹۵۹۶	۳۳۰	۲۵	۸۴۸/۷
O2SN	۱۹۹-۴۰	۳	۶۴/۴	۱۳/۳۳	۵/۵۴	۴۰/۳	۲۴۰۰	۳۰۴۰۳	۳۰۰	۲۵	۱۱۷۰/۲
O3SN	۲۱۳-۵۳	۴	۵۳/۲	۱۳/۳۳	۵/۰۷	۴۰/۳	۲۵۶۰	۳۰۴۰۳	۳۰۰	۲۵	۱۲۱۰/۹
S3SN	۱۳۰-۶۵	۴	۳۲/۵	۱۶/۲۵	۸/۳	۴۰/۳	۲۰۸۰	۱۶۹۰۰	۴۰۰	۲۵	۸۳۵/۶

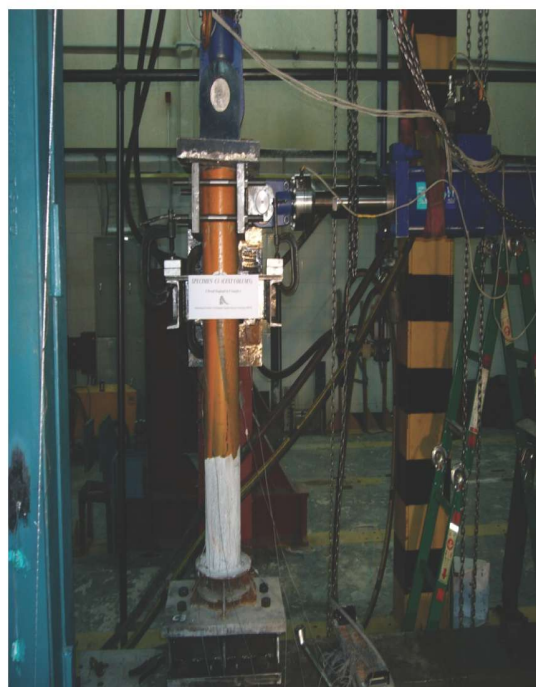
۵۰ میلیمتر در انتهای ستون استفاده گردید که توسط پین به Actuator قائم متصل می‌گردد [۱۲و۶].



شکل (۸) : منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های بدون ورق‌های سخت‌کننده

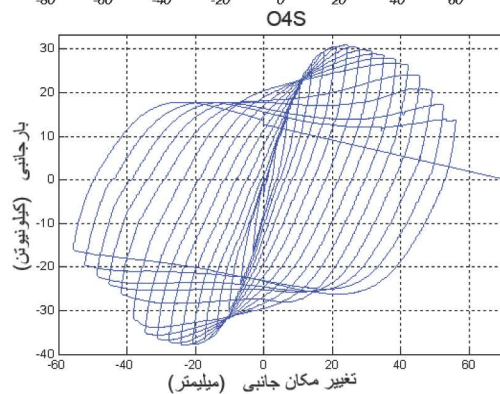
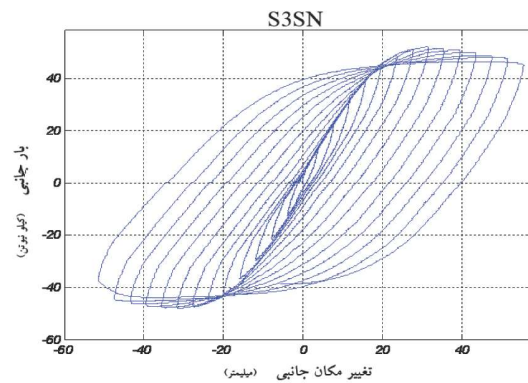
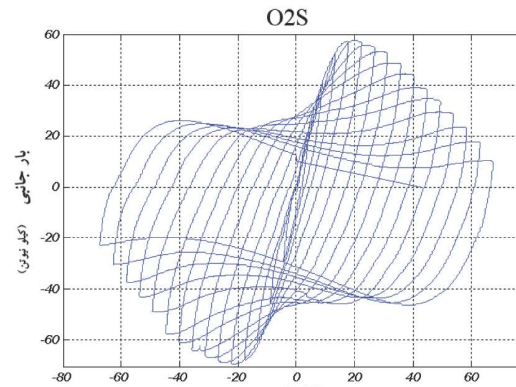
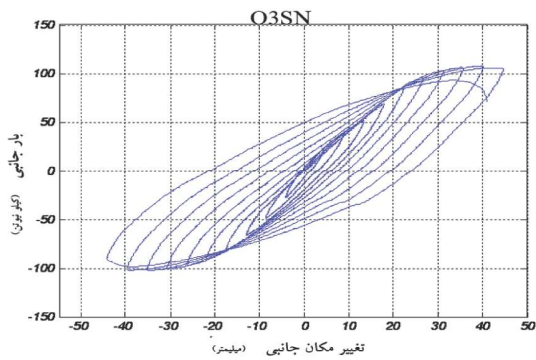
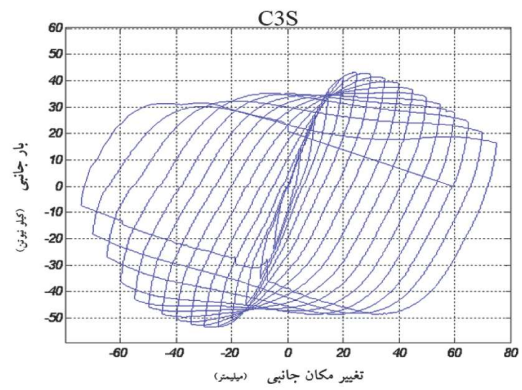
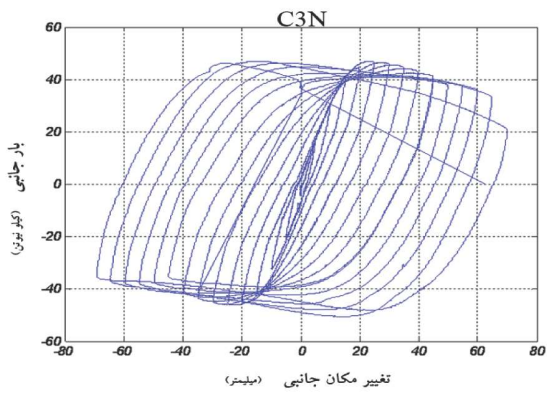
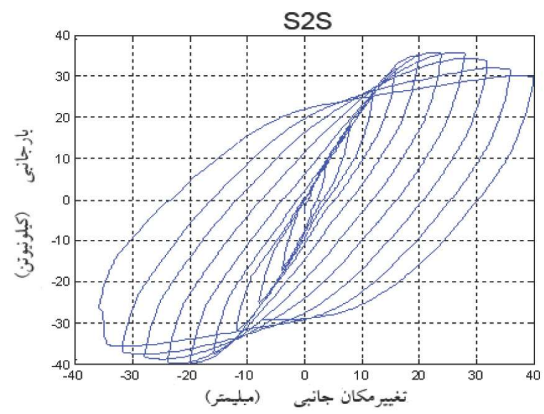
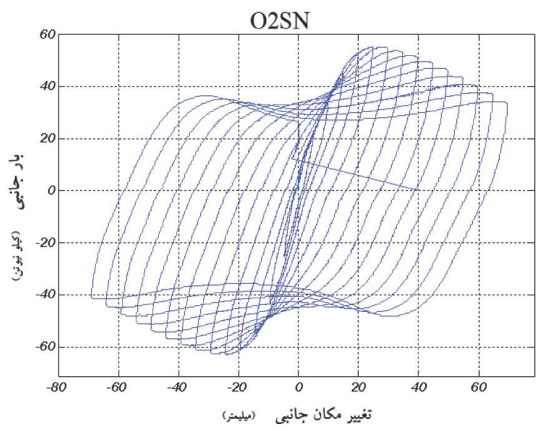


شکل (۶) : دستگاه آزمایش و نحوه اعمال بارها



شکل (۷) : دستگاه آزمایش نمونه‌های CFST

برای اعمال بار جانبی به انتهای ستون دو ورق فولادی به ضخامت ۳۰ میلیمتر در دو طرف ستون در نظر گرفته شده که توسط چهار میل مهار به همدیگر متصل می‌شوند. این ورقها توسط پین به Actuator افقی متصل شده و با اعمال تغییر مکان افقی بصورت متناوب و افزایش یابنده بار جانبی به انتهای نمونه وارد می‌شود. برای اعمال بار محوری از یک صفحه فولادی به ضخامت



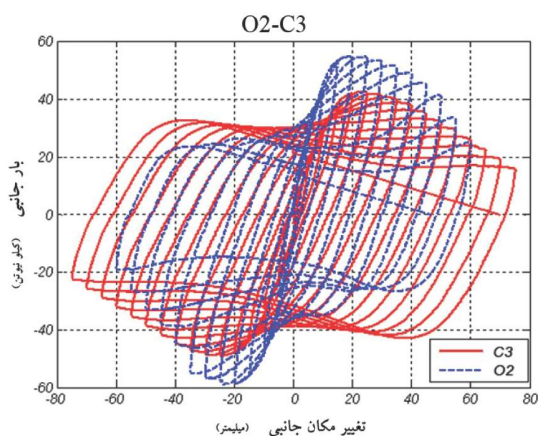
شکل (۱۰): منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده در ناحیه بحرانی نمونه‌ها

شکل (۹): منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده در سرتاسر طول نمونه

جدول (۴) : نتایج آزمایشات نمونه‌های تحت فشار توام با بار جانبی چرخه‌ای

نمونه‌ها	0.2Pu (KN)	$\delta Y0$ (mm)	$\delta Y1$ (mm)	$\delta Ymax$ (mm)	$\mu(\delta Y1/\delta Y0)$	drift	NO. cyclic	ϵ_{cu}
C3	۱۷۰	۵	۶۰	۷۵	۱۲	۰/۰۶۹	۱۵	۰/۰۲۲
S3	۱۶۰	۴	۴۴	۶۴	۱۱	۰/۰۵۹	۱۴	۰/۰۲۱
O2	۲۰۰	۵	۵۰	۷۵	۱۰	۰/۰۶۹	۱۵	۰/۰۱۸
O3	۲۴۰	۴/۵	۴۰/۵	۶۷/۵	۹	۰/۰۶۲	۱۵	۰/۰۱۹
C3S	۲۰۰	۵	۶۵	۷۰	۱۳	۰/۰۶۴۸	۱۴	۰/۰۲۱
S2S	۱۶۰	۴	۴۰	۴۸	۱۰	۰/۰۴۴	۱۲	۰/۰۲۱۵
O2S	۲۴۰	۴/۵	۵۴	۶۷/۵	۱۲	۰/۰۶۲۵	۱۵	۰/۰۰۲
O4S	۱۵۰	۳/۵	۴۲	۵۶	۱۲	۰/۰۵۱۸	۱۶	۰/۰۲۰۵
C3N	۲۰۰	۵	۶۵	۷۵	۱۳	۰/۰۶۹۴	۱۵	۰/۰۲۲
O2SN	۲۰۰	۵	۵۵	۶۵	۱۱	۰/۰۶۰۲	۱۳	۰/۰۱۹
O3SN	۲۴۰	۴/۵	۴۹/۵	۵۴	۱۱	۰/۰۰۵	۱۲	۰/۰۲۱
S3SN	۱۶۰	۴	۵۲	۶۰	۱۳	۰/۰۵۵۵	۱۵	۰/۰۰۲

جدار فولادی در ستون‌های CFST به‌طور کامل بتن داخل را دورگیر نموده مقاومت بتن و کرنش نهایی بتن را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۰ و ۹].



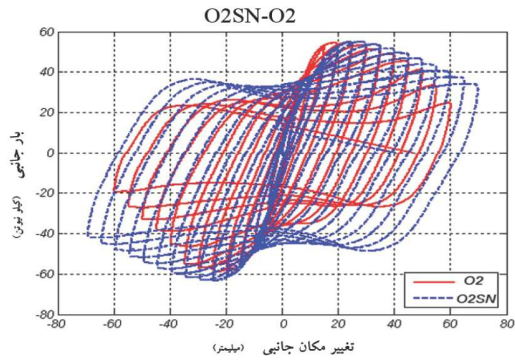
شکل (۱۱) : منحنی‌های چرخه‌ای C3, O2

۷- مقایسه منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌ها

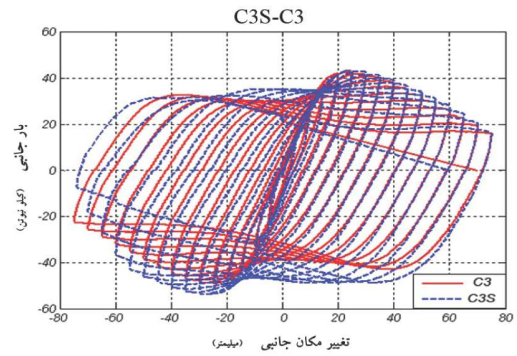
منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های بدون ورق‌های سخت‌کننده و نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده در سرتاسر طول ستون و نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده در ناحیه بحرانی ستون در شکل‌های (۱۱) الی (۱۹) با یکدیگر مقایسه شده اند تا اثر ورق‌های سخت‌کننده و همچنین اثر شکل مقطع عرضی در رفتار و شکل‌پذیری ستون‌های CFST بررسی گردد.

با مقایسه منحنی‌ها نتیجه می‌شود که شکل‌پذیری ستون‌های با مقطع دایره بیشتر از مقطع هشت ضلعی و ستون‌های با مقطع هشت ضلعی شکل‌پذیرتر از مقاطع مربعی است. وجود ورق‌های سخت‌کننده در داخل ستون‌های CFST باعث افزایش شکل‌پذیری و باعث به تعویق افتادن کماتش موضعی جدار فولادی می‌شود [۸ و ۷].

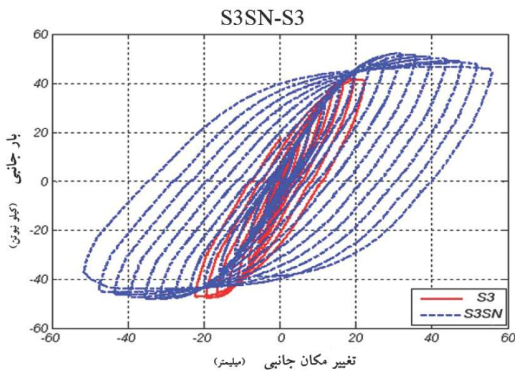
اثر وجود ورق‌های سخت‌کننده در نواحی بحرانی ستون (نواحی تحت تنش‌های حداکثر) در افزایش شکل‌پذیری بیشتر از وجود ورق‌ها در سرتاسر طول ستون می‌باشد.



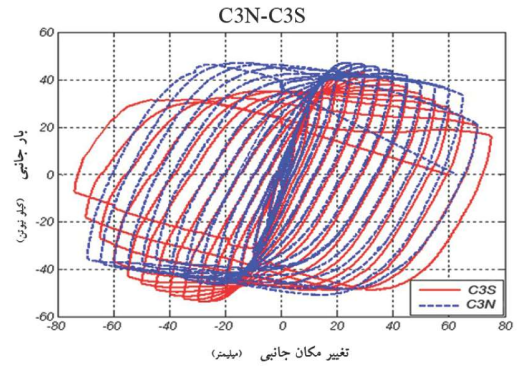
شکل (۱۶) : منحنی های چرخه‌ای O2,O2SN



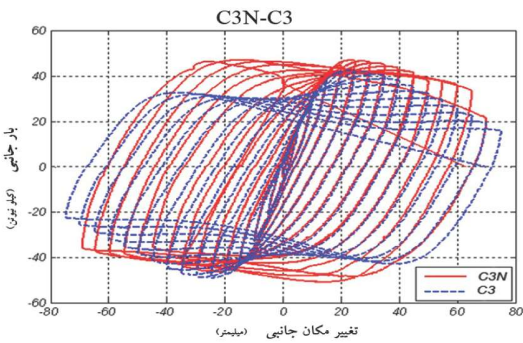
شکل (۱۲) : منحنی های چرخه‌ای C3,C3S



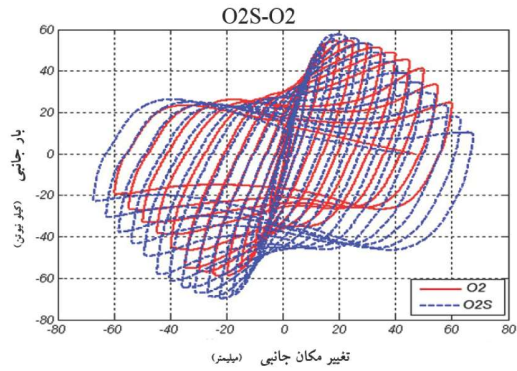
شکل (۱۷) : منحنی های چرخه‌ای S3,S3SN



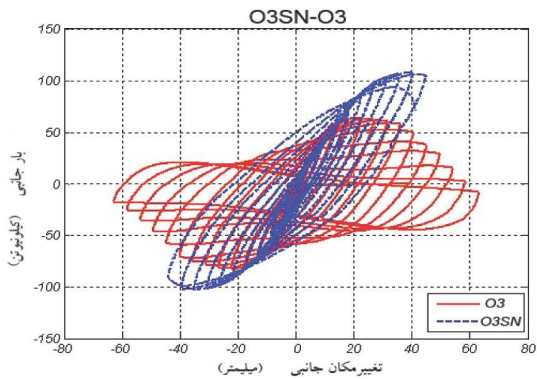
شکل (۱۳) : منحنی های چرخه‌ای C3S,C3N



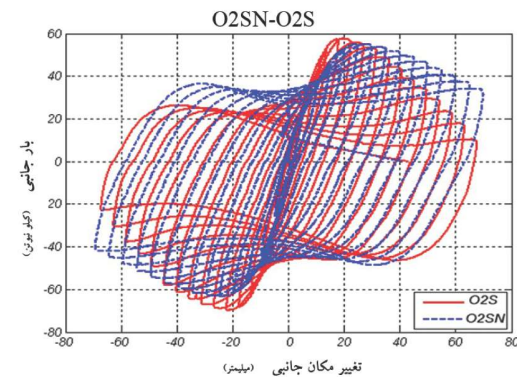
شکل (۱۸) : منحنی های چرخه‌ای C3,C3N



شکل (۱۴) : منحنی های چرخه‌ای O2,O2S



شکل (۱۹) : منحنی های چرخه‌ای O3,O3SN



شکل (۱۵) : منحنی های چرخه‌ای O2S,O2SN

۹- نتیجه گیری

۱- تعداد چرخه‌های بارگذاری جانبی متحمل شده توسط نمونه‌ها به مراتب بیشتر از ستون‌های بتنی معمولی است. این مورد در اثر محصوریت هسته بتن توسط جدار فولادی است و باعث افزایش قابل توجه در شکل‌پذیری و جذب انرژی می‌گردد، که در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله دارای اهمیت فراوانی است.

۲- در نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده به طول ۳۰ سانتی متر پائین ستون (جائی که مصالح ستون تحت تنش‌های ناشی از فشار و خمش حداکثر قرار دارند)، ورق‌های سخت‌کننده نقش مهم و قابل توجهی در افزایش چرخه‌های بارگذاری قابل تحمل توسط ستون و افزایش شکل‌پذیری ستون و افزایش جذب انرژی دارند.

۳- تمام نمونه‌های تحت فشار توام با بار جانبی چرخه‌ای در اثر کمناش موضعی جدار فولادی و پودر شدن بتن در محل کمناش موضعی به شکست رسیده‌اند، و وجود ورق‌های سخت‌کننده در نواحی بحرانی ستون مقدار D/t یا B/t (نسبت عرض به ضخامت جدار فولادی یا ضریب فشردگی مقطع) را کاهش داده و کمناش موضعی را به تعویق می‌اندازد، با توجه به B/t و D/t نمونه‌های مختلف و تعداد چرخه‌های قابل تحمل توسط نمونه‌ها در شروع کمناش موضعی پیشنهاد می‌گردد، برای مقاطع دایره‌ای بدون ورق‌های سخت‌کننده حداکثر به ۳۲ و مقدار B/t برای مقاطع هشت ضلعی و مربعی حداکثر به ۲۵ محدود گردد.

۴- در آزمایش‌ها از سه نوع مقطع عرضی دایره، هشت ضلعی، و مربع استفاده شده است، مقایسه نتایج این سه نوع مقطع نشان می‌دهد، رفتار مقطع دایره از لحاظ شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی و تعداد سیکل‌های قابل تحمل تا افت قابل توجه مقاومت بهتر از رفتار مقطع هشت ضلعی و رفتار مقطع هشت ضلعی بهتر از رفتار مقطع مربعی است.

در استفاده از مقاطع هشت ضلعی، برای کاهش B/t در محل اتصالات و نواحی بحرانی توصیه می‌گردد از ورق‌های سخت‌کننده استفاده شود.

۵- در مراحل اول بارگذاری نسبت پواسون فولاد بیشتر از

بتن است و در بارهای نزدیک به بار نهائی نسبت پواسون فولاد کمتر از بتن بوده و فولاد به صورت دورگیر بتن را در بر گرفته و موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. این افزایش مقاومت با افزایش نسبت طول به قطر یا بعد مقطع (L/D) و نیز افزایش ضریب فشردگی مقطع ($B/t, D/t$) کاهش می‌یابد.

۶- پرکردن مقاطع قوطی و توخالی با بتن از کمناش موضعی به طرف داخل جداره فولادی جلوگیری نموده و در نتیجه کمناش موضعی جداره فولادی را به تعویق می‌اندازد [۱۴].

۷- با توجه به نتایج نمونه‌ها در آزمایش، پیشنهاد می‌گردد در نواحی بحرانی ستون در حوالی اتصالات تیر- ستون و اتصال ستون به فونداسیون در طول L_0 از ورق‌های سخت‌کننده در داخل نمونه با جوش سرتاسری استفاده شود. طول L_0 با روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$L_0 = \text{Max} (L_n/6, D, 450 \text{ mm})$$

L_n = ارتفاع خالص ستون می‌باشد.

۸ - حداکثر کرنش وارد شده به بتن در شروع شکست حدود ۰/۰۲۷ و حداکثر کرنش بتن در شروع کمناش موضعی جدار فولادی ۰/۰۰۹۲ می‌باشد (متوسط نمونه‌ها).

۹- در اثر اندرکنش بین بتن و جدار فولادی مقاومت بتن برای مقاطع دایره‌ای حدود ۲۵ درصد و برای مقاطع هشت ضلعی حدود ۲۲ درصد و برای مقاطع مربعی حدود ۱۶ درصد (متوسط نمونه‌ها) افزایش می‌یابد.

۱۰- در اثر اندرکنش بین بتن و جدار فولادی و در اثر تنش‌های حلقوی وارد شده به فولاد، مقاومت تسلیم فولاد حدود ۸ درصد کاهش می‌یابد.

۱۱ - در ستون‌های CFST پدیده pinching در منحنی‌های چرخه‌ای در مقایسه با ستون‌های بتن مسلح بسیار کمتر است. در تعدادی از نمونه‌ها با ورق‌های سخت‌کننده در نواحی بحرانی پدیده pinching مشاهده نمی‌شود.

۱۲- با کاهش مقدار D/t در نمونه‌ها مشاهده می‌شود پدیده pinching در منحنی‌های چرخه‌ای به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

1. Johansson, M. and Gylltoft, k. (2001), "structural behavior of slender circular steel – concrete composite columns under various means of load application "
 2. Chao , M. and Zhang , J.Q. (1999), " Accuracy of Numerical Expressions for the Section Analysis of CFST Beam – columns " proceeding of EASEC – 7 , August , Japan , PP967– 972
 3. M.Shams, M.A. Saadegh vaziri. " State of the Art concrete Filled steel Tubular columns. "ACI Struct. Journal / sept – oct. 1997.
 4. K.A.S. Susantha, Hanbin Ge , Tsutomu Usami , (2001), "Uniaxial stress – strain relationship of concrete confined by various shaped steel Tube " , Engineering Structures Journal
 5. G. Compione, N. Scibilia, G. Zingone. "Strength and Ductility of Hollow circular steel columns filled With Fiber Reinforced concrete" Dipartimento di Ing. struct. Universita di palermo, I – 90128, ITALY.
 6. B. Uy. "Strength of concrete Filled steel Box Columns Incorporating Local Buckling. "J. Struct. Engineering. ASCE / March 2000
 7. Y.C. Wang. "Tests on slender composite columns "J. Constr. Steel Res. 49 (1999) 25-41
 8. Martin D. O`Shea, Russel Q. Bridge. "Design of Circular thin – walled Concrete Filled Steel Tube Columns. "J. Struct. Engineering. ASCE / November 2000
 9. Popovics S. "A Numerical Approach To The Complete Stress – strain Curves For Concrete." Cement Concrete Res 1973, 3(s): 583 – 99.
 10. Mander JB. , priestly JN. , park R. "Theoretical Stress – Strain Model For Confined Concrete." J. Struct. Eng. ASCE 1988, 114 (8): 1804 - 26
 11. Ahmad, S. H. and Shah, s.p. (1987), " Structural Properties of High Strength Concrete And Its Implications For Precast Concrete", PCI J.,
 12. K.A.S. Susantha, Hanbin Ge, Tsutomu Usami "Uniaxial Stress – Strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes". Engineer struct 23(2001) 1331-1347.
 13. Harry G.Harris Gajanan M.Sabnis. "Structural Modeling and Experimental Techniques".
- ۱۴- صادق رضا فخری ، بررسی تحلیلی و تجربی رفتار ستون‌های فلزی پر شده با بتن و اتصالات مربوطه
دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۵