



بررسی آزمایشگاهی شکل پذیری ستون‌های 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 ستون‌های فولادی پر شده با بتن CFST نوعی از ستون‌های مرکب می‌باشند، که به دلیل مزایای فراوانی که نسبت به ستون‌های بتن آرمه و فولادی دارند استفاده از آنها مخصوصاً در ساختمان‌های بلند در سال‌های اخیر رواج زیادی پیدا کرده است. از جمله این مزایا میتوان به سادگی نصب و اجرا، مسائل اقتصادی، حذف هزینه‌های قالب‌بندی، عملکرد خوب در مقابل نیروهای لرزه ای، مقاومت بیشتر با حجم کمتر و شکل پذیری بالا اشاره نمود. پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری ستون‌های 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 می‌باشند. در این تحقیق اثر تعدادی از پارامترهای مؤثر در رفتار ستون‌های CFST به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بررسی آزمایشگاهی این ستون‌ها ۱۲ نمونه ستون با مقیاس حدود ۱/۳ ساخته شده و در آزمایشگاه تحت بار محوری فشاری برابر با $0.2 P_u$ توام با بار جانبی متناوب افزایش یابنده تا انهدام کامل ستون قرار می‌گیرند و منحنی‌های رفتاری نمونه‌ها ترسیم شده و مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند. 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 نمونه‌ها ورق‌های سخت‌کننده در داخل ستون تعبیه شده است تا اثرات آنها در رفتار این نوع ستون‌ها بررسی شود.

کلمات کلیدی:

ستون‌های فولادی پر شده با بتن، جدار فولادی، ورق‌های سخت‌کننده، 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 بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله Nateghi@iices.ac.ir



شکل (۲): تصویر تعدادی از نمونه‌های آزمایش

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 [۱۳ و ۳].

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 شماره ۶ عبور کنند و مقدار عبور از الک شماره 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

۱- مقدمه

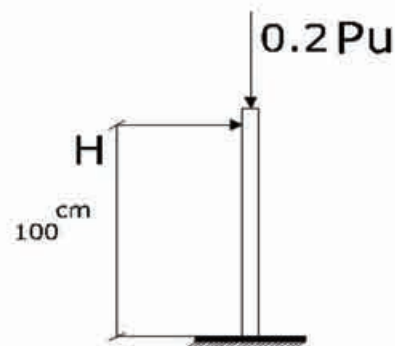
برای بررسی رفتار ستون‌های CFST، دوازده نمونه ستون با اشل حدود ۱/۳ ساخته شده و در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تحت نیروی فشاری توام با نیروی جانبی متناوب افزایش یابنده مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف از آزمایشات بررسی اثر نسبت بعد مقطع به ضخامت جداره فولادی (D/t) و نسبت طول نمونه به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

در آزمایش این دوازده نمونه از Actuator با ظرفیت پانصد کیلو نیوتن برای اعمال بار محوری و از Actuator دوپست 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 ۰.۲ 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.

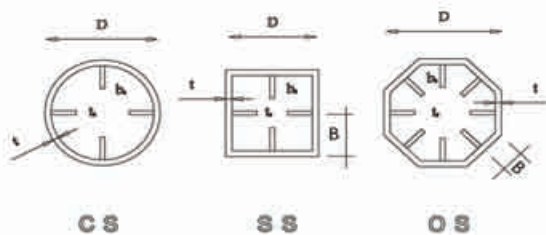


شکل (۱): مدل نمونه‌های CFST

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.

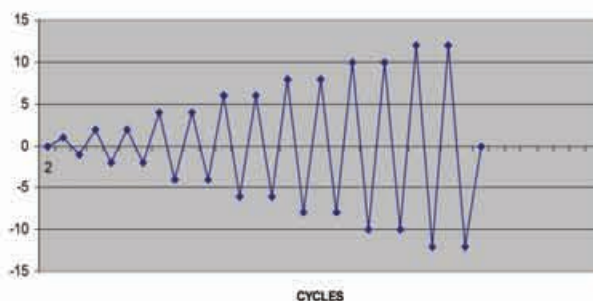
۵- دستگاه آزمایش و نحوه اعمال بارها

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 (۵) : منحنی اعمال تغییر مکان در انتهای ستون

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

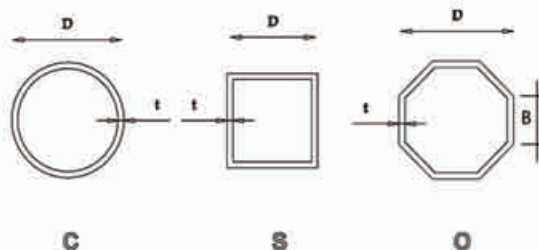
۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشی

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



شکل (۳) : مقاطع عرضی نمونه‌های بدون ورق‌های سخت‌کننده

۶- آزمایشات و منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌ها

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 نهائی 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.

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

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

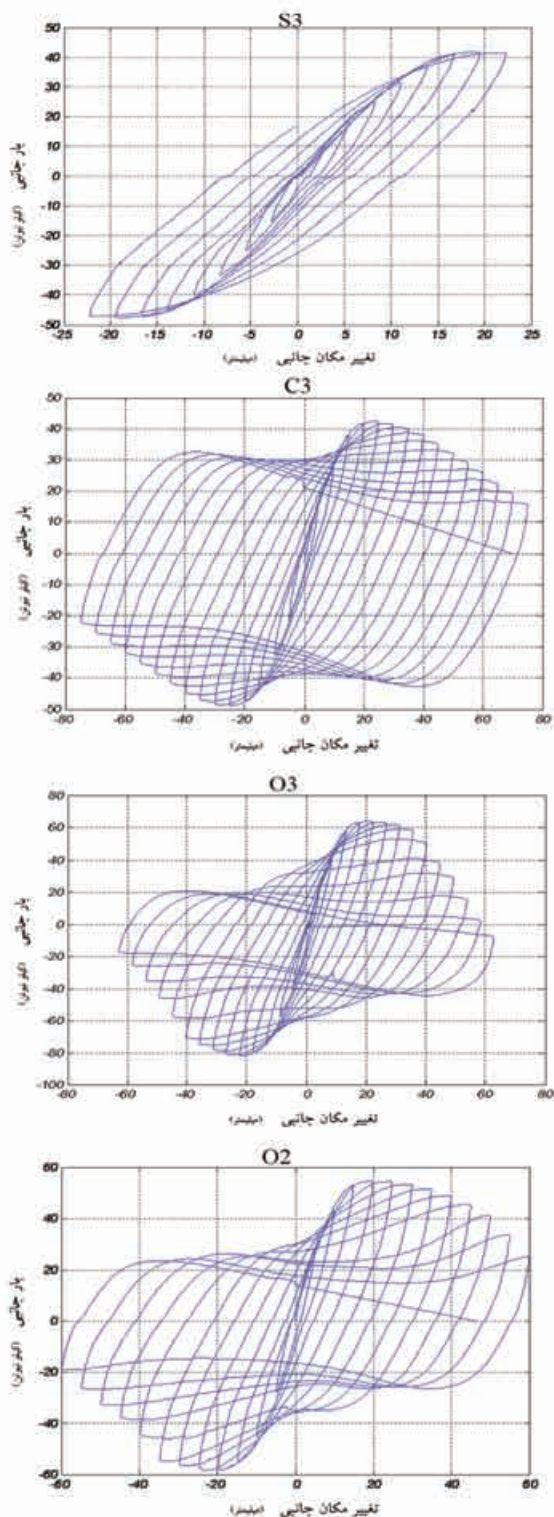
جدول (۲): مشخصات بتن نمونه‌ها

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

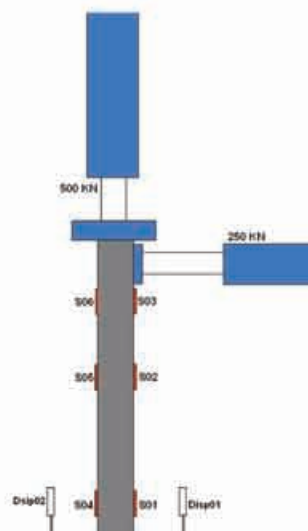
جدول (۳): مشخصات نمونه‌های CFST

نمونه‌ها	$D-B$ (mm)	t (mm)	$\frac{D}{T}$	$\frac{B}{T}$	$\frac{L}{D}$	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 می گردد [عوزد ۱۲].



شکل (۸): منحنی های چرخه ای نمونه های بدون ورق های سخت کننده

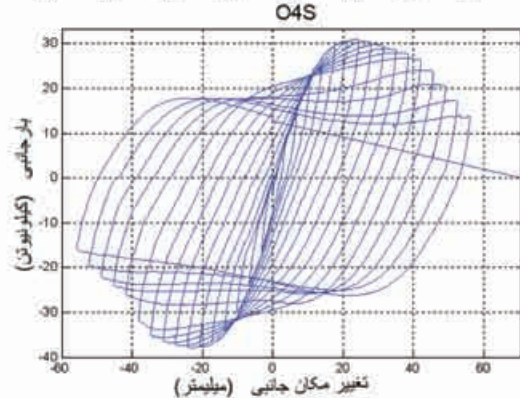
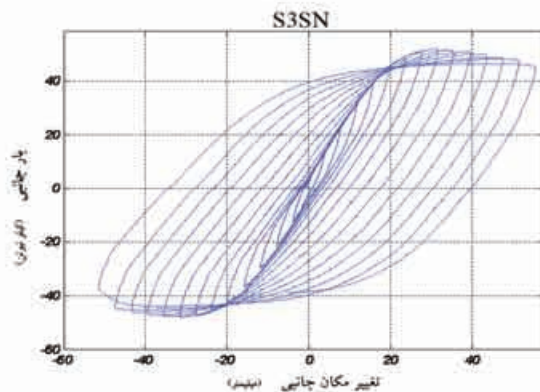
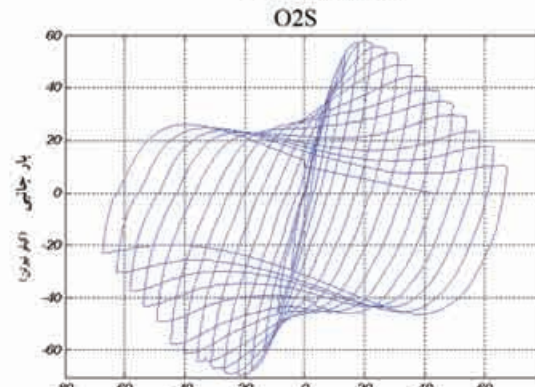
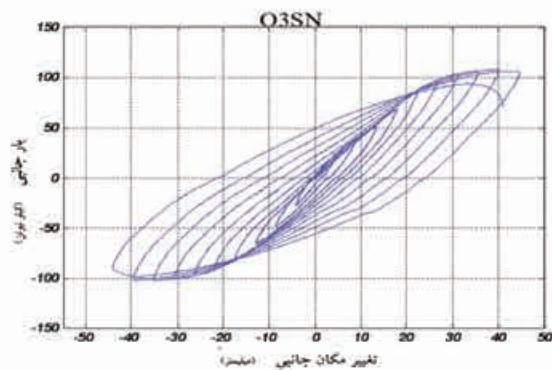
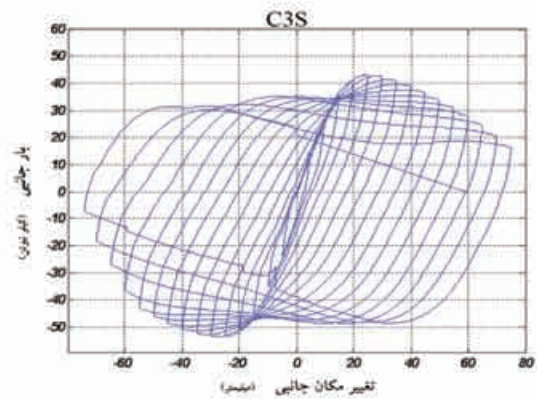
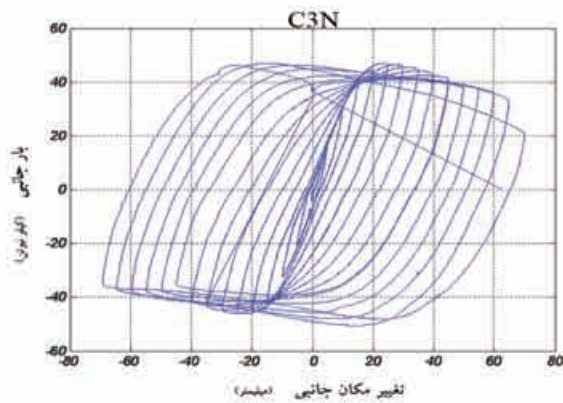
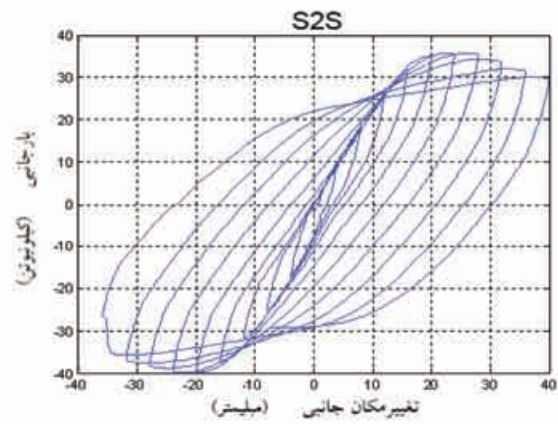
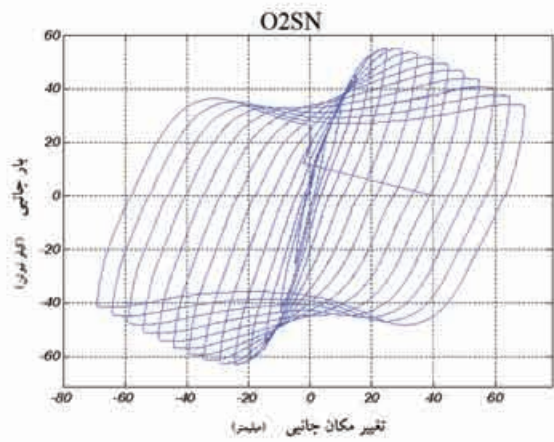


شکل (۶): دستگاه آزمایش و نحوه اعمال بارها



شکل (۷): دستگاه آزمایش نمونه های 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 می شوند. 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 می شود. برای اعمال بار محوری از یک صفحه فولادی به ضخامت



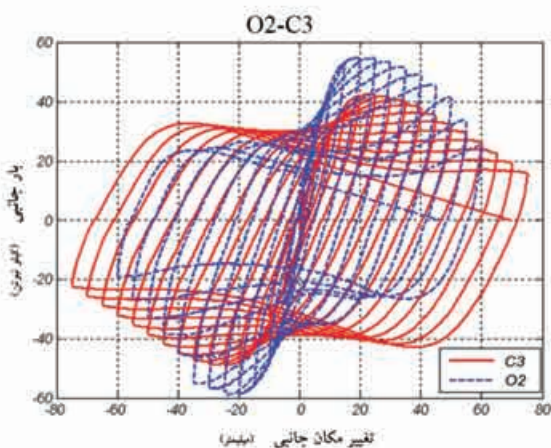
شکل (۱۰): منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده در ناحیه بحرانی نمونه‌ها

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)	δY_0 (mm)	δY_1 (mm)	δY_{max} (mm)	$\mu(\delta Y_1/\delta Y_0)$	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].



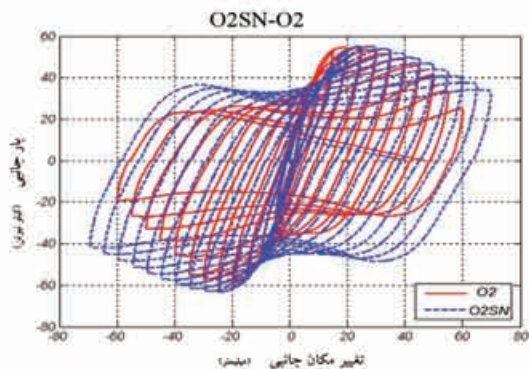
شکل (۱۱) : منحنی‌های چرخه‌ای C3, O2

۷- مقایسه منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌ها

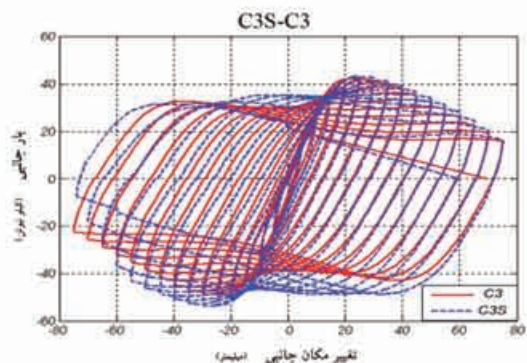
منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های بدون ورق‌های سخت‌کننده و نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده در سرتاسر طول ستون و نمونه‌های با ورق‌های سخت‌کننده در ناحیه بحرانی ستون در شکلهای (۱۱) الی (۱۹) با یکدیگر مقایسه شده اند تا اثر ورق‌های سخت‌کننده و همچنین اثر شکل مقطع عرضی در رفتار و شکل‌پذیری ستونهای CFST بررسی گردد.

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 [۷ و ۸].

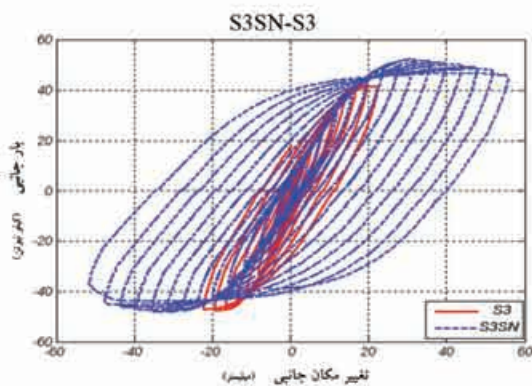
اثر وجود ورق‌های سخت‌کننده در نواحی بحرانی ستون (نواحی تحت تنشهای حداکثر) در افزایش شکل‌پذیری بیشتر از وجود ورق‌ها در سرتاسر طول ستون می‌باشد.



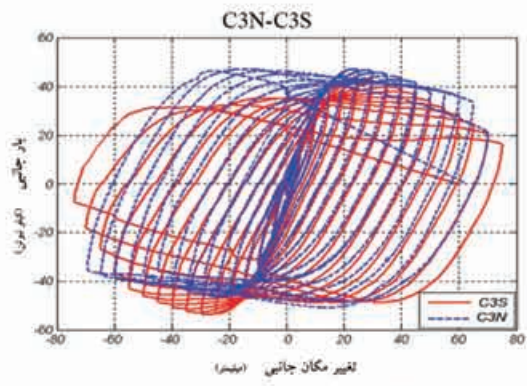
شکل (۱۶) : منحنی های چرخه ای O2,O2SN



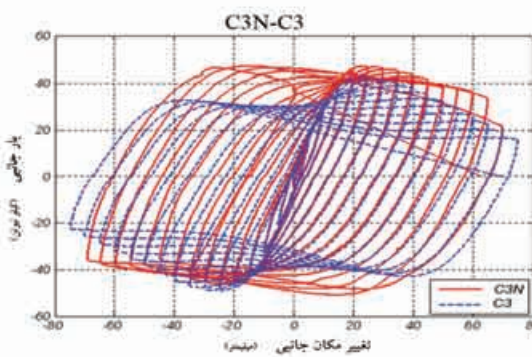
شکل (۱۲) : منحنی های چرخه ای C3,C3S



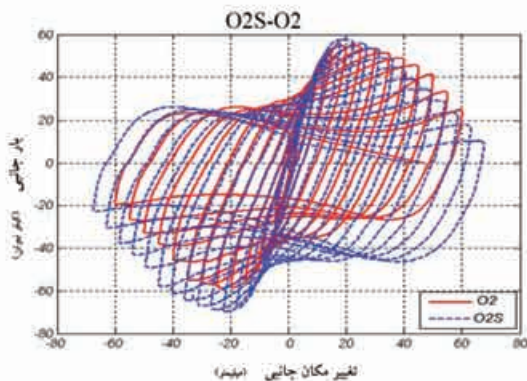
شکل (۱۷) : منحنی های چرخه ای S3,S3SN



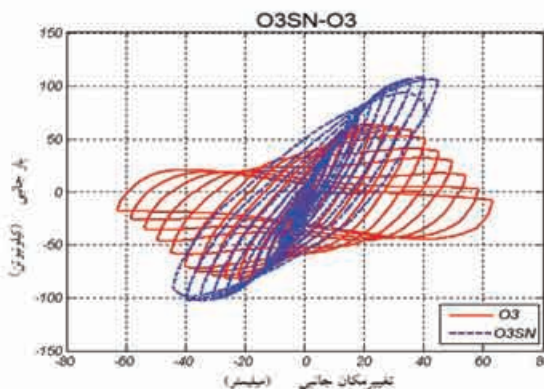
شکل (۱۳) : منحنی های چرخه ای C3S,C3N



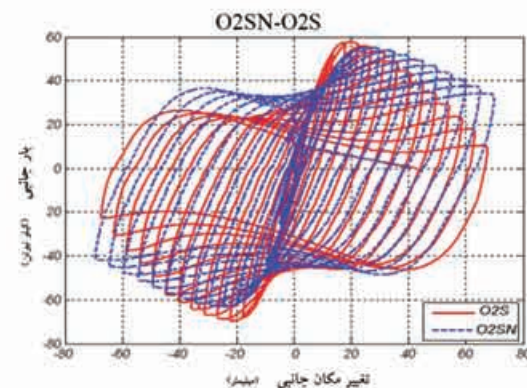
شکل (۱۸) : منحنی های چرخه ای C3,C3N



شکل (۱۴) : منحنی های چرخه ای O2,O2S



شکل (۱۹) : منحنی های چرخه ای O3,O3SN



شکل (۱۵) : منحنی های چرخه ای O2S,O2SN

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 می شود. 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 می یابد.

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

۷- با توجه به نتایج نمونه ها در آزمایش، پیشنهاد می گردد در نواحی بحرانی ستون در حوالی اتصالات تیر- ستون و اتصال ستون به فونداسیون در طول L_0 از ورق های سخت کننده در داخل نمونه با جوش سرتاسری استفاده شود. طول L_0 با روابط زیر محاسبه می گردد.

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

L_n = ارتفاع خالص ستون می باشد.

۸ - حداکثر کرنش وارد شده به بتن در شروع شکست حدود $0/027$ و حداکثر کرنش بتن در شروع کماتش موضعی جدار فولادی $0/0092$ می باشد (متوسط نمونه ها).

۹- در اثر اندرکنش بین بتن و جدار فولادی مقاومت بتن برای مقاطع دایره ای حدود ۲۵ درصد و برای مقاطع هشت ضلعی حدود ۲۲ درصد و برای مقاطع مربعی حدود ۱۶ درصد (متوسط نمونه ها) افزایش می یابد.

۱۰- در اثر اندرکنش بین بتن و جدار فولادی و در اثر تنش های حلقوی وارد شده به فولاد، مقاومت تسلیم فولاد حدود ۸ درصد کاهش می یابد.

۱۱- در ستون های CFST پدیده pinching در منحنی های چرخه ای در مقایسه با ستون های بتن مسلح بسیار کمتر است. در تعدادی از نمونه ها با ورق های سخت کننده در نواحی بحرانی پدیده pinching مشاهده نمی شود.

۱۲- با کاهش مقدار D/t در نمونه ها مشاهده می شود پدیده pinching در منحنی های چرخه ای به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد.

۱- تعداد چرخه های بارگذاری جانبی متحمل شده توسط نمونه ها به مراتب بیشتر از ستون های بتنی معمولی است. این مورد در اثر محصوریت هسته بتن توسط جدار فولادی است و باعث افزایش قابل توجه در شکل پذیری و جذب انرژی می گردد. که در سازه های مقاوم در برابر زلزله دارای اهمیت فراوانی است.

۲- در نمونه های با ورق های سخت کننده به طول ۳۰ سانتی متر پائین ستون (جائی که مصالح ستون تحت تنش های ناشی از فشار و خمش حداکثر قرار دارند)، ورق های سخت کننده نقش مهم و قابل توجهی در افزایش چرخه های بارگذاری قابل تحمل توسط ستون و افزایش شکل پذیری ستون و افزایش جذب انرژی دارند.

۳- تمام نمونه های تحت فشار توام با بار جانبی چرخه ای در اثر کماتش موضعی جدار فولادی و پودر شدن بتن در محل کماتش موضعی به شکست رسیده اند، و وجود ورق های سخت کننده در نواحی بحرانی ستون مقدار D/t یا B/t (نسبت عرض به ضخامت جدار فولادی یا ضریب فشردگی مقطع) را کاهش داده و کماتش موضعی را به تعویق می اندازد، با توجه به D/t و B/t نمونه های مختلف و تعداد چرخه های قابل تحمل توسط نمونه ها در شروع کماتش موضعی پیشنهاد می گردد، D/t برای مقاطع دایره ای بدون ورق های سخت کننده حداکثر به ۳۲ و مقدار B/t برای مقاطع هشت ضلعی و مربعی حداکثر به ۲۵ محدود گردد.

۴- در آزمایش ها از سه نوع مقطع عرضی دایره، هشت ضلعی، و مربع استفاده شده است، مقایسه نتایج این سه نوع مقطع نشان می دهد، رفتار مقطع دایره از لحاظ شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی و تعداد سیکل های 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 می گردد از ورق های سخت کننده استفاده شود.

۵- در مراحل اول بارگذاری نسبت پواسون فولاد بیشتر از

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