

## تحلیل ستونهای فولادی جدارنازک پر شده با بتن توسط روش اجزای محدود غیرخطی

جلیل عمادی\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اردستان

(دریافت مقاله: ۸۲/۱۱/۴ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۱۰/۲)

**چکیده** - مقاطع فولادی پر شده با بتن به دلیل عملکرد مناسب در برابر بارهای لرزه‌ای و اقتصادی بودنشان دامنه کاربرد فراوانی را در سازه‌های مهندسی عمران به خود اختصاص داده‌اند. در این تحقیق ابتدا به صورت تحلیلی، رفتار ستونهای مختلط بر اساس برخی تحقیقات نظری و آزمایشات از قبل انجام شده بررسی شده، سپس به بررسی رفتار غیر خطی مدل سه بعدی مقاطع فولادی جدار نازک پر شده با بتن توسط روش اجزای محدود پرداخته و با مقایسه نتایج حاصله از روش اجزای محدود با نتایج تحقیقات آزمایشگاهی، مدل اجزای محدود کالیبره شده است. پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل اجزای محدود، از آن برای بررسی نمونه‌هایی که از آنها مدل آزمایشگاهی انجام نشده استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل با نتایج حاصل از روش طرح LRFD مقایسه شده تا عملکرد این روش مشخص شود. با توجه به کاربرد روزافزون مصالح با مقاومت بالا در طراحی و اجرای سازه‌ها، اثرات افزایش مقاومت فولاد و بتن و تغییرات ضخامت جداره فولادی در عملکرد این ستونها مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل کردن ستون از المان مکعبی برای هسته بتنی، المان پوسته برای پروفیل فولادی و همچنین از المان تماسی بین هسته و پوسته برای در نظر گرفتن پیوستگی بین فولاد و بتن استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن خواص غیر خطی از مدل سخت شوندهگی سینماتیکی در تحلیل استفاده شده است.

واژگان کلیدی ستونهای قوطی شکل، بتن فولادی، رفتار غیر خطی، اجزای محدود.

## Analysis of Thin-Walled Steel Sections Filled with Concrete Using Non-Linear Finite Element Method

J. Emadi

Department of Civil Engineering, Ardestan Islamic Azad University

**Abstract:** Being economical and performing well under cyclic loads, steel sections filled with concrete have been widely used in structural buildings. Extensive studies and experiments have been conducted to investigate the influence of different parameters and loadings on the behavior of these structural components. Based on the data available from previous experiments and studies, this paper discusses the behavior of composite columns. The results of 3D-non-linear finite element analysis of thin-walled steel sections filled with concrete are presented. Lastly, comparisons are made between results from finite element analysis and experimental data available about the specimens. Using a trial and error method, the finite element model was calibrated and was used to evaluate the capacity of specimens that were not tested in the laboratory. The capacities of the sections were calculated

\* - مریبی

based on the LRFD design method. The results are compared to evaluate the accuracy of the proposed method. Because of the increase in the use of high strength materials in structures, the effects of increase in concrete and steel strengths on the behavior of composite columns are discussed in this paper. Also the effects that the change in the thickness of the steel shell may have on the behavior of composite columns are argued.

**Keywords:** Composite columns, Box cross-sectioned columns, Non-linear finite element

## فهرست علائم

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| $f'_c$ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه ای بتن | $A_c$ سطح مقطع بتن                |
| $L$ : طول ستون                                   | $A_s$ سطح مقطع فولاد              |
| $N_u$ نیروی محوری                                | $B$ عرض ستون مربعی                |
| $t$ ضخامت جداره فلزی مقطع                        | $b$ عرض $t$ ورق فولادی ( $B-2t$ ) |
|  | $F_y$ تنش جاری شدن فولاد          |

### ۱- مقدمه

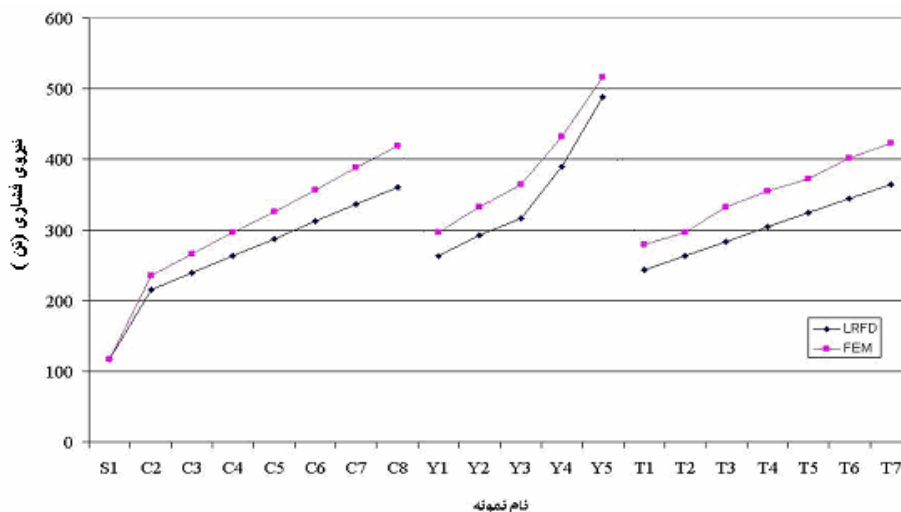
در ستونهای فولادی پر شده با بتن و تحت بار قرار دادن آن، بتن محبوس شده از کمانش موضعی به طرف داخل مقطع فولادی جلوگیری می کند، زیرا در بتن حالت محصور شدگی ایجاد می شود و بنابراین تحت تأثیر فشار سه محوره قرار گرفته [۲] و گسیختگی عضو در مقایسه با ستونهای بتنی از حالت ترد به حالت پلاستیک تغییر می کند. در شکل (۱) نشان داده شده است که چگونه پرشدن مقطع قوطی با بتن موجب کاهش طول کمانش موضعی و در نتیجه بهبود وضعیت کمانش موضعی می شود. در شکل (۲) مقطع ستون قوطی فولادی پر شده با بتن نشان داده شده است. در این تحقیق سعی شده است رفتار مقاطع قوطی پر شده با بتن مورد بررسی قرار گیرد. ضمن اینکه پدیده کمانش موضعی در ستونهای جعبه ای بتنی دارای مقاومت بالا در مرجع [۳] بررسی شده است.

مقاطع فولادی پر شده با بتن یک نوع خاص از مقاطع مرکب فولاد و بتن هستند که شامل مقطع چهار گوش یا دایره ای از فولاد با ضخامت نازک در خارج و بتن در داخل است. مقایسه اقتصادی ستونهای مرکب و ستونهای فلزی نشان می دهد که ستونهای مرکب حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد فولاد مصرفی کمتری داشته و از مقایسه ستونهای مختلط با ستونهای بتنی دیده می شود که در ستونهای مرکب حدود ۶۵ تا ۸۰ درصد بتن مصرفی کمتری داشته ولی مصرف فولاد حدود ۱۰ درصد بیشتر خواهد بود [۱]. در اجرای ستونهای مرکب با مقطع قوطی و یا دایره تو خالی پر شده با بتن، نیاز به قالب بندی و قفسه آرماتوربندی نیست ضمن اینکه می توان بتن ریزی داخل مقطع فولادی، در صورت عدم نیاز به میلگرد در داخل بتن، را روی زمین انجام داد. این مسئله باعث افزایش سرعت عمل و کاهش زمان ساخت می شود. بتن مورد استفاده در این مقاطع ممکن است با مقاومت پایین باشد که فقط برای جلوگیری از کمانش موضعی ورق فولادی استفاده شود و در کسب بار نقشی نداشته باشد و یا بتن با مقاومت بالا باشد که علاوه بر مسئله کمانش موضعی فولاد، بتن نیز در تحمل بارهای اعمالی شرکت کند و یا حتی بتن مسلح باشد که باعث افزایش زیاد مقاومت مقطع و پیوستگی بیشتر بتن با جداره مقطع فولادی می شود.

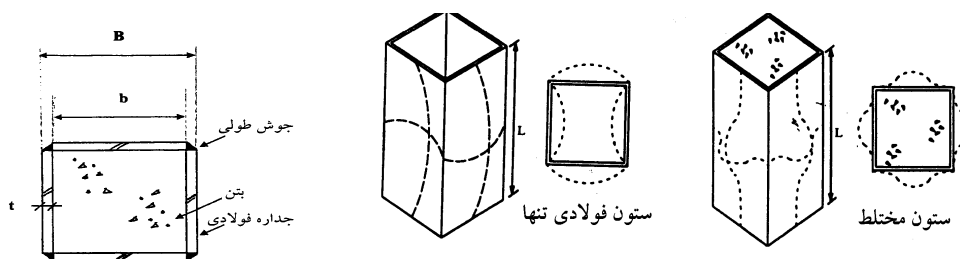
### ۲- بررسی پیوستگی بین بتن و جداره داخلی مقطع

#### فولادی

طبق آزمایشات انجام شده پارامترهای متعددی بر مقاومت پیوستگی مؤثرند که مهمترین آنها سن، ابعاد، نحوه عمل آوردن بتن و دماست. سن بالا به هنگام اعمال بارگذاری فاکتور مهمی در کاهش پیوستگی است به طوری که مقاومت پیوستگی در سن یک ساله در حدود ۳۰ درصد مقاومت پیوستگی در سن سه



نمودار ۱- مقایسه اثرات مقاومت فشاری بتن، تنش تسلیم فولاد و ضخامت جداره فولادی بر روی نیروی فشاری



شکل ۲- مقطع عرضی ستون

شکل ۱- مودهای گسیختگی در مقاطع مختلط و فولادی

میزان انبساط، به جای سیمانهای معمولی، در تهیه بتن برای این مقاطع می‌گردد.

### ۳- بررسی رفتار مقاطع فولادی جدار نازک پر شده

#### با بتن با استفاده از روش اجزای محدود

در این تحقیق نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و روش اجزای محدود با نتایج حاصل از روش طرح LRFD مقایسه شده است. در ادامه، با توجه به نتایج آزمایشهای انجام شده، مدل اجزای محدودی برای ستونهای قوطی پر شده با بتن ارائه شده و با سعی و خطا طوری کالیبره می‌شود که نتایج آن با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد، سپس با داشتن این مدل می‌توان از آن برای به دست آوردن نتایج برای نمونه‌هایی که از آنها مدل آزمایشگاهی ساخته نشده

هفته‌ای است [۵]. بنابراین مشاهده می‌شود میزان انقباض بتن در چنین مقاطعی از اهمیت زیادی برخوردار است. به عبارتی، هر چه انقباض بتن بیشتر باشد میزان پیوستگی بین فولاد و بتن کمتر خواهد بود. بنابراین، با کاهش میزان انقباض بتن و یا حذف آن عملاً به افزایش پیوستگی بین بتن و فولاد کمک شایانی شده است. مؤلف این تحقیق بر این باور است، به‌منظور افزایش پیوستگی بین هسته بتنی و جداره داخلی مقطع فولادی در چنین مقاطعی، توصیه به (۱) استفاده از بتن با مقاومت بالا (به دلیل انقباض کمتر آنها نسبت به بتن‌های با مقاومت معمولی) [۴]، (۲) استفاده از نسبت آب به سیمان کم همراه با فوق روان کننده در بتن‌های معمولی و عمل آوری مناسب، (۳) ایجاد اعوجاج یا صیقلی نبودن جداره داخلی مقطع فولادی، (۴) استفاده از سیمان انبساطی با کنترل

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

| نام نمونه | B(mm) | b(mm) | t(mm) | نسبت b/t | L(mm) | $A_s(cm^2)$ | $F_y (\frac{kg}{cm^2})$ | $A_c(cm^2)$ | $f'_c (\frac{kg}{cm^2})$ |
|-----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------------|-------------------------|-------------|--------------------------|
| S1-1      | 90    | 86    | 2     | 43       | 200   | 7.04        | 2935                    | 0           | قوطی فولادی              |
| C1-1      | 90    | 86    | 2     | 43       | 200   | 7.04        | 2935                    | 73.96       | 302                      |
| HS1-10    | 126   | 120   | 3     | 40       | 360   | 14.04       | 3000                    | 129.96      | 500                      |
| HS7-10    | 156   | 150   | 3     | 50       | 450   | 17.64       | 3000                    | 207.36      | 500                      |
| NS1-10    | 186   | 180   | 3     | 60       | 540   | 21.24       | 3000                    | 302.76      | 320                      |
| NS7-10    | 246   | 240   | 3     | 80       | 720   | 28.44       | 3000                    | 547.56      | 380                      |
| NS13-10   | 306   | 300   | 3     | 100      | 900   | 35.64       | 3000                    | 846.36      | 380                      |
| S1-9      | 127.3 | 121   | 3.15  | 40.4     | 611   | 15.35       | 3560                    | 146.45      | 304                      |
| S2-9      | 127   | 118   | 4.34  | 29.2     | 610   | 20.7        | 3570                    | 139.35      | 260                      |
| S3-9      | 126.9 | 118   | 4.55  | 27.9     | 610   | 21.7        | 3220                    | 138.71      | 238                      |
| S4-9      | 125.8 | 114   | 5.67  | 22.3     | 604   | 26.84       | 3120                    | 130.97      | 238                      |
| S5-9      | 126.8 | 112   | 7.47  | 17       | 608   | 34.26       | 3470                    | 125.16      | 238                      |

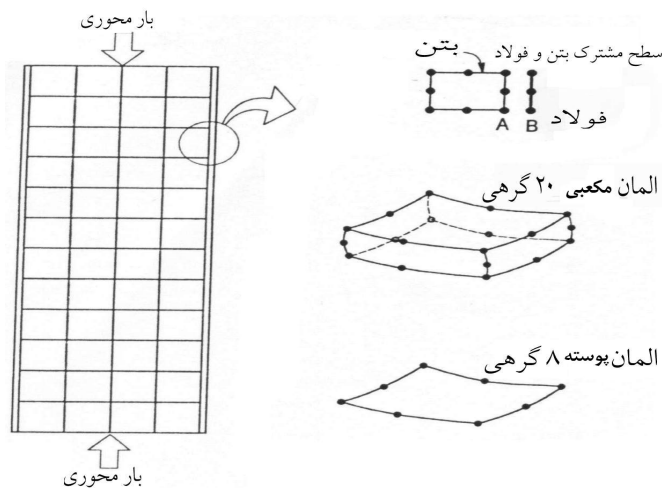
جدول ۲- مقایسه نتایج

| شماره نمونه | تن(Nu(EXP)) | تن(Nu(LRFD)) | تن(Nu(FEM)) | EXP/LRFD | EXP/FEM | FEM/LRFD |
|-------------|-------------|--------------|-------------|----------|---------|----------|
| S1-1        | 18.98       | 20.62        | 19.8        | 0.92     | 0.96    | 0.96     |
| C1-1        | 40.44       | 39.4         | 41.9        | 1.03     | 0.97    | 1.06     |
| HS1-10      | 113.3       | 96.8         | 112         | 1.17     | 1.01    | 1.16     |
| HS7-10      | 170         | 140.3        | 169         | 1.21     | 1.01    | 1.20     |
| NS1-10      | 150         | 145.4        | 165         | 1.03     | 0.91    | 1.13     |
| NS7-10      | 309.5       | 260.8        | 310         | 1.19     | 1.00    | 1.19     |
| NS13-10     | 400         | 384.8        | 427         | 1.04     | 0.94    | 1.11     |
| S1-9        | 91          | 92.4         | 96          | 0.98     | 0.95    | 1.04     |
| S2-9        | 109         | 105.7        | 109         | 1.03     | 1.00    | 1.03     |
| S3-9        | 112         | 98.7         | 113         | 1.13     | 0.99    | 1.14     |
| S4-9        | 119         | 110.3        | 115         | 1.08     | 1.03    | 1.04     |
| S5-9        | 170         | 147.3        | 160         | 1.15     | 1.06    | 1.09     |
|             |             |              | میانگین     | 1.08     | 0.98    | 1.10     |

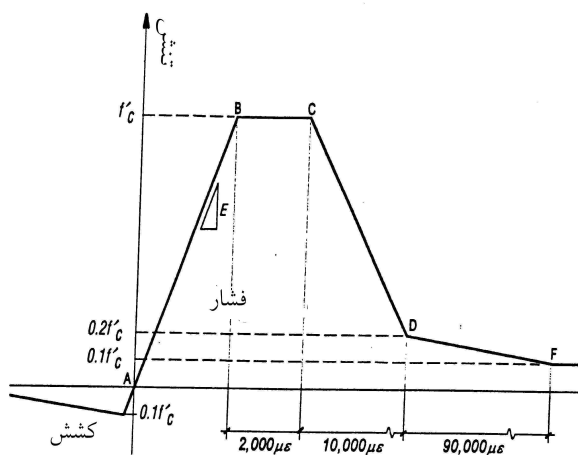
استفاده کرد. لازمه انجام این کار وجود نتایج آزمایشگاهی است که در ادامه توسط روش اجزای محدود به بررسی چند نمونه که مدل آزمایشگاهی آنها قبلاً تهیه شده و نتایج آن در دست است خواهیم پرداخت. برای مطالعه رفتار ستونهای کوتاه فلزی پر شده با بتن، ابتدا مدلسازی سه بعدی آنها تهیه شده و سپس توسط روش اجزای محدود غیر خطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هسته بتنی ستون توسط المانهای مکعبی ۲۰ گرهی و هر گره با ۳ درجه آزادی

(Ux , Uy , Uz) مدل می‌شود، البته به دلیل نداشتن انحنای از المان منشوری ۸ گرهی نیز می‌توان استفاده کرد. جداره فولادی ستون توسط المان پوسته ۸ گرهی با شش درجه آزادی در هر گره مدل می‌شود. در شکل (۳) به صورت شماتیک نحوه المان‌بندی و المانهای به کار رفته برای مدل کردن فولاد و بتن و پیوستگی بین آنها نشان داده شده است. معیار تسلیم انتخاب شده، معیار فون میزز و معیار سخت شوندگی استفاده شده در این مدلسازی معیار سخت‌شوندگی

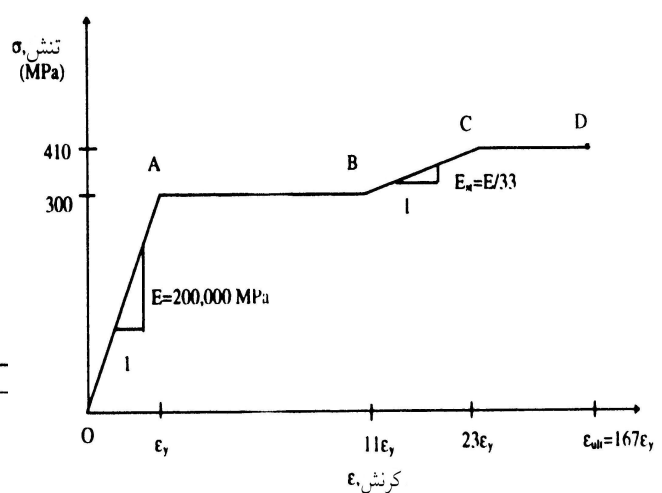
است استفاده کرد. لازمه انجام این کار وجود نتایج آزمایشگاهی است که در ادامه توسط روش اجزای محدود به بررسی چند نمونه که مدل آزمایشگاهی آنها قبلاً تهیه شده و نتایج آن در دست است خواهیم پرداخت. برای مطالعه رفتار ستونهای کوتاه فلزی پر شده با بتن، ابتدا مدلسازی سه بعدی آنها تهیه شده و سپس توسط روش اجزای محدود غیر خطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هسته بتنی ستون توسط المانهای مکعبی ۲۰ گرهی و هر گره با ۳ درجه آزادی



شکل ۳- مدل اجزای محدود و المانهای آن



شکل ۵- منحنی تنش - کرنش بتن [۹]



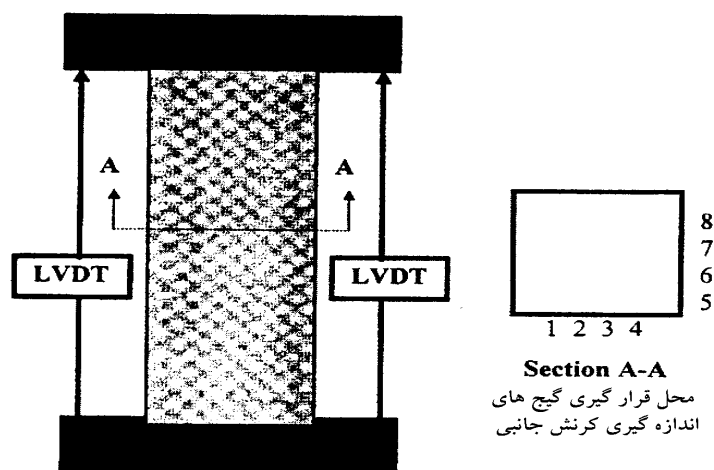
شکل ۴- منحنی تنش - کرنش ایدئال شده فولاد [۸]

نسبت به مدلسازی نمونه‌ها توسط روش اجزای محدود اقدام و سپس نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نامگذاری نمونه‌ها به همان ترتیبی که در مرجع خود آمده، انجام شده است و با یک خط فاصله از شماره مرجع خود جدا شده‌اند. در شکل (۶) نحوه آزمایش ستونهای با مقطع قوطی شکل و محل قرارگیری کرنش سنجها که میزان کرنش جانبی را در هر لحظه ثبت می‌کنند و در مرجع [۱۰] آمده، نشان داده شده است. ضمن اینکه روش آزمایش در مرجع [۹] نیز دقیقاً به همین صورت است. در جدول (۱) مشخصات نمونه‌ها آورده شده و در جدول (۲) به مقایسه نتایج پرداخته شده است.

سینماتیک است که در این نوع مسائل، سطح تسلیم پس از وارد شدن به محدوده پلاستیک بدون آنکه بزرگتر شود جابه‌جا می‌شود. برای مدل کردن خواص فولاد و بتن مصرفی از منحنیهای تنش - کرنش نشان داده شده در شکلهای (۴) و (۵) استفاده شده است [۸ و ۹].

#### ۴- مشخصات نمونه‌ها؛ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و ضوابط آیین‌نامه ای با نتایج حاصل از روش اجزای محدود

در این قسمت با توجه به نمونه‌های آزمایشگاهی موجود،



LVDT: Linear Voltage Displacement Transducers

شکل ۶- نمونه آزمایش و موقعیت وسایل اندازه‌گیری تغییر شکلها و کرنشها [۸]

محدود، با توجه به فرض سازگاری کرنشها، بیشتر باشد نتایج دقیقترند. به‌عنوان مثال در نمونه NS7 با در نظر گرفتن حدود ۱۵۰۰ المان در یک هشتم مدل به‌دلیل وجود تقارن (تعداد المانها در کل مدل برابر ۱۲۰۰۰) جواب ناشی از روش اجزای محدود و آزمایشگاه دقیقاً برهم منطبق شد اما زمان حل این مدل بسیار زیاد بود.

۲- وجود تنشهای پسماند در پوسته فولادی به علت جوشکاری ورقها.

۳- کماتش موضعی فولاد که در نسبتهای  $\frac{B}{t} > 50$  تأثیر زیادی از خود نشان می‌دهد.

۴- منحنی تنش - کرنش بتن در شرایط معمولی با شرایطی که بتن در پوسته فولادی محصور است تفاوت دارد زیرا در حالت دوم به علت محصور بودن، مقاومت بتن از  $f'_c$  تجاوز می‌کند و کرنشها نیز کمتر است. همچنین استفاده از منحنی ایدئال شده تنش - کرنش فولاد و بتن مقداری خطا دارد.

## ۵- بررسی اثر نوع بتن ، فولاد و ضخامت جداره

### فولادی

در این قسمت و با توجه به اینکه مدل اجزای محدود ارائه شده نتایج مورد قبولی از خود نشان داده است، می‌توان از این

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که به‌طور میانگین نتایج ناشی از روش طرح LRFD نسبت به نتایج آزمایشگاه ۸ درصد و نسبت به نتایج روش اجزای محدود ۱۰ درصد محافظه کارانه است ولی نتایج روش اجزای محدود و نتایج آزمایشگاه همخوانی خوبی با هم دارند. تنها در نمونه های NS13 و NS1 که کمی اختلاف بالاست که علت آن همان‌طور که در مرجع نتایج آزمایشگاهی مربوط به آنها آمده است، می‌تواند به علت تراکم نامناسب بتن در ستون باشد که باعث کم بودن مقدار  $N_{II}$  ناشی از آزمایش شده است، درحالی‌که نتایج دیگر نمونه‌ها مناسب است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود نسبت نتایج آزمایشگاهی به نتایج ناشی از روش اجزای محدود بستگی مستقیم به شرایط آزمایش دارد. به‌طوری‌که میانگین این نسبت برای مرجع [۱]، ۰/۹۶ و برای مرجع [۱۰]، ۰/۹۷ و برای مرجع [۹]، ۱/۰۱ است و میانگین آن برای سه مرجع فوق ۰/۹۸ خواهد بود که معنی آن این است که جوابهای اجزای محدود به‌طور میانگین ارائه شده دو درصد بیشتر از جوابهای آزمایشگاه است.

علل عمده اختلاف بین نتایج آزمایشگاه و نتایج روش اجزای محدود را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

۱- هرچه تعداد المانهای در نظر گرفته شده برای تحلیل اجزای

مدل برای نمونه‌های با ابعاد دیگر که از آنها نمونه آزمایشگاهی تهیه نشده است نیز استفاده کرد و نتایج به دست آمده را با نتایج ناشی از روش طرح آیین‌نامه LRFD مقایسه کرد.

### ۵-۱- مقاومت فشاری بتن

نمونه مورد نظر در این قسمت یک ستون مربعی به ابعاد ۲۵×۲۵ سانتی‌متر مربع، ضخامت جداره فولادی ۵ میلی‌متر و تنش تسلیم فولاد مصرفی  $f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$  است و توسط بتن با مقاومت‌های مختلف پر شده است، در جدول (۳) بارمحوری ستون از دو روش اجزای محدود و LRFD محاسبه و مقایسه شده است. برای نشان دادن میزان افزایش ظرفیت ستون در اثر پر شدن با بتن، جداره فولادی بدون بتن همین مقطع نیز مدل شده و مقدار بار محوری آن محاسبه شده است.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود پرکردن مقطع توخالی، با بتن با مقاومت فشاری  $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$  موجب شده که ظرفیت باربری مقطع حدوداً ۲ برابر شود و اگر همین مقطع با بتن  $f'_c = 500 \text{ kg/cm}^2$  پر شود ظرفیت باربری آن ۳/۵۸ برابر می‌شود و این نشان دهنده اثرات بسیار خوب پرکردن مقاطع توخالی با بتن و همچنین استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا است، که در این زمینه به دلیل کمبود تحقیقات، توصیه به مطالعات آزمایشگاهی می‌شود.

### ۵-۲- فولاد مصرفی

با توجه به مقاومت و باربری بیشتر فولاد با مقاومت بالا، استفاده از این نوع فولاد باعث کاهش ابعاد ستون شده، که علاوه بر مزایای معماری و اقتصادی، نه تنها کاهش وزن سازه و ابعاد فونداسیون را به همراه دارد بلکه، رفتار لرزه‌ای مناسبتری را برای سازه ایجاد می‌کند. نمونه مورد نظر در این قسمت همان نمونه قبلی است با این تفاوت که این بار بتن مصرفی دارای مقاومت فشاری  $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$  است و مقادیر  $f_y$  بین ۲۴۰۰ تا ۷۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع متغیر است. نتایج در جدول (۴) خلاصه شده است.

### ۵-۳- ضخامت جداره فولادی

همان‌طور که اشاره شد، میزان دورگیری بتن<sup>۱</sup> توسط قوطی فولادی با افزایش نسبت  $\frac{B}{t}$ ، کاهش می‌یابد و این به خاطر کماتش موضعی جداره فولادی است. تحقیقات نشان داده‌اند که مقدار مناسب برای نسبت  $\frac{B}{t}$ ، محدوده (۴۵ تا ۶۰) است و در خارج از این محدوده قوطی فولادی توانایی دورگیری مناسب برای جلوگیری از مودهای شکننده گسیختگی بتن را ندارد [۱۰]. نمونه مورد نظر در این قسمت همان نمونه قبلی است با این تفاوت که این بار بتن مصرفی دارای مقاومت فشاری  $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$  و مقادیر تنش تسلیم فولاد  $f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$  است و فقط ضخامت جداره فولادی از ۴ میلی‌متر تا ۱۰ میلی‌متر تغییر می‌کند، که نتایج در جدول (۵) خلاصه شده‌اند.

به منظور مقایسه اثرات ناشی از افزایش مقاومت فشاری بتن، تنش تسلیم فولاد و ضخامت جداره فولادی بر روی ظرفیت نهایی مقطع نتایج ذکر شده در جداول (۳ تا ۵) بصورت نموداری در نمودار (۱) نشان داده شده است. S1 قوطی فولادی تنها و C2 همان قوطی است که با بتن با  $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$  پر شده است، به افزایش مقاومت ناشی از این پرشدگی توجه شود. نمودار (۱) از سه شاخه تشکیل شده است، C2 تا C8 مربوط به افزایش مقاومت فشاری بتن، Y1 تا Y5 مربوط به افزایش تنش تسلیم فولاد مصرفی و T1 تا T7 مربوط به افزایش ضخامت جداره فولادی است. با توجه به شیب تند نمودار یکی در قسمت ابتدایی نمودار یعنی بین نمونه‌های S1 و C2 و دیگری بین نمونه‌های Y3 و Y5 که مربوط به استفاده از فولاد پر مقاومت است نتیجه شود که (۱) پر کردن قوطی فولادی با بتن، حتی با مقاومت فشاری کم و همچنین (۲) استفاده از فولادهای با مقاومت بالا اثرات قابل ملاحظه‌ای در افزایش ظرفیت باربری ستون دارد. به شیب ملایم و تقریباً ثابت منحنی در قسمتهای دیگر نمودار توجه شود.

جدول ۳ - بررسی اثرات مقاومت فشاری بتن

| LRFD/FEM | تن (FEM) Nu | تن (LRFD) Nu | $f'_c$ ( $\frac{kg}{cm^2}$ ) | نام نمونه |
|----------|-------------|--------------|------------------------------|-----------|
| 1.00     | 117         | 117.4        | 0                            | S1        |
| 0.91     | 235         | 215          | 200                          | C2        |
| 0.90     | 266         | 240          | 250                          | C3        |
| 0.89     | 297         | 264          | 300                          | C4        |
| 0.88     | 326         | 288          | 350                          | C5        |
| 0.88     | 357         | 313          | 400                          | C6        |
| 0.87     | 388         | 337          | 450                          | C7        |
| 0.86     | 419         | 361          | 500                          | C8        |
| 0.90     | میانگین     |              |                              |           |

جدول ۴ - بررسی اثرات تنش تسلیم فولاد

| LRFD/FEM | تن (FEM) Nu | تن (LRFD) Nu | $F_y$ | نام نمونه |
|----------|-------------|--------------|-------|-----------|
| 0.89     | 297         | 264          | 2400  | Y1        |
| 0.88     | 333         | 293          | 3000  | Y2        |
| 0.88     | 365         | 317          | 3500  | Y3        |
| 0.91     | 433         | 390          | 5000  | Y4        |
| 0.94     | 516         | 488          | 7000  | Y5        |
| 0.90     | میانگین     |              |       |           |

جدول ۵ - مشخصات نمونه‌ها و بررسی اثرات افزایش ضخامت جداره فولادی

| LRFD/FEM | Nu(FEM) | Nu(LRFD) | Ac(cm <sup>2</sup> ) | As(cm <sup>2</sup> ) | b/t Ratio | t(mm) | نام نمونه |
|----------|---------|----------|----------------------|----------------------|-----------|-------|-----------|
| 0.87     | 280     | 243      | 585.64               | 39.36                | 60        | 4     | T1        |
| 0.89     | 297     | 264      | 576                  | 49                   | 48        | 5     | T2        |
| 0.85     | 332     | 284      | 566.44               | 58.56                | 40        | 6     | T3        |
| 0.86     | 355     | 305      | 556.96               | 68.04                | 34.3      | 7     | T4        |
| 0.87     | 372     | 325      | 547.56               | 77.44                | 30        | 8     | T5        |
| 0.86     | 402     | 345      | 538.24               | 86.76                | 26.7      | 9     | T6        |
| 0.86     | 423     | 364      | 529                  | 96                   | 24        | 10    | T7        |
| 0.87     | میانگین |          |                      |                      |           |       |           |

### ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

جلوگیری می‌کند، بنابراین کماتش موضعی به تأخیر افتاده و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. یعنی در صورت استفاده از مقاطع مختلف می‌توان از فولادهای با نسبت عرض به ضخامت زیاد در جداره فولادی استفاده کرد.

۳- با توجه به نتایج ناشی از مدلسازی چنین ستونهایی توسط روش اجزای محدود و مقایسه نتایج با نتایج ناشی از مطالعات آزمایشگاهی، این نتیجه حاصل شد که به‌کارگیری

۱- پرکردن مقاطع فولادی توخالی، با بتن موجب افزایش ظرفیت باربری ستونها می‌شود. میزان افزایش ظرفیت رابطه مستقیم با نسبت شرکت پذیری بتن دارد. یعنی هر چه نسبت سطح یا مقاومت بتن بیشتر باشد، افزایش ظرفیت در اثر پرشدن با بتن نیز بیشتر است.

۲- بتن از کماتش موضعی به‌طرف داخل جداره فولادی



۵- پیشنهاد می‌شود مطالعات آزمایشگاهی به منظور تعیین پیوستگی بین بتن هسته و جداره داخلی مقطع فولادی انجام گیرد.

یک مدل اجزای محدود مناسب از این ستونها، می‌تواند میزان ظرفیت باربری آنها را با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی کند.  
۴- از بین همه عواملی که در افزایش میزان ظرفیت نهایی ستونهای قوطی فولادی تاثیر دارند، یکی پر کردن قوطی فولادی با بتن، حتی با کمترین مقاومت فشاری، و دیگری استفاده از فولادهای با مقاومت بالا، اثرات چشمگیری در افزایش ظرفیت نهایی ستونهای مورد بحث از خود نشان می‌دهند.

## مراجع

- ۱- فخری، ص. ر.، " بررسی تجربی رفتار ستونهای فلزی پر شده با بتن (مختلط) و اتصالات مربوطه"، پروژه کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران. تیرماه ۱۳۷۵.
- ۲- مقصودی، ع. ا.، طرح شکل پذیری سازه‌های بتن مسلح (ویژه مناطق زلزله خیز)، انتشارات دانشگاه باهنر کرمان، ۱۳۷۵.
- ۳- ذاکر استقامتی، ع.، "آنالیز و طراحی ستونهای بتنی جعبه‌ای دارای بتن با مقاومت بالا، اولین کنفرانس بین المللی ایمن سازی و بهسازی سازه‌ها، دانشگاه امیرکبیر، اردیبهشت ۱۳۸۱
- ۴- عباسی، م.، "بررسی خزش و جمع‌شدگی در بتن‌های با مقاومت بالا"، کنفرانس بین المللی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۰.
5. Xi-min, Shen, Guanzao-Tang, Bingguan-zhao, " Building with Concrete-Filled Steel Columns," *Batiment International Building Research and*

- Practice*, Vol.11, No.5, pp. 311-316,1983.
6. Yasser M.Hunaiti, "Bond Strength in Battend Composite Columns," *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.3, pp. 699-714,1991.
7. Ansys 5.4 Soft Ware, Help Section, Analysis Guide and Theory Manual.
8. Brian Uy, " Local and Post-local Buckling of Concrete-Filled Steel Welded Box Columns," *Journal of Constructional Steel Research*, No.47, pp. 47-72,1998.
9. Stephen P. Schneider, " Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No.10, pp.1125-1138,1998.
10. Brian Uy, " Strength of Concrete-Filled Steel Box Columns Incorporating Local Buckling," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No.3, pp. 341-352,2000.
11. AISC, "Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings," *American Institute of Steel Construction*, Chicago, 1994.