

## استفاده از مدل بست و بند جهت طراحی پایه پل تک ستون بتن آرمه با طره دو طرفه

آناهیتا آژنگ \*

کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

داود مستوفی نژاد

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

رضا مرشد

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

### چکیده

در پل‌ها گاهی به دلیل محدودیت‌های محیط احداث و یا به منظور زیبایی، از پایه‌های تک ستونه (سرچکشی) استفاده می‌شود. در این اعضا به دلیل ناپیوستگی‌های هندسی و یا بارهای وارده، نواحی وجود دارد که توزیع تنش در آن‌ها به صورت آشفته است و طراحی آن‌ها به توجه ویژه‌ای نیاز دارد. از راه کارهای ساده، مؤثر و نسبتاً جدید طراحی این گونه نواحی در سازه‌های بتن آرمه، استفاده از مدل بست و بند می‌باشد. با استفاده از این مدل می‌توان نواحی دارای وضعیت توزیع آشفته تنش در سازه‌های بتنی را با مجموعه‌ای از اعضای فشاری، کششی و گره‌ها معادل سازی و سپس تحلیل و طراحی نمود. در این مطالعه با استفاده از روش حل الاستیک، سه مدل بست و بند برای یک نمونه پایه پل تک ستونه ارائه و نمونه با استفاده از آن‌ها طراحی شده است. جهت ارزیابی عملکرد نتایج طراحی در باربری و شکل پذیری، از تحلیل غیر خطی در نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که نمونه‌های طراحی شده با استفاده از این مدل، از مقاومت و شکل پذیری کافی برخوردار هستند. به علاوه، با وجود این که این روش طراحی به عنوان یک روش حل کران پایین شناخته شده است، به طرحی دست یافته شده که نه تنها نسبت به طرح‌های حاصل از مدل‌های متداول بست و بند حدود ۳۵ درصد صرفه‌ی اقتصادی دارد، بلکه نسبت به طراحی معمولی به روش مقاومت نهایی نیز حدود ۲۹ درصد کاهش در میزان آرماتور مصرفی گزارش می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدل بست و بند، پل‌های بتن آرمه، پایه پل تک ستونه، پایه پل سرچکشی، تیر سرستون.

\* نویسنده مسئول: azhang.anahita@yahoo.com

## ۱- مقدمه

ایشان در همین سال تحقیق دیگری را به منظور بررسی مدل بست و بند قاب‌های پرتال پل‌های بتن آرمه ترتیب دادند [۸]. در سال ۲۰۱۳ نیز کارسیک و همکارانش به منظور افزایش طول عمر پایه‌های پل در برابر اثرات مخرب واکنش قلیایی-سیلیسی، از مدل بست و بند سازگاری استفاده کردند [۹]. البته استفاده از این روش طراحی کارا در دیگر اعضای پل‌های بتن آرمه از جمله شاه‌تیرهای جرثقیلی [۱۰]، نواحی مهاري در پل‌های پیش‌تنیده [۱۱]، عرشه پل تحت اثر بار افقی [۱۲ و ۱۳]، اتصالات طولی پل‌های شاه‌تیری [۱۴] و ... نیز مشهود است.

در این پژوهش ضمن شرح مختصر ضوابط مدل بست و بند بر اساس آیین‌نامه طراحی پل آمریکا [۵]، و مبانی مختصری از مدل‌سازی المان محدود، نمونه‌ای از یک پایه پل تک ستونه آورده شده است. سپس چند نمونه مدل بست و بند جهت طراحی آن پیشنهاد، و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، عملکرد نتایج حاصل از طراحی هر مدل در باربری و شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها نیز با تعریف شرایط کیفی و کمی به مقایسه آن‌ها پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های طراحی شده با استفاده از این مدل از مقاومت و شکل‌پذیری مناسبی برخوردار بوده و حتی حدود ۵۰ الی ۱۰۰ درصد در جهت اطمینان رفتار می‌کنند. همچنین با وجود این که مدل بست و بند یک روش طراحی کران پایین است، در این مورد با انتخاب مدل‌های بست و بند مناسب، به طرحی دست یافته شده که حتی نسبت به روش‌های طراحی معمولی، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.

## ۲- مبانی مدل بست و بند بر اساس آیین‌نامه‌ی AASHTO

مدل بست و بند شامل سه جزء، اعضای فشاری (بست)، اعضای کششی (بند) و نقاط گرهی می‌باشد. انتقال بار توسط این اجزا انجام می‌پذیرد و مقاومت هر جزء در مقاومت مدل تأثیرگذار است. در این حالت، سازه بتنی تحت اثر بارهای ضریب‌دار تحلیل و طراحی می‌شود. رابطه طراحی زیر نیز می‌بایست تحت اثر بارهای نهایی وارد بر مدل، برقرار باشد:

$$F_u \leq \phi F_n \quad (1)$$

پایه‌های میانی پل‌ها می‌توانند به صورت قاب خمشی تک ستونه یا چند ستونه و یا دیواری باشند. در سیستم قاب خمشی به منظور زیبایی و یا محدودیت‌های محیط احداث، گاهی فقط از یک پایه استفاده می‌شود، که البته این پایه‌ها در مقابل زلزله آسیب‌پذیرتر هستند. در این اعضا به دلیل ناپیوستگی‌های هندسی و یا بارهای وارده، نواحی وجود دارد که توزیع تنش در آن‌ها به صورت آشفته است. بنا بر اصل سنت و نانت، گسترده‌گی تنش در نواحی مختلف یک سازه متفاوت است. در نواحی که نزدیک بار یا تکیه‌گاه، ناپیوستگی‌های هندسی و یا ترکیبی از این‌ها قرار دارند، توزیع تنش به صورت آشفته می‌باشد (اصطلاحاً این نواحی با نام نواحی D، شناخته می‌شوند)؛ و در مناطق دورتر تنش توزیع یکنواختی پیدا می‌کند (نواحی B). طبق این اصل برای دست‌یابی به توزیع تنش یکنواخت، می‌بایست به اندازه ارتفاع مقطع از ناپیوستگی‌های هندسی و یا نیروها فاصله بگیریم [۱]. طراحی نواحی D به توجه ویژه‌ای نیاز دارد، تا طراحی به شیوه دقیق‌تری صورت پذیرد و سازه از مقاومت و شکل‌پذیری کافی برخوردار باشد. از راهکارهای ساده، مؤثر و نسبتاً جدید طراحی این نواحی، در اعضای بتن آرمه، استفاده از مدل بست و بند می‌باشد. مدل بست و بند که به آن سیستم تعادلی نیز گفته می‌شود [۲]، یک راه حل کران پایین از تحلیل حدی است. بر اساس این مدل که در سال ۱۹۸۰ در آیین‌نامه کانادا، پس از آن در آیین‌نامه AASHTO [۳]، در سال ۲۰۰۲ میلادی در پیوست A آیین‌نامه ACI 318 [۴]، و سرانجام در سال ۲۰۱۴ در متن اصلی آیین‌نامه ACI 318 [۵] مطرح شده است، می‌توان نواحی دارای وضعیت توزیع آشفته تنش در سازه‌های بتنی را با مجموعه‌ای از اعضای فشاری، کششی و گره‌ها معادل‌سازی و سپس تحلیل و طراحی نمود [۶]. این روش طراحی در عین سادگی، از دقت بالایی برخوردار بوده و قابلیت استفاده برای سازه‌های با هندسه پیچیده را نیز دارد. البته این روش یک مسیر فلوچارتی برای حل مسئله در اختیار ما قرار نمی‌دهد، و شکل مدل و ابعاد مقاطع نیاز به قضاوت مهندسی داشته و به تجربه و مهارت طراح باز می‌گردد.

سریساران و همکاران در سال ۲۰۰۳، پیرو مطالعات گذشته خود پژوهشی به منظور تحلیل اتصالات پل‌های بتن آرمه با استفاده از مدل بست و بند انجام داده، و روش انتقال نیرو را پیشنهاد کردند [۷].

$$\frac{A_v}{b_w s_v} \geq 0.003 \quad \text{و} \quad \frac{A_h}{b_h s_h} \geq 0.003 \quad (5)$$

که در آن  $b_w$  ضخامت عضو،  $A_v$  و  $A_h$  به ترتیب سطح مقطع کل آرماتورهای عمودی و افقی و  $s_v$  و  $s_h$  به ترتیب فاصله آرماتورهای عمودی و افقی از یکدیگر می‌باشند.

## ۲-۲- اعضای کششی

تأمین مقاومت اعضای کششی تنها بر عهده آرماتورهای کششی طولی است و مقاومت اسمی آن‌ها با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F_{nt} = f_y A_{st} \quad (6)$$

حصول این مقاومت کششی منوط به تأمین طول مهار مناسب آرماتورها در گره‌های انتهایی عضو است. طول مهار مورد نیاز در شرایط مختلف را می‌توان با استفاده از بند ۴-۲-۱۱-۵ آیین‌نامه آشتو [۳] محاسبه نمود.

## ۳-۲- نواحی گرهی

آیین‌نامه بتن آمریکا [۵]، مناطق گرهی را با توجه به نیروهای کششی و فشاری وارده بر آن، به سه گروه زیر تقسیم می‌کند:

- گره C-C-C: تمام اعضای وارد شده به این گره فشاری هستند.
- گره C-C-T: یک عضو کششی به گره وارد شود.
- گره C-T-T: تعداد دو یا بیشتر عضو کششی به گره وارد شود.

طبق بند ۵-۶-۳-۵ آیین‌نامه‌ی آشتو [۳]، مقدار تنش فشاری بتن در نواحی گرهی نباید از مقادیر زیر تجاوز کند:

$$\text{- برای گره (C-C-C): } 0.85\phi f'_c$$

$$\text{- برای گره (C-C-T): } 0.75\phi f'_c$$

$$\text{- برای گره (C-T-T): } 0.65\phi f'_c$$

## ۴-۲- روش‌های تعیین مدل بست و بند

باید توجه داشت که یک مدل بست و بند بهینه مطلق برای یک مسئله خاص وجود ندارد. تنوع در زمینه تعیین مدل بست و بند را نمی‌توان عیب این روش طراحی به حساب آورد، حتی می‌توان مدعی شد که این موضوع یک از ویژگی‌های مثبت مدل بست و بند است، که به طراح اجازه انتخاب مدل‌های متفاوت می‌دهد. بی‌شک این روش یک ابزار قوی برای طراحی نواحی کرنش آشفته می‌باشد؛ و می‌توان گفت که مدل صحیح یا غلط وجود ندارد، اما مدل خوب و بد وجود دارد. روش‌های پیشنهادی برای دستیابی به یک مدل ایده‌آل و منطقی عبارت‌اند از:

که در این رابطه  $F_n$  نیروی نهایی ایجاد شده در اجزای مدل،  $F_n$  مقاومت اسمی اجزای مدل است که به‌طور خلاصه نحوه محاسبه آن در ادامه آورده شده، و  $\phi$  نیز ضریب کاهش مقاومت است که مقادیر آن مطابق جدول زیر می‌باشد.

جدول ۱- ضرایب کاهش مقاومت [۳]

موارد کاربرد	ضریب کاهش مقاومت ( $\phi$ )
اعضای فشاری در مدل بست و بند	۰/۷
تکیه‌گاه‌ها و گره‌ها	۰/۷
مقاطع بتن آرمه در حالت کشش- کنترل	۰/۹

## ۱-۲- اعضای فشاری

طبق بند ۳-۳-۵ آیین‌نامه آشتو [۳]، مقاومت اسمی این اعضا برای کنترل نامساوی (۱) از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید:

$$F_n = f_{cu} A_{cs} \quad (2)$$

$$f_{cu} = \frac{f'_c}{0.8 + 170\varepsilon_1} \leq 0.85f'_c \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s + (\varepsilon_s + 0.002)cot^2\alpha_s \quad (4)$$

که در این روابط  $f_{cu}$  مقاومت حدی فشاری بتن است که طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود،  $\varepsilon_s$  کرنش کششی بتن در راستای عضو کششی،  $\alpha_s$  کوچک‌ترین زاویه‌ی میان بست مورد نظر و بندهای مجاور آن و  $A_{cs}$  سطح مقطع مؤثر اعضای فشاری است که طبق بند ۲-۳-۳-۵ آیین‌نامه آشتو [۳]، محاسبه می‌شود.

بست‌ها دارای اشکال مختلفی هستند؛ که آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا [۵]، آن‌ها را در سه گروه بست‌های منشوری، بادبزی و بطری شکل دسته‌بندی می‌کند. به بست‌هایی که عرض بتن تحت فشار ناحیه میانی آن‌ها، فضا برای گسترش بیشتر دارد، بست‌های بطری شکل گفته می‌شود. قابل ذکر است که گسترش جانبی نیروهای فشاری داخلی در بست‌های بطری شکل، می‌تواند باعث ایجاد شکاف به موازات محور عضو فشاری در نزدیکی دو انتهای آن شود. بدین منظور لازم است که سازه‌ها و ملحقات آن که با استفاده از این مدل طراحی می‌شوند، دارای یک شبکه آرماتور به‌منظور کنترل ترک باشند و فاصله بین آن‌ها نباید از  $\min\{\frac{d}{4}, 300\text{ mm}\}$  تجاوز کند (d ارتفاع مؤثر مقطع)؛ و در جهات افقی و عمودی باید روابط زیر را ارضا کنند [۳].

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f'_c} \quad (8)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (9)$$

مقادیر پارامترهای پلاستیسیته بتن استفاده شده عبارتند از: زاویه اتساع ۳۱ درجه، خروج از مرکزیت به پیشنهاد راهنمای نرم‌افزار برابر ۰/۱، نسبت تنش فشاری حداکثر دو محوره به تک محوره برابر با ۱/۱۶، پارامتر  $k_c$  برابر ۰/۶۷ و ویسکوزیته نیز برابر با ۰/۰۰۰۵.

الف) منحنی تنش- کرنش فشاری تک محوره بتن

از معروف‌ترین و پراستفاده‌ترین روابط تجربی، برای رابطه تنش- کرنش بتن در فشار، رابطه درجه دوم هاگنستاد<sup>۲</sup> می‌باشد که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۱۸].

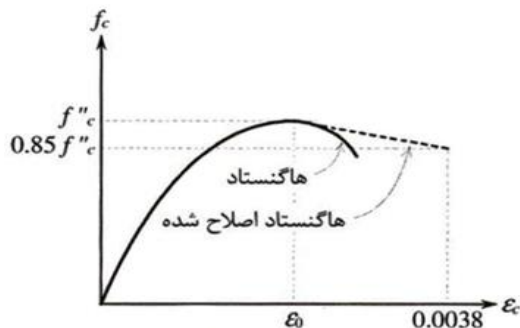
$$f_c = f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$\varepsilon_0$  کرنش نظیر تنش حداکثر است، که بسته به مقاومت بتن در محدوده ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۳ قرار می‌گیرد.

در این مطالعه از منحنی هاگنستاد اصلاح شده استفاده شده است؛ که همان منحنی هاگنستاد است که شاخه نزولی آن خطی است که از نقطه  $(\varepsilon_0, f'_c)$  تا نقطه  $(\varepsilon_u, 0.85f'_c)$  امتداد دارد. مقدار  $\varepsilon_u$  متناظر با کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن است، که برای انواع بتن از ۰/۰۰۳ تا بالاتر از ۰/۰۰۵ گزارش شده و در این مطالعه برای نمونه‌های محصور نشده مقدار آن برابر ۰/۰۰۳۸ لحاظ شده است. در شکل زیر سهمی هاگنستاد و هاگنستاد اصلاح شده نمایش داده شده است.

لازم به ذکر است آیین نامه بتن آمریکا برای بتن معمولی با وزن مخصوص حدود ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، رابطه زیر را برای مدول الاستیسیته پیشنهاد می‌کند [۵].

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (11)$$



شکل ۱- منحنی تنش-کرنش هاگنستاد و هاگنستاد اصلاح شده

برای رفتار بتن در فشار [۱۸]

۱- استفاده از مدل‌های مشابه و معمول

۲- توسعه مسیر بار: این روش نیاز به تجربه و درک مستقیم از این موضوع دارد که چگونه نیروهای داخل یک ناحیه‌ی کرنش آشفته به جریان می‌افتد.

۳- الگوهای ترک مناسب: تنش‌های فشاری اصلی موازی ترک‌ها می‌باشند، زیرا تنش‌های کششی اصلی که سبب ایجاد ترک می‌شوند، همیشه عمود بر تنش‌های فشاری اصلی هستند.

۴- حل الاستیک: این روش توسط اشلاچ و همکاران در سال ۱۹۸۷ مطرح شد، این روش بر این فرض بنا شده است که اگر مدل بست و بند مطابق با توزیع تنش الاستیک شکل بگیرد، هر دو حالت حد نهایی و خدمت‌پذیری نواحی آشفته‌ی تنش ارضا شده است. باید توجه داشت که برای چیدمان اعضا حداکثر انحراف با حل الاستیک نباید بیش از ۱۵ درجه باشد [۱۵]. در این مطالعه نیز به منظور دست‌یابی به مدل مناسب از این ایده استفاده شده است.

۵- کمینه کردن انرژی کرنشی: برای تعیین مدل مناسب، استفاده از این نکته مؤثر است که بارها برای انتقال به تکیه‌گاه خواهان استفاده از مسیری (مدلی) با کم‌ترین نیرو و تغییر شکل می‌باشند. از آنجایی که اعضای کششی شکل‌پذیری بیشتری نسبت به اعضای فشاری بتنی دارند، مدل با کم‌ترین و کوتاه‌ترین اعضای کششی بهترین می‌باشد [۱۵]. که این معیار ساده را می‌توان برای تعیین مدل بهینه به شکل زیر فرمول‌بندی نمود:

$$\sum F_i L_i \varepsilon_i = \text{minimum} \quad (17)$$

که در آن  $F_i$  نیروی اعضای کششی یا فشاری،  $L_i$  طول اعضای فشاری و کششی،  $\varepsilon_i$  کرنش عضو می‌باشد.

### ۳- مدل سازی المان محدود

جهت تحلیل و بررسی نمونه‌های طراحی شده در این تحقیق، از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، استفاده شده است.

#### ۳-۱- مشخصات بتن

برای شبیه‌سازی بتن در نرم‌افزار از مدل رفتاری بتن آسیب دیده<sup>۱</sup> استفاده شده است. این مدل بر پایه مدل ارائه شده توسط Lubliner و اصلاح شده به وسیله Lee و Fenves قرار دارد [۱۷ و ۱۶]. در این مقاله مدل آسیب به صورت زیر می‌باشد:

<sup>۲</sup> Hognestad

<sup>۱</sup> Concrete damaged plasticity

### ۲-۳- مشخصات فولاد تسلیح

برای تعریف قسمت خطی مصالح از خصوصیات الاستیک موجود در کتابخانه نرم افزار ABAQUS استفاده می شود [۱۹]. در این مطالعه مدول الاستیسیته فولاد برابر  $2 \times 10^5$  MPa و نسبت بواسون  $0.3$  استفاده شده است. برای مدل سازی میلگردها در نرم افزار ABAQUS، میلگردها به صورت المان های مجزا مدل شده و درجات آزادی میلگرد با بتن بسته می شود. برای یکسان کردن درجات آزادی میلگرد و بتن نیز از قابلیت Embedded در نرم افزار استفاده شده است.

### ۳-۳- مشخصات المان ها در مدل سازی

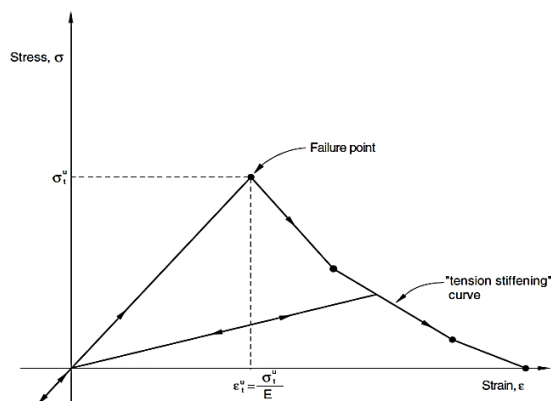
برای بتن از المان های مکعبی هشت گره ای C3D8R و برای مدل سازی آرماتورها از المان های تیری B31 استفاده شده است.

### ۴-۳- صحت سنجی

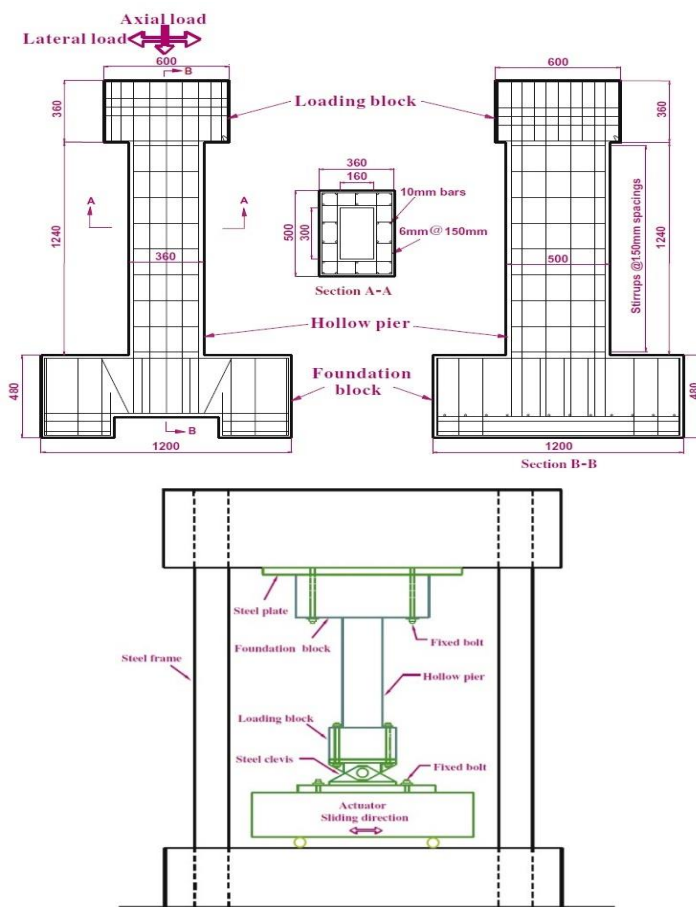
نمونه ای که برای صحت سنجی نرم افزار انتخاب شده، یک پایه پل بتن آرمه، با مقطع مستطیل توخالی است، که ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ به بررسی عملکرد آن تحت بار چرخه ای پرداختند [۲۰]. هندسه این پایه در شکل ۳ آورده شده است.

(ب) منحنی تنش- کرنش کششی بتن

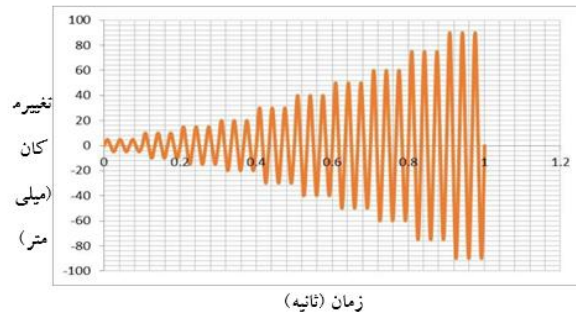
نرم افزار به طور اتوماتیک ناحیه ی قبل از ترک خوردگی را خطی فرض می کند و کاربر باید ناحیه ی پس از ترک خوردگی را که معرف اثرات سخت شدگی کششی نیز هست بر حسب کرنش ترک خوردگی معرفی کند. در راهنمای نرم افزار توصیه شده است که تنش در کرنشی حدود ۱۰ برابر کرنش ترک خوردگی برابر صفر در نظر گرفته شود [۱۹].



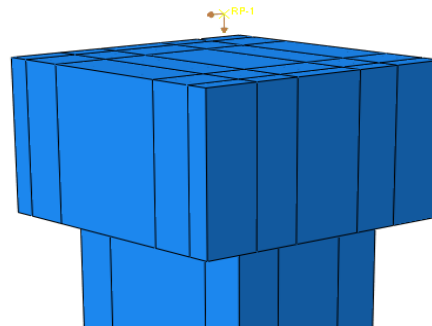
شکل ۲- منحنی تنش-کرنش بتن در کشش [۱۹]



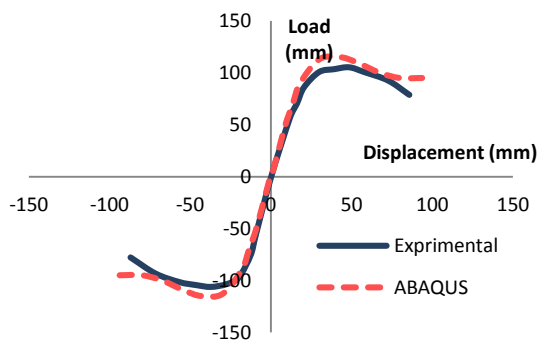
شکل ۳- هندسه و نحوه ی آرماتورگذاری پایه ی پل انتخابی و نمایش شماتیک دستگاه آزمایش [۲۰]



شکل ۴- پروتکل حرکت چرخه‌ای اعمالی [۲۰]



شکل ۵- محل نقطه‌ی در نظر گرفته شده برای بارگذاری نمونه



شکل ۶- مقایسه نمودارهای پوش استخراج شده

#### ۴- مشخصات نمونه

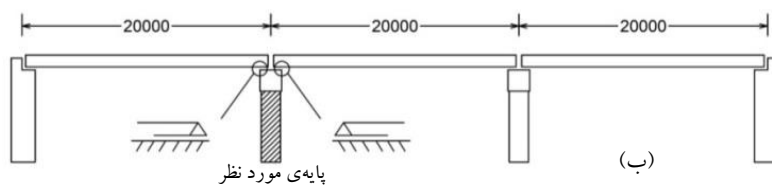
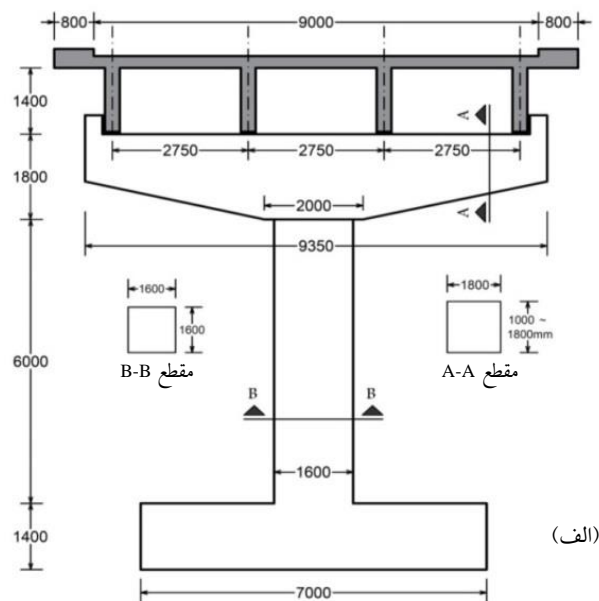
جزئیات هندسی و بارگذاری نمونه در اشکال ۷ تا ۹ آورده شده‌اند. بارهایی که در این اشکال نمایش داده شده‌اند، بارهای بدون ضریب هستند. برای ضریب دار کردن این بارها باید سایر ترکیبات بارگذاری مربوطه در نظر گرفته شوند. در این نمونه چون سازه معین است به راحتی می‌توان ترکیب بارهای بحرانی را تشخیص داد؛ این ترکیبات عبارتند از  $(1.25DC + 1.75LL)$ ،  $(0.9DC + 0.5BR + EQ)$ ،  $(0.9DC + 0.5LL - EQ)$ .

ترکیب اول برای طراحی تیر سرستون، ترکیب دوم برای طراحی ستون در راستای عرضی پل و ترکیب سوم برای طراحی ستون در راستای طولی پل حالت بحرانی تری ایجاد می‌کند.

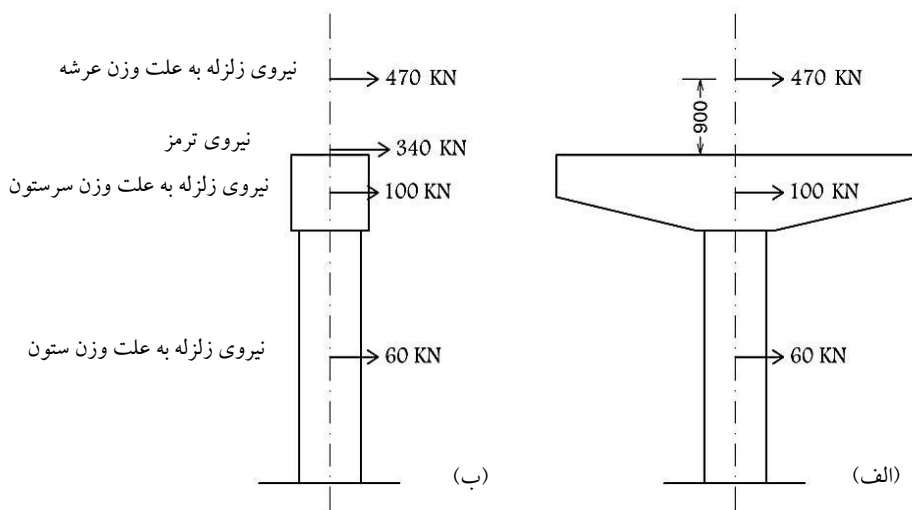
این نمونه مطابق شکل به صورت وارونه بین دو فک دستگاه قرار می‌گیرد، در مرحله اول یک نیروی فشاری معادل ۵۱۰ کیلونیوتون، توسط فک پایین دستگاه به بلوک بارگذاری وارد شده و دستگاه طوری تنظیم می‌شود، که این فشار تا انتهای آزمایش ثابت بماند؛ پس از آن بلوک بارگذاری با روش تغییر مکان-کنترل تحت یک حرکت چرخه‌ای که پروتکل آن در شکل ۴ آورده شده است، قرار می‌گیرد. این نمونه با همین مشخصات در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است، با این تفاوت که به دلیل نداشتن اطلاعات کافی در مورد آرما تورگذاری فنداسیون، نمونه بدون فنداسیون در نرم افزار مدل و سطح پایینی آن به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. برای این که مدل نرم‌افزاری شباهت بیشتری به نمونه آزمایشگاهی داشته باشد، جهت بارگذاری آن، یک نقطه‌ای در مرکز بلوک بارگذاری و با فاصله‌ی ۱۰ سانتی متری از سطح آن در نظر گرفته شده، به سطح بالایی بلوک بارگذاری صلب شده و بارگذاری و سیکل مورد نظر به آن نقطه اعمال شده است.

با مقایسه پوش اور حاصل از تحلیل نرم‌افزاری نمونه با پوش اور تجربی آن در شکل ۶، می‌توان دریافت که نتایج مدل‌سازی المان محدود انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

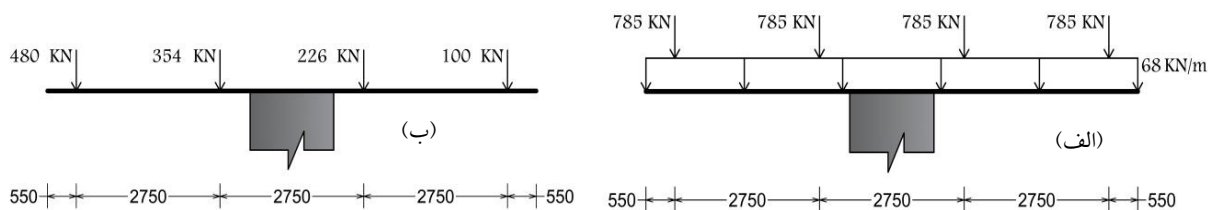
استفاده از مدل بست و بند جهت طراحی پایه...



شکل ۷- هندسه و موقعیت پایه مورد نظر؛ الف) ابعاد و هندسه؛ ب) موقعیت پایه در طول پل [۲۱]



شکل ۸- وضعیت تیر سرستون از لحاظ بارهای ثقلی؛ الف) بارهای مرده؛ ب) بار زنده [۲۱]

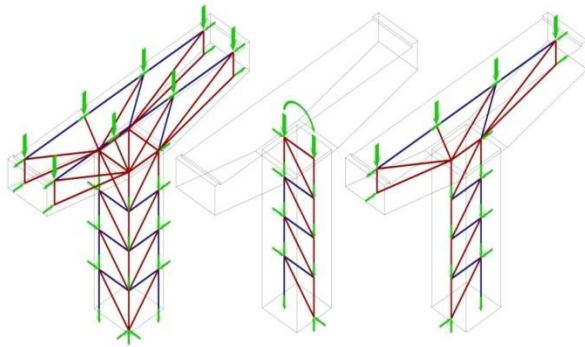


شکل ۹- بارهای جانبی وارد بر پایه؛ الف) بارهای جانبی وارد در جهت عرضی پل؛ ب) بارهای جانبی وارد در جهت طولی پل [۲۱]

## ۵- پیشنهاد مدل، طراحی، تحلیل و بررسی نمونه

### ۱-۵- پیشنهاد مدل بست و بند

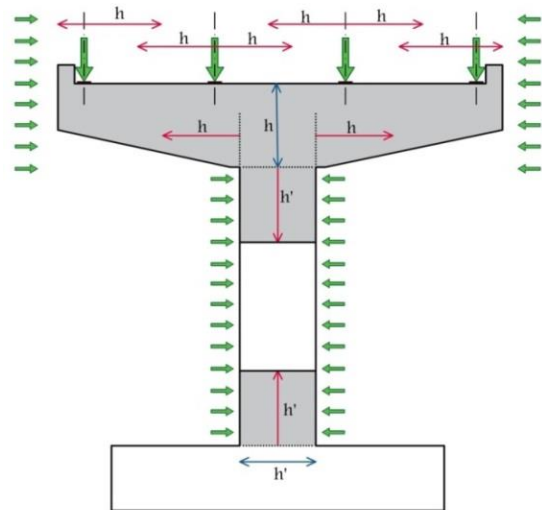
به منظور پیشنهاد مدل بست و بند اولین گام تعیین نواحی آشفته تنش است، برای تعیین این نواحی، بایستی به اندازه ارتفاع عضو از عامل ایجاد کننده آشفتهگی فاصله گرفت [۵]. در شکل زیر این نواحی مشخص شده اند.



شکل ۱۱- مدل بست و بند سه بعدی پایه پل سرچکشی و

تفکیک آن به دو مدل مجزای دو بعدی

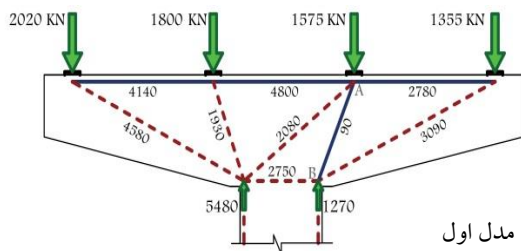
به منظور ارائه مدل های بست و بند، با حل الاستیک نمونه توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS، کانتورهای تنش الاستیک استخراج و بر اساس آن، سه مدل زیر جهت طراحی نمونه ارائه شده اند. کانتور تنش الاستیک نیز در شکل ۱۳ آورده شده است.



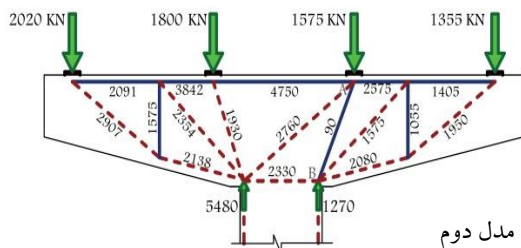
شکل ۱۰- نمایش نواحی D در پایه ی پل سرچکشی

همان طور که در این شکل پیداست، کل تیر سرستون و قسمتی از ستون دچار آشفتهگی تنش هستند. بنابراین مدل بست و بند تنها برای تیر سرستون و ناحیه اتصال استفاده می شود. اما چون طول ستون تیر زیاد است، و از آن جایی که مدل بست و بند یک روش کران پایین است، استفاده از آن برای طراحی ستون صرفه اقتصادی ندارد؛ مگر در حالتی که طول ستون کوتاه باشد. در ستون های کوتاه نیز به راحتی با تشکیل یک مدل بست و بند ساده می توان عضو را طراحی نمود. عموماً در حضور کوله ها، پایه های میانی تنها برای زلزله ی عرضی طراحی می شوند. با این وجود در صورتی که نیاز به طراحی ستون در هر دو جهت باشد، با یک مدل بست و بند سه بعدی خیلی ساده مواجه خواهیم شد، که به راحتی قابلیت تفکیک به دو مدل مجزا و حل جداگانه را خواهد داشت. در شکل ۱۱ مدل بست و بند سه بعدی برای طراحی نمونه ی پیش رو ترسیم شده است.

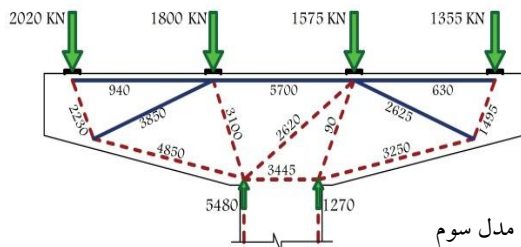
در مدل سوم سعی بر این بوده که اعضای فشاری موجود در مدل، به موازات سطح نمونه قرار گیرند، تا بدین وسیله از شکل گیری اعضای بطری شکل جلوگیری به عمل آمده و بتوان آرماتورهای



مدل اول



مدل دوم



مدل سوم

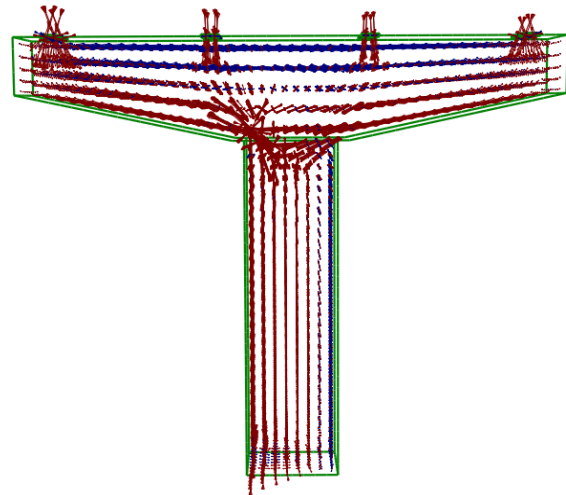
شکل ۱۲- مدل های بست و بند ارائه شده برای طراحی تیر

سرستون نمونه



استفاده از مدل بست و بند جهت طراحی پایه...

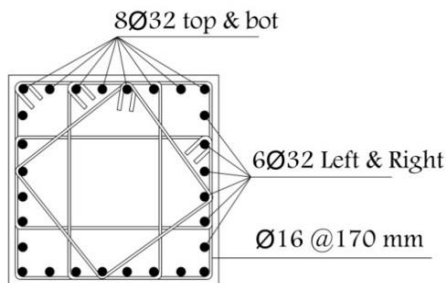
آیین نامه AASHTO [۳]، برابر با ۰/۸۴ درصد سطح مقطع کل است، برای فولاد گذاری ستون استفاده شده است. دتایل آرماتور گذاری ستون در شکل ۱۴ آورده شده است. با استفاده از مدل های ارائه شده در شکل ۱۳ نیز، تیر سرستون بر اساس ضوابطی که پیش تر آورده شد، طراحی و طریقه ی آرماتور گذاری آن در شکل ۱۵، نشان داده شده است. نتایج طراحی نشان می دهد که مدل اول و دوم طراحی یکسانی دارند. دلیل این امر طول کوتاه سرستون و محدودیت در قطع آرماتورها است. در هر حال چون طول سرستون در پایه های تک ستونه، عموماً بیش تر از این نمی باشد، نمی توان تفاوت چندانی بین دو مدل اول قائل شد. و در ادامه تنها مدل های اول و سوم با هم مقایسه می شوند.



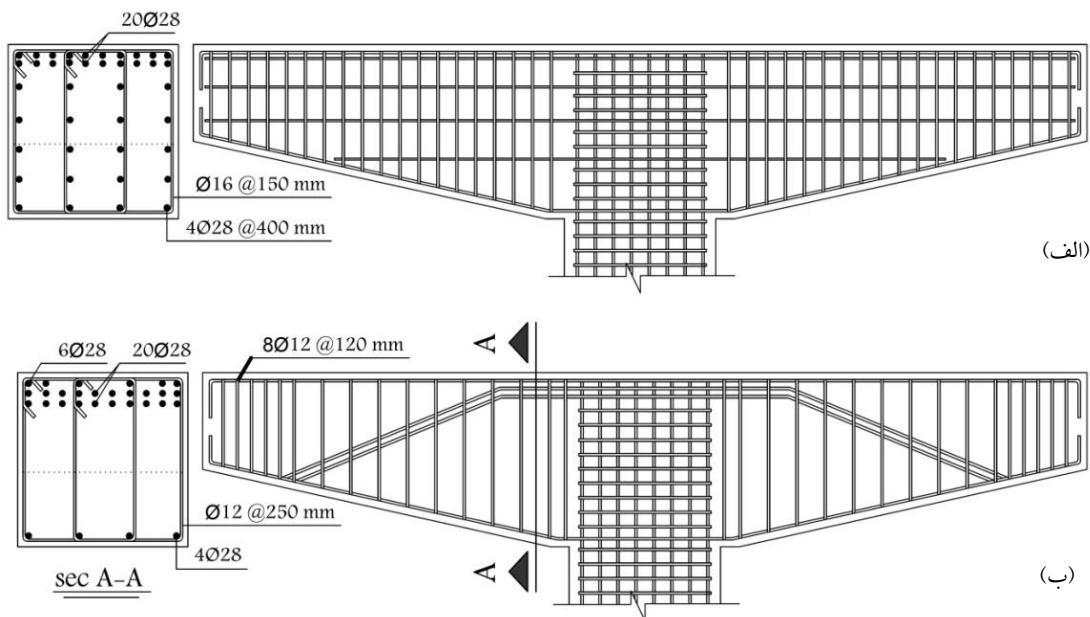
شکل ۱۳- کانتور تنش های اصلی فاز الاستیک تحت ترکیب بار (1.25DC+1.75LL)

### ۲-۵- طراحی نمونه

برای ستون هایی که ارتفاع قابل توجهی دارند، کافی ست طراحی ستون با روش های معمولی انجام گرفته و تنها در ناحیه اتصال کفایت آرماتور گذاری کنترل شود. در این مطالعه به منظور طراحی ستون ها از نرم افزار CSi Bridge 2015 و از روش طراحی LRFD استفاده شده است. البته در این نمونه به دلیل ابعاد بزرگ مقطع ستون، آرماتور مورد نیاز از مقدار حداقل آیین نامه ای کم تر خواهد بود و مقدار حداقل که در این مثال طبق بند ۲-۴-۷-۵



شکل ۱۴- دتایل آرماتور گذاری ستون پایه پل سر چکشی (با احتساب ۵۰ میلی متر پوشش بتنی)

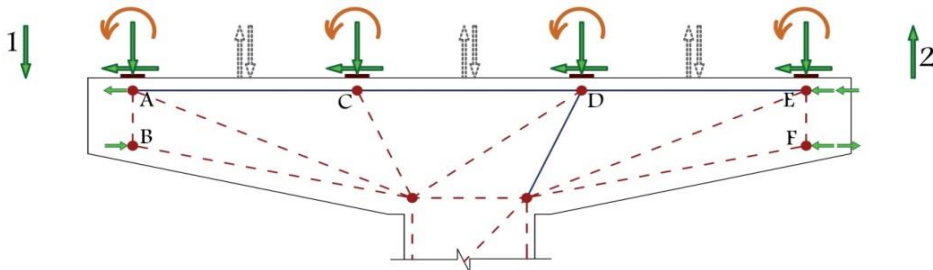


شکل ۱۵- دتایل آرماتور گذاری سرستون پایه پل سر چکشی؛ الف) طراحی بر اساس مدل اول و دوم؛ ب) طراحی بر اساس مدل سوم

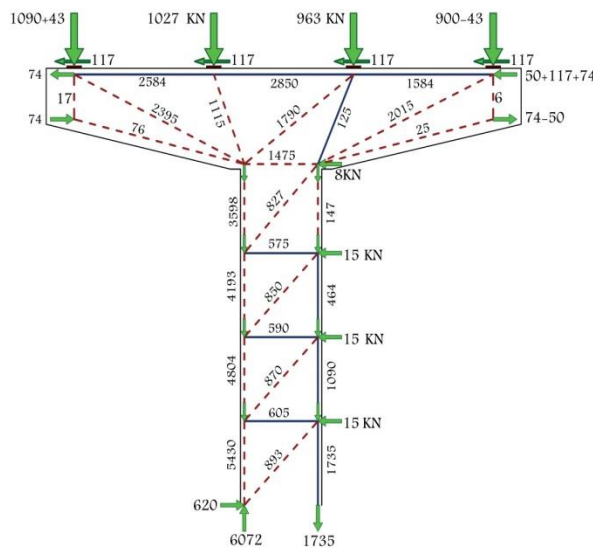
### بررسی کفایت ناحیه‌ی اتصال

این انتقال نیز باید بر روی گره قرار گیرد. این لنگرها به کوپل نیرو تبدیل شده، و در نهایت با حذف نیروهای برابر، تنها دو نیروی (۱) و (۲) باقی می‌مانند. از آنجایی که این نیروها نیز با عضو فاصله دارند، به نقاط A و E انتقال و لنگر ناشی از آنها نیز به صورت کوپل نیرو به نقاط B و A و C و B و E و F اعمال می‌شود. نیروی زلزله ناشی از وزن سرستون نیز به دو قسمت مساوی تقسیم و بر روی نقاط E و F قرار می‌گیرد. در مورد نیروی زلزله ناشی از وزن ستون نیز می‌توان این پیشنهاد را داد که حاصل ضرب وزن هر پانل در ضریب زلزله، به صورت نیروی جانبی بر روی نقطه میانی پانل قرار گیرد؛ خود وزن هر پانل نیز به صورت ثقلی بر روی همان گره‌ها اعمال شود.

ترکیب بار  $(0.9DC+0.5LL+EQ)$  لنگر بیش‌تری ایجاد کرده و لذا ناحیه اتصال باید برای انتقال لنگر و برش ناشی از آن کنترل شود. در این ترکیب بار علاوه بر بار ثقلی، بار جانبی نیز داریم و نکته دیگر این که نیروی زلزله ناشی از وزن عرشه با سطح تیر فاصله دارد. این در حالی است که برای استفاده از مدل بست و بند، این نیروها بایستی به صورت متمرکز به نقاط گره‌ی اعمال شوند. همان طور که در شکل ۱۶ نمایش داده شده است؛ فرض می‌شود که هر شاهتیری حامل سهم نیروی زلزله خود و لنگر ناشی از آن است، بدین منظور نیروی زلزله ناشی از وزن عرشه به چهار قسمت مساوی تقسیم و به گره‌های A و C و D و E منتقل می‌شود. لنگر ناشی از



شکل ۱۶- نحوه‌ی اختصاص نیروهای برشی به نقاط گره‌ی



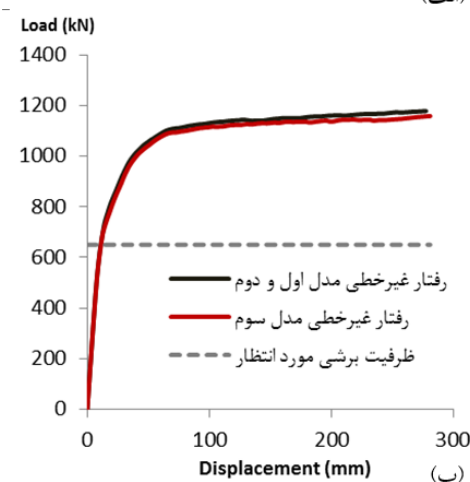
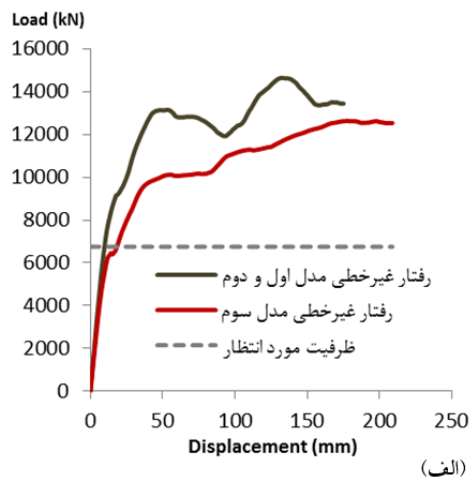
شکل ۱۷- انتقال کلیه‌ی نیروها در ترکیب بار  $0.9DC+0.5LL+EQ$  به تکیه‌گاه توسط مدل بست و بند

### ۵-۳- مدل سازی المان محدود و تحلیل غیر خطی

برای صحت‌سنجی مقاطع طراحی شده، مدل سازی و آنالیز غیر خطی نمونه، در سه مرحله انجام می‌گیرد. مرحله اول نمونه تنها

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، هرچند قسمتی از ستون تحت کشش قرار گرفته، ولی ناحیه اتصال هنوز تحت فشار است. بنابراین آرماتورگذاری موجود مناسب خواهد بود.

بخشیده است (با نزدیک تر شدن به انتهای طره، تنش های کششی خمشی کاهش می یابد و تمرکز میلگردها در بالای مقطع تأثیر شایانی ندارد). مجدداً هر دو نمونه دچار سخت شدگی مجدد می شوند و افزایش کرنش مجدد، با افزایش تنش همراه است.



شکل ۱۸- الف) نمودار برش تیر بر اساس تغییر مکان ماکزیمم تحت ترکیب بار (1.25DC+1.75LL)، ب) نمودار عکس العمل تکیه گاه در راستای قائم، تحت ترکیب بار (0.9DC+0.5LL+EQ)

به منظور تشخیص مدل مناسب تر، در جدول ۲ تفاوت های این دو مدل بررسی شده است. لازم به ذکر است که ضریب شکل پذیری، از تقسیم جابجایی نهایی به جابجایی متناظر با تسلیم آرماتورها، به دست می آید. همچنین جابجایی نهایی زمانی ثبت شده است که کرنش بتن در ناحیه فشاری به کرنش ترک خوردگی می رسد و به عبارتی بتن در فشار خرد می شود.

شاید قبل از طراحی و آنالیز، با مقایسه مقادیر مربوط به انرژی کرنشی این تفکر غلط ایجاد شود که مدل اول طراحی مناسب تری

تحت بارگذاری ثقلی (1.25DC+1.75LL) قرار گرفته و آنالیز می شود، پس از آن جابجایی ها در نقاط بارگذاری استخراج و این بار به جای اعمال فشار، به نمونه یک جابجایی مشخصی تحمیل می شود. مجدداً مدل آنالیز شده و نمودار نیروی محوری در تکیه گاه که معادل برش در تیر است، بر حسب ماکزیمم جابجایی نمونه ترسیم می شود. در مرحله دوم، بار ثقلی (1.25DC+LL) بر روی نمونه قرار گرفته و به جای اعمال بار جانبی، به سطح بالایی تیر یک جابجایی مشخصی اعمال و این بار نمودار برش تکیه گاه بر حسب ماکزیمم جابجایی ترسیم می شود، این مرحله به منظور بررسی رفتار ناحیه اتصال می باشد. مرحله سوم نیز مشابه مرحله قبل است، با این تفاوت که تغییر مکان جانبی در راستای طول پل به نمونه اعمال می شود.

منحنی های استخراج شده از این آنالیزها، در شکل ۱۸ آورده شده است.

با مشاهده این نمودارها، می توان دریافت که مدل بست و بند یک روش کران پایین و محافظه کارانه است. در تمامی این نمودارها، نمونه در طی بارگذاری رفتاری شکل پذیر دارد. تحت ترکیب بار غالب برشی نیز، هر دو مدل رفتار بسیار مشابهی دارند؛ که این ناشی از چیدمان یکسان آرماتور ستون در آنهاست. اما در نمودارهای حاصل از ترکیب بار ثقلی، که در واقع ترکیب بار غالب برای تیر سر ستون در این نمونه است، تفاوت رفتاری نمونه ها مشهود است. نمونه ها تا باری نزدیک به ظرفیت مورد انتظار رفتار مشابهی دارند؛ اما از آن پس از هم فاصله می گیرند. اولین نشانه از کاهش سختی و تسلیم شدن در نمونه سوم در باری حدود ۶۴۰۰ کیلو نیوتن اتفاق می افتد؛ اما نمونه اول در باری حدود ۹۰۰۰ کیلو نیوتن تسلیم می شود، که می توان علت این رفتار را در محصور شدگی بیش تر بتن در این نمونه جو یا شد. مجدداً دو نمونه با سختی مشابهی حدود ۴۰۰۰ kN، اضافه بار تحمل کرده و با حدود ۵۰ mm جابجایی، به اولین قله خود می رسند. پس از آن تفاوت رفتاری نمونه ها نمود بیش تری پیدا می کند؛ نمونه اول دچار افت مقاومت می شود؛ این در حالی است که جابجایی نمونه سوم بدون افزایش نیرو افزایش می یابد و یک مسیر افقی را طی می کند. این افت در نمودارها به علت کاهش سختی المان های بتنی اتفاق می افتد. به نظر می رسد که این ضعف در تحمل برش بوده و خم شدن آرماتورهای طولی در مدل سوم، ظرفیت برشی مقطع را بهبود

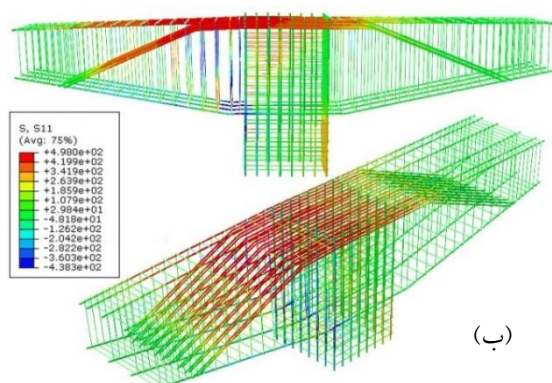
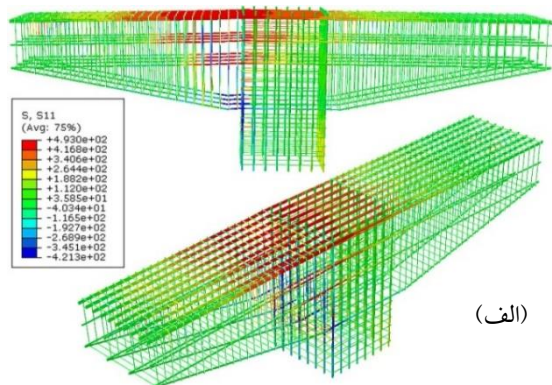
ارائه می‌دهد؛ اما طراحی و آنالیز نمونه‌ها حاکی از آن است که مدل سوم رفتار مناسب‌تر و بهینه‌تری دارد. همچنین باتوجه به مقادیر مربوط به پارامتر شکل پذیری، می‌توان دریافت که مدل سوم شکل پذیری بیش‌تری ارائه خواهد داد. در مورد بار نهایی نیز باید گفت که هرچند مقدار بار نهایی در نمونه‌ی اول بیش‌تر است، اما هر دوی این مدل‌ها محافظه‌کارانه هستند؛ به عبارتی اگرچه مقدار

عددی بار نهایی در مدل سوم نسبت به مدل اول کم‌تر است، اما هنوز هم از مقدار مقاومت مورد انتظار بیش‌تر است. علاوه بر این‌ها مدل سوم مقدار ۳۵ درصد کاهش در مقدار فولاد مصرفی نمونه ارائه می‌دهد؛ و این رقم در پل سازی رقم بسیار قابل توجهی است. پس می‌توان دریافت که تنها بررسی پارامتر انرژی کرنشی برای مقایسه مدل‌ها کافی نبوده و نیاز به بررسی بیش‌تری می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های اول و سوم

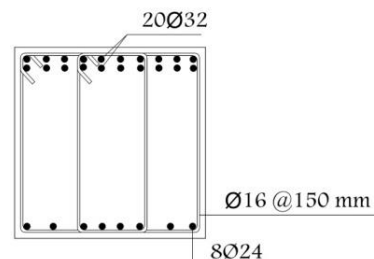
مدل	انرژی کرنشی (kN.m)	جابجایی نهایی (mm)	جابجایی تسلیم (mm)	شکل پذیری	بار نهایی (kN)	وزن میلگردها (kg)	عدد کارایی
مدل اول و دوم	۶۴/۷	۱۷۵	۱۷	۱۰/۳	۱۴۸۰۰	۲۳۴۰	۶/۳
مدل سوم	۷۲/۶	۲۲۵	۲۱	۱۰/۷	۱۲۰۰۰	۱۵۲۴	۷/۸

آرماتورها، در این لحظه استخراج و در شکل ۲۰ آورده شده است. با مشاهده این شکل می‌توان این‌گونه استنباط کرد، که در نمونه سوم، آرماتورهای طولی در نواحی بیش‌تری دچار تسلیم شده و نمونه در واقع شکست نرم‌تری را تجربه کرده است.



شکل ۲۰- تنش ایجاد شده در راستای آرماتورها در لحظه‌ی خرابی؛ (الف) نمونه‌ی طراحی شده براساس مدل اول؛ (ب) نمونه‌ی طراحی شده براساس مدل سوم

نکته دیگری که باید خاطر نشان شود این است که، گاهی تصور می‌شود مدل بست و بند روشی غیر اقتصادی است. مقطع طراحی شده تیر با استفاده از روش مقاومت نهایی در شکل ۱۹ آمده است. وزن فولاد تسلیح این طرح برابر با ۲۱۵۲ کیلوگرم است. به عبارتی مدل سوم نسبت به طراحی معمولی نیز ۲۹ درصد کاهش مصرف فولاد ارائه می‌دهد. بنابراین نمی‌توان در مورد غیراقتصادی بودن یا نبودن مدل بست و بند نظر قطعی داد. در واقع هنر مدل بست و بند در چیدمان مناسب فولادهای تسلیح می‌باشد. در تعدادی از مراجع به منظور مقایسه مدل‌های پیشنهادی برای یک نمونه و تعیین مدل بست و بند مناسب و بهینه، به مقایسه‌ی نسبت بار نهایی به کل وزن میلگرد مصرفی مدل‌ها (عدد کارایی) پرداخته‌اند [۲۳ و ۲۲] در این پژوهش نیز از این روش برای بررسی کارایی مدل‌های پیشنهادی استفاده شده است. با بررسی مقدار عددی این پارامتر در جدول ۲، می‌توان دریافت که مدل سوم مدلی کاراتر می‌باشد.



شکل ۱۹- طراحی تیر با استفاده از روش مقاومت نهایی همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، زمان مرگ بتن زمانی در نظر گرفته شده که بتن در فشار خرد شود. تنش ایجاد شده در راستای

## ۶- نتیجه گیری

مدل‌های منطقی‌تر و مناسب‌تری را منتج خواهد کرد. هر چند به دلیل مشکلات اجرایی و عملی‌تر شدن طراحی، در منابع مختلف توصیه می‌شود که از به کارگیری اعضای کششی مورب در پیکره مدل بست و بند اجتناب شود، اما در این نمونه می‌توان تنها با خم کردن همان آرماتورهای طولی، اعضای مورب مدل را پوشش داد و در این صورت مشکل اجرایی نیز ایجاد نخواهد شد.

## ۷- مراجع

- [1] Wight. J. K., & Macgregor. J. G, "Reinforced Concrete Mechanics and Design", Chapter 17, 6th Edition, Osama AI Shammari, 2014.
- [2] Hu. Q., Ley. M. T., & Russell. B. W. "Determining Efficient Strut and Tie Models for Simply Supported Beams Using Minimum Strain Energy", ACI Structural Journal, Vol. 111, No. 5, pp. 1015-1025, 2014.
- [3] AASHTO Committee, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", American Association of State Highway and Transportation Officials, 7th Edition, 2014.
- [4] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", ACI 318R-02, American Concrete Institute, Appendix A, pp 369-384, 2002.
- [5] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", ACI 318R-14, American Concrete Institute, Chapter 23, pp 385-399, 2014.
- [6] Task Group, "Practitioners Guide to Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures", fib Bulletin 45, pp. 265-366, 2008.
- [7] Sritharan. S., To, N. H., Ingham. J. M., "Strut-and-tie computer modelling of reinforced concrete bridge joint systems", Journal of earthquake engineering 7, No. 03, pp. 463-493, 2002.
- [8] Sritharan. Sri. et al, "Strut-and-tie computer modelling of reinforced concrete bridge portal frames", Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 35, no. 3, pp. 165-189, 2002.
- [9] Karthik. M. M., Mander. J.B. and Hurlbaus. S., "C-STM Modeling of Bridge Piers without and with ASR/DEF Deterioration", Structures Congress 2013@ sBridging Your Passion with Your Profession, pp. 447-456. ASCE, 2013.
- [10] Jordan, M.A., Lind. D., Griswold. TH., "Increasing Crane Girder Capacity Using the Strut-and-Tie Method", Ports 2004@ sPort Development in the Changing World, ASCE, pp. 1-10, 2004.
- [11] He. Z.Q., and Liu. Z., "Optimal three-

در این پژوهش رفتار یک پایه پل تک‌ستونه که یک بار با استفاده از چند نمونه مدل بست و بند و یک بار با استفاده از روش طراحی معمولی مقاومت نهایی طراحی شده، مورد بررسی قرار گرفته است. اهم نتایج این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

۱- نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که مدل بست و بند مدلی بسیار ساده، با دقت و کاربردی برای طراحی پایه پل تک‌ستونه‌ویژه قسمت سر ستون آن می‌باشد.

۲- تحلیل غیر خطی نمونه‌های طراحی شده در این پژوهش، نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها از مقاومت و شکل پذیری مناسبی برخوردار هستند، و قابلیت جذب انرژی بالایی دارند. مقاومت سایر نمونه‌ها ۵۰ الی ۱۰۰ درصد در جهت اطمینان می‌باشد.

۳- اگر چه مدل بست و بند به‌عنوان یک روش کران پایین و محافظه‌کارانه شناخته شده است، اما در این پژوهش به منظور طراحی پایه پل تک‌ستونه، مدلی ارائه شده است که نه تنها نسبت به مدل‌های دیگر حدود ۳۵ درصد مقرون به صرفه است، بلکه نسبت به طراحی واقعی نیز در حدود ۲۹ درصد کاهش در مصرف آرماتور را گزارش می‌کند؛ که چنین رقمی در پروژه‌های بزرگ پل سازی تأثیر بسیار چشم‌گیری خواهد گذاشت. علاوه بر صرفه اقتصادی، بررسی رفتار غیر خطی این مدل در نرم افزار نشان می‌دهد که نمونه طراحی شده از مقاومت و شکل پذیری مناسبی برخوردار است.

۴- مدل سوم با وجود رفتار بسیار مناسب و شکل پذیری که دارد، انرژی کرنشی آن حدود ۸ kN.m از دیگر نمونه‌ها بیش‌تر است. این در حالی است که با بررسی پارامتر عدد کارایی برای سایر نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که عدد کارایی نمونه سوم تفاوت قابل‌توجهی با عدد کارایی دیگر نمونه‌ها دارد. از آن جا که اساسی‌ترین ویژگی‌های یک طرح مناسب، ظرفیت باربری بهتر و کاهش میزان میلگرد مصرفی می‌باشد، پارامتر عدد کارایی ملاک عمل قرار گرفته و مدل سوم به‌عنوان مدل مناسب‌تر معرفی شده است.

۵- مدل بست و بند ارائه شده برای نمونه سوم که از همه مناسب‌تر است، تطابق بیش‌تری با مسیرهای تنش حاصل از حل الاستیک دارد. بدین ترتیب می‌توان استنتاج نمود که انطباق هر چه بیش‌تر مدل‌های بست و بند با مسیرهای تنش حاصل از حل الاستیک،

dimensional strut-and-tie models for anchorage diaphragms in externally prestressed bridges", *Engineering Structures* 32, no. 8, pp. 2057-2064, 2010.

[12] Mezzina. M., Palmisano. F. and Raffaele. D., "Gaining experience in designing RC Structures by Strut-and-Tie model: the case of a typical bridge deck subjected to horizontal actions", *International Conference on Advances in Civil Engineering*. Vaddeswaram, India, pp. 21-23. 2011.

[13] Mezzina. M. et al, "Designing simply supported RC bridge decks subjected to in-plane actions: Strut-and-Tie Model approach", *Journal of Earthquake Engineering* 16, no. 4, pp. 496-514, 2012.

[14] He. Z. Q., Ma. Z. J., Chapman. C. E., & Liu. Z., "Longitudinal joints with accelerated construction features in decked bulb-tee girder bridges: Strut-and-tie model and design guidelines", *Journal of Bridge Engineering* 18, no. 5. pp. 372-379, 2012 .

[15] Schlaich. J., Schäfer. K., Jennewein. M. "Toward a consistent design of structural concrete". *PCI journal* 32. No.3, pp. 74-150, 1987.

[16] Lubliner. J. "A Plastic-Damage Model for Concrete", *Int. J. Solid Structures*, Vol. 25, No. 3, pp. 299-326, 1989.

[17] Lee, B.J. and Fenves .G .L. "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No.8, 1988.

[18] Park, R. and Paulay, T., "Reinforced concrete Structures", John Wiley and Sons, 1975.

[19] ABAQUS Inc., ABAQUS/Theory User manual, Version 6.12, 2012.

[20] Zhang, Y.Y., Harries, K.A. and Yuan, W.C., "Experimental and numerical investigation of the seismic performance of hollow rectangular bridge piers constructed with and without steel fiber reinforced, concrete", *Engineering Structures* 48, 2013, pp. 255-265.

[۲۱] طاحونی شاپور، "طراحی پل"، چاپ دهم، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.

[22] Ley. M. T., Riding. K. A., Bae. S., & Breen. J. E., "Experimental Verification of Strut and Tie Model Design Method", *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 6, pp. 749-755, 2007.

[23] Garber. D. B., Gallardo. J. M., Huaco. G. D., Samaras. V. A., & Breen. J. E., "Experimental Evaluation of Strut-and-Tie Model of Indeterminate Deep Beam", *ACI structural Journal*, Vol. 111, No. 1-6, pp. 1-8, 2014.

## Using Strut-and-Tie Model for Concrete Hammerhead Design

Anahita Azhang\*

MSc in structural Engineering, Department of Civil Engineering, Yazd University

Davood Mostofinejad

Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT)

Reza Morshed

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University

### Abstract

Periodically, construction-based confinements or aesthetic aspects gets desiners kindled to utilize single column piers (hammerhead) bridges. Some factors such as geometrical discontinuities and inserted loads would be conducive to generate disturbed stress distribution; consequently, such cases deserve special consideration, instead of conventional-adopted methods. Strut-and-Tie Model (STM), as a simply- and newly- designed approach in concrete structure, seems to be a robust tool to deal with the problem. This is a lower bound solution of constraint analysis could be deployed to analyze concrete structures with disturbed stress distribution and a set of compressive and tensional components. By using 3 STMs, a cylindrical-shaped bridge pier was elastically drawn. To get deformation and bearing load evaluated, nonlinear analysis through ABAQUS software was performed. Derived outputs illustrated that not only do those samples designed by STM possess enough resistance, but also they present adequate behavior. It is true that this methdeology is known as a lower bound solution; however, not only is this cost effective more than 35% over against conventional STMs as long as rebar arrangement allows, but it also tends to utilize rebar far less (by 29%) than common designing method (LRFD) and final resistance. It is worth to bear in mind that this figure would be considerable in big projects of bridge construction. Additionally, analysis of designed specimens demonstrates that this design would possess more ductible behavior and experience a smooth failure.

**Keywords:** Strut-and-Tie Models, Reinforced Concrete Bridges, single-column Piers, Hammerhead, Bent Caps.

---

\* Corresponding Author: azhang.anahita@yahoo.com

