

ارائه‌ی یک الگوریتم پیشنهادی برای ارتقای برنامه‌ی IDARC در تعیین منحنی لنگر-انحنای مقطع

ایمان شکیباپور،^{۱*} حسن حاجی کاظمی،^۲ عباس کرم الدین^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

imanshakibapoor@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۳

چکیده- از آنجا که نرم‌افزار IDARC نرم‌افزاری شناخته شده در محاسبه‌ی شاخص خسارت پارک است و با توجه به این‌که مقدار شاخص خسارت پارک کاملاً به مقدار انحنای نهایی مقطع عضو وابسته است، نحوه‌ی عمل‌کرد IDARC در تعیین این پارامتر از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌شود. برای بررسی موضوع، نتایج آزمایشگاهی موجود روی ۹ تیر با نتایج نرم‌افزار IDARC مقایسه شده است که حاکی از ایرادات قابل توجه در خروجی IDARC است. همچنین کنترل‌های تحلیلی روی نتایج IDARC، از جمله کنترل تعادل نیرویی در مقطع و کنترل کرنش دورترین تار فشاری بتن در لحظه‌ی انحنای نهایی، حاکی از ایرادات غیر قابل اغماض در نتایج این نرم‌افزار است. در ادامه، الگوریتم به‌کار رفته در IDARC برای محاسبه‌ی منحنی لنگر-انحنای بازبینی و اصلاح شده و به کمک آن برنامه‌ای نوشته شده که قادر به اعمال مدل بتن Chang&Mander و مدل بتن به‌کار رفته در IDARC است. نتایج برنامه و الگوریتم پیشنهادی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی و نتایج نرم‌افزار OpenSees هماهنگ است.

واژگان کلیدی: منحنی لنگر-انحنای، انحنای نهایی، IDARC، شاخص خسارت، آنالیز مقطع

۱- مقدمه

[۲] با آزمایش روی ۱۵ تیر بتنی با خصوصیات مختلف، به بررسی آثاری هم‌چون میزان درصد آرماتور کششی و فشاری، میزان آرماتور عرضی و شکل پذیری آرماتور بر رفتار تیر پرداخته و منحنی لنگر-انحنا آن‌ها را بررسی کرده است. در کنار مطالعات آزمایشگاهی، نرم‌افزارهایی نیز تهیه شده که قادر به آنالیز مقطع با مدل‌های متفاوتی از بتن و فولاد است. از جمله‌ی این نرم‌افزارها می‌توان به SEQMC

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای روی آنالیز مقاطع تیر و ستون بتنی شده است. Chugh [۱] برای تحلیل و طراحی تیرها و ستون‌های بتنی با تأکید بر مفهوم منحنی لنگر-انحنا مطالعاتی آزمایشگاهی انجام داده است. وی در این تحقیق به بررسی آثار محصور شدگی، لغزش آرماتور و نیروی محوری بر روی اعضای بتنی پرداخته است. Lopes et al.

به مقدار انحنای نهایی عضو وابسته است و هر میزان خطا در محاسبه‌ی انحنای نهایی مقطع به همان میزان خطا در محاسبه‌ی شاخص خسارت عضو و در نهایت خطا در شاخص خسارت سازه منجر می‌شود.

IDARC [۶]، نرم‌افزاری تخصصی برای آنالیز خسارت سازه‌های بتنی است که به تحلیل‌های غیرخطی و محاسبه شاخص خسارت Park قادر است. هم‌چنین این نرم‌افزار با در دست داشتن هندسه‌ی مقاطع بتنی می‌تواند به آنالیز لنگر- انحنای مقطع پردازد و منحنی لنگر- انحنای مقدار انحنای نهایی مقطع را محاسبه کند. با توجه به کاربرد گسترده IDARC، به عنوان مرجعی در زمینه‌ی تحلیل خسارت، و ارتباط مستقیم میزان خطا در نتایج آنالیز مقطع با محاسبه‌ی شاخص خسارت Park؛ به اعتقاد نویسندگان این مقاله، صحت سنجی نتایج نرم‌افزار IDARC در تعیین منحنی لنگر- انحنای محاسبه‌ی پارامتر انحنای نهایی مقطع اهمیت زیادی دارد. برای بررسی، از نتایج آزمایش‌های روی ۹ مقطع تیر بتنی استفاده شده است [۲]. هم‌چنین برنامه‌ای نوشته شده است که با استفاده از مدل بتن Kent & Park [۷]، به کار رفته در نرم‌افزار IDARC و مدل بتن Chang & Mander [۸] - در نرم‌افزار OpenSees [۹] - به تحلیل مقطع می‌پردازد. در ساختار این برنامه، برای تعیین الگوی توزیع کرنش در مقطع، از حل مستقیم روابط انتگرالی غیرخطی تنش استفاده شده است. برای بررسی نرم‌افزارهای IDARC و OpenSees از نتایج آزمایشگاهی نیز استفاده شده است.

۲- بررسی موضوع

۲-۱- مدل‌های بتن و فولاد

پاسخ سازه‌ای تحت نیرو، مقدار زیادی به رابطه‌ی تنش- کرنش مصالح تشکیل دهنده‌ی آن و شدت تنش بستگی

[۳] که به وسیله‌ی Priestley ارائه شده و نرم‌افزار UCFyber [۴] اشاره کرد. علاوه بر نرم‌افزارهای گفته شده که به صورت تخصصی بر آنالیز مقطع متمرکز شده‌اند، نرم‌افزارهایی نیز هم‌چون IDARC و OpenSees، نیز در کنار روند تحلیل به محاسبه منحنی لنگر- انحنای مقطع به روش نواری قادر هستند.

آنالیز لنگر- انحنای مقطع همواره از نیازهای اولیه در فرایند تحلیل غیرخطی سازه‌ها و هم‌چنین از ابزارهای ضروری در روش‌های طراحی بر اساس عملکرد است که دید مناسبی از نحوه‌ی تغییرات لنگر مقاوم مقطع در برابر تغییرات انحنای می‌دهد. علاوه بر اهمیت منحنی لنگر- انحنای در تحلیل‌های غیرخطی، در آنالیز خسارت سازه نیز با شاخص‌های خسارتی روبه‌رو می‌شویم که بر پایه‌ی پارامترهایی هم‌چون انحنای نهایی اعضا استوار است. شاخص خسارت، پارامتری عددی است که به‌طور معمول در بازه‌ی صفر تا یک تعریف می‌شود و به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی وضعیت خسارت‌دیده‌ی سازه پس از اعمال نیرو (به‌طور معمول نیروهای ناشی از زلزله) به کار می‌رود. از جمله کاربردی‌ترین شاخص‌های خسارت می‌توان به شاخص خسارت Park [۵] اشاره کرد که به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود؛

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta \cdot \int dE}{F_Y \cdot \delta_u} \quad (1)$$

در این رابطه، δ_m حداکثر تغییر شکل عضو تحت بار دینامیکی، δ_u تغییر شکل نهایی عضو تحت بار استاتیکی، $\int dE$ میزان انرژی هیسترتیک جذب شده، F_Y مقاومت تسلیم عضو و β ضریب ثابت و بدون بعدی است که آثار افت مقاومت را منعکس می‌کند. همان‌طور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، مقدار شاخص خسارت Park به‌طور کامل

$$\begin{cases} f_c = f_c' \left[\frac{2 \varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ f_c = f_c' [1 - Z (\varepsilon_c - \varepsilon_0)] & \varepsilon_c > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_c = E_{c0} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) \right] & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ E_c = -ZF \times f_c' & \varepsilon_c > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (3)$$

در این روابط f_c' مقاومت فشاری بتن محصور شده (psi)، ε_0 کرنش نظیر حداکثر مقاومت بتن، E_{c0} مدول الاستیسیته‌ی نخستین بتن، و ZF شیب ناحیه‌ی نرم شونددگی کرنشی است. ضریب ZF بدون بعد، و بیانگر آثار محصور شدگی بر رفتار بتن است و از روابط (۴) تا (۶) به دست می‌آید.

$$ZF = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + \varepsilon_0 f_c'}{f_c' - 1000} \quad (5)$$

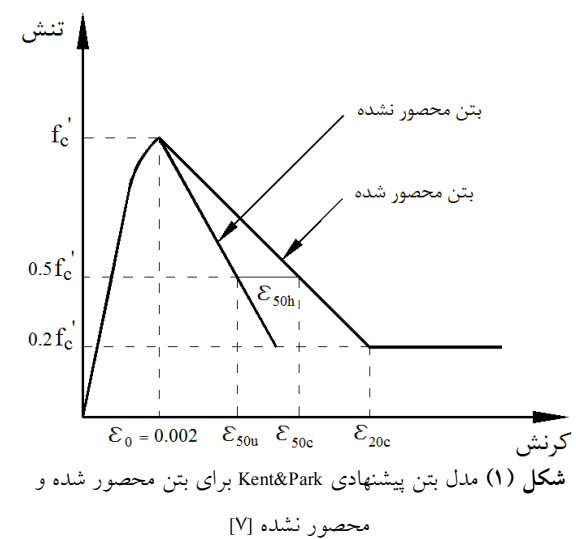
$$\varepsilon_{50h} = 0.75 \rho_s \sqrt{\frac{b}{s_h}} \quad (6)$$

ضریب ZF به طور معمول در بازه‌ی ۲۰ تا ۴۰۰ در تغییر است، به گونه‌ای که هر چه محصور شدگی به تر و سخت گیرانه تر رعایت شود، به مقادیر کوچکتری از ZF منجر می‌شود. در راهنمای IDARC آمده است در صورتی که مقدار ZF به وسیله‌ی کاربر صفر معرفی شود، برنامه به صورت خودکار و بر اساس روابط بالا به محاسبه‌ی پارامتر ZF می‌پردازد [۱۲]. در ادامه‌ی این تحقیق، در بخش (۳-۵) صحت آن بررسی خواهد شد.

در نرم افزار OpenSees چندین مدل بتن تعریف شده است که در این پژوهش از Concrete-07، که بر اساس مدل بتن Chang & Mander پایه‌ریزی شده است، استفاده می‌شود. شکل (۲) منحنی تنش-کرنش مدل بتن Chang & Mander را در محدوده‌ی فشاری و کششی نشان می‌دهد. مزیت عمده‌ی این

دارد. از آنجایی که به طور معمول از بتن در فشار استفاده می‌شود، منحنی تنش - کرنش بتن در ناحیه‌ی فشاری اهمیت خاصی دارد. رابطه‌ی تنش - کرنش بتن در فشار تا تنش‌هایی در حدود ۳۰ درصد مقاومت فشاری بتن، تا حدودی رفتار الاستیک خطی دارد. پس از این مرحله رفتار بتن تا رسیدن به مقاومت فشاری بتن، با نرم شونددگی تدریجی همراه است و پس از صفر شدن سختی مصالح، پدیده‌ی نرم شونددگی کرنشی آغاز شده و تا خرد شدگی بتن ادامه می‌یابد.

تاکنون مدل‌های ریاضی متعددی برای منحنی تنش - کرنش بتن پیشنهاد شده است. در این پژوهش با توجه به این که هدف مطالعه، که صحت سنجی نتایج نرم افزارهای IDARC و OpenSees است، از مدل‌های بتن به کار رفته در این نرم افزارها استفاده می‌شود. مدل بتن قابل استفاده در IDARC مدل بتن Kent & Park [۷] است؛ اگر چه این مدل به وسیله‌ی Scott [۱۰] و Park [۱۱] بازبینی و اصلاح شده است و آثار محصور شدگی بتن در قسمت صعودی منحنی نیز لحاظ شده است ولی نرم افزار IDARC همچنان از مدل Kent&Park استفاده می‌کند. شکل منحنی تنش-کرنش بتن در این مدل و روابط آن در ادامه ارائه شده است.



۲-۲- آنالیز لنگر- انحنای به روش نواری

روش نواری یکی از روش‌های آنالیز مقطع است که در نرم‌افزارهای IDARC و OpenSees نیز از آن استفاده شده است. در مدل نواری، مقطع به تعدادی نوار مجزا تقسیم می‌شود. خصوصیات هر نوار (مانند تنش و مدول الاستیسیته)، در هم‌ی نوار ثابت فرض شده و بر حسب مقدار کرنش مرکز نوار محاسبه می‌شود. در روند محاسبه‌ی منحنی لنگر- انحنای نمودی انحنای به مقطع وارد می‌شود و سپس به کمک شرایط سازگاری و معادلات تعادل، الگوی توزیع کرنش در کل مقطع محاسبه می‌شود. برحسب کرنش در مرکز هر نوار و با استفاده از منحنی تنش- کرنش مصالح، مقدار تنش در هر نوار محاسبه می‌شود. با انتگرال‌گیری از تنش‌ها در نوارهای مجزای تشکیل دهنده‌ی مقطع بر روی کل مقطع می‌توان نیروهای داخلی مقطع را محاسبه کرد. رابطه‌ی (۷) نحوه‌ی محاسبه‌ی کرنش در نوارهای مختلف مقطع و روابط (۸) و (۹) نحوه‌ی محاسبه‌ی نیروی محوری و لنگر خمشی داخلی را نشان می‌دهد. شکل (۳) نیز نشانگر مدل نواری است. با توجه به این‌که رابطه‌ی تنش- کرنش مصالح از نوع غیرخطی است و نمودی کرنش محوری مقطع $(d\varepsilon)$ به صورت مستقیم از نیروهای داخلی قابل محاسبه نیستند، به فرایندی تکراری برای آنالیز لنگر- انحنای نیاز است.

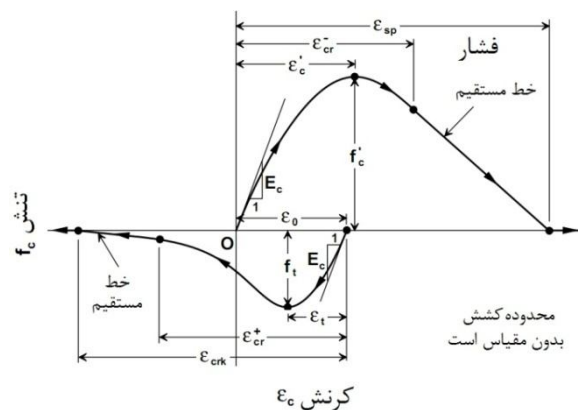
$$\varepsilon(z) = \varepsilon_0 + z\phi \quad (7)$$

$$N = \int E \varepsilon dA \quad (8)$$

$$M = \int E \varepsilon z dA \quad (9)$$

در روش نواری با وارد کردن رابطه‌ی (۷) در روابط (۸) و (۹) و همچنین تبدیل انتگرال به جمع مقادیر در نوارها، می‌توان به رابطه‌ی (۱۰) رسید:

مدل، که باعث استفاده از آن در این پژوهش شده است، قابلیت شبیه سازی رفتار بتن محصور شده و بتن محصور نشده در آن است. Priestley, Park و Mander بر حسب شرایط محصور شدگی بتن و مشخصات آرماتورهای محصور کننده‌ی هسته بتنی، روابطی را برای شبیه سازی منحنی تنش- کرنش بتن محصور شده ارائه کرده‌اند. [۱۳]



شکل (۲) منحنی تنش- کرنش بتن در مدل Chang & Mander [۸]

با توجه به طولانی بودن روابط منحنی تنش-کرنش بتن Chang & Mander، ارائه‌ی آن ضرورتی ندارد. شکل ۲ برای آشنایی با این مدل است.

در نمونه‌های درحال بررسی این پژوهش بر اساس آنچه که در [۱۳] گفته شده است آثار محصور شدگی نمونه‌ها بر منحنی تنش- کرنش بتن هسته محاسبه و اعمال شده است. در بتن پوشش نیز از مقادیر مدل بتن محصور نشده Chang & Mander استفاده شده است. مدل به کار رفته برای فولاد در تحلیل مقاطع بر اساس امکانات نرم‌افزارهای مذکور انتخاب شده است. مقادیر پارامترهای مربوط به این مدل‌ها بر اساس تنش تسلیم و تنش نهایی برای هر نمونه انتخاب شده است [۲]. کرنش مانند تنش نهایی در خصوص فولادها در تمام گزینه‌ها برابر با ۰/۱ انتخاب شده است.

$$\Delta \varepsilon_0^n = -k_{z,k}^{n-1} \Delta \phi_k / k_{A,k}^{n-1} \quad (15)$$

توجه کنید $k_{A,k}^0$ و $k_{z,k}^0$ پارامترهای سختی در انتهای گام $(k-1)$ هستند.

۳- مقادیر کرنش و انحناء به صورت زیر به روز می شود:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \phi \end{Bmatrix}_k^n = \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \phi \end{Bmatrix}_k^{n-1} + \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_0 \\ 0 \end{Bmatrix}_k^n \quad (16)$$

۴- با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱۳) و مقادیر کرنش و انحنای به روز شده، باردیگر ماتریس سختی محاسبه می شود.

۵- نیروی نامیزان با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می شود.

$$\Delta N_k^n = k_{A,k}^n \Delta \varepsilon_{0,k}^n + k_{z,k}^n \Delta \phi_k \quad (17)$$

اگر $|\Delta N_k^n|$ از میزان خطای مجاز بزرگتر بود دوباره‌ی فرایند با بازگشت به گام (۲) تکرار می شود، در غیر این صورت نمودی لنگر به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\Delta M_k = k_{z,k}^n \Delta \varepsilon_{0,k}^n + k_{zz,k}^n \Delta \phi_k \quad (18)$$

با هم‌گرا شدن نتایج و تعیین نمودی کرنش و لنگر، مقادیر انحناء و لنگر ثبت می شوند و با افزایش دوباره‌ی نمودی انحناء $(\Delta \phi_{k+1})$ باردیگر روند گام به گام بالا تکرار می شود.

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} k_A(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) & k_z(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) \\ k_z(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) & k_{zz}(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_0 \\ \Delta \phi \end{Bmatrix}_k \quad (10)$$

$$k_A = \sum_{i=1}^{NCC} E_{ci}(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) A_{ci} + \sum_{j=1}^{NSS} E_{sj}(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) A_{sj} \quad (11)$$

$$k_z = \sum_{i=1}^{NCC} E_{ci}(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) A_{ci} z_i + \sum_{j=1}^{NSS} E_{sj}(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) A_{sj} z_j \quad (12)$$

$$k_{zz} = \sum_{i=1}^{NCC} E_{ci}(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) A_{ci} z_i^2 + \sum_{j=1}^{NSS} E_{sj}(\varepsilon_{0,k}, \phi_k) A_{sj} z_j^2 \quad (13)$$

در این روابط NCC، تعداد نوارهای بتنی و NSS، تعداد نوارهای فولادی است.

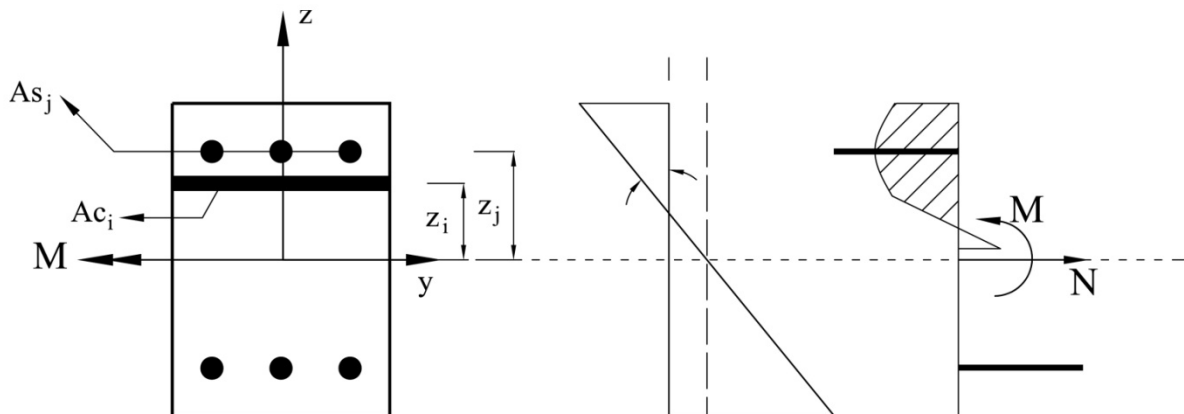
در ادامه، روند گام به گام به کار رفته در IDARC، برای

آنالیز لنگر- انحناء ارائه می شود [۱۲]:

۱- نمودی کوچک انحناء $(\Delta \phi_k)$ به انحنای معلوم گام قبل (ϕ_{k-1}) اضافه شود.

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \Delta \phi_k \quad (14)$$

۲- در گام اول $(k=1)$ تمام نیروی محوری اعمال می شود. از آنجا که در محاسبات مقدار نیروی محوری ثابت فرض می شود؛ مقدار نمودی نیروی محوری در گام‌های باقیمانده صفر است. به این ترتیب نمودی کرنش محوری مقطع به صورت زیر محاسبه می شود:



شکل (۳) جزئیات مقطع در مدل تحلیلی نواری

شده و به قابی اختصاص داده شده‌اند. برای تعیین منحنی «عمران مدرس» دوره سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۲

لنگر- انحنای قاب مذکور تحلیل تاریخچه‌ی زمانی شده تا منحنی لنگر- انحنای آن به صورت منحنی هیسترسیس قابل دریافت باشد. برای قرارگیری منحنی هیسترسیس در قالب منحنی لنگر- انحنای شتاب نگاشتنی ساخته شده است، که در آن شتاب با نمودارهای بسیار کوچک و به صورت اکیداً صعودی افزایش یافته‌اند. شکل ۷ نشانگر منحنی لنگر- انحنای تیرهای نمونه است. به منظور بررسی‌های پیش‌تر نتایج IDARC و هم‌چنین نتایج OpenSees، برنامه‌ای برای تحلیل لنگر- انحنای مقطع نوشته شده که هر دو مدل بتن مذکور در آن لحاظ شده است. به دلیل ایرادهای نتایج الگوریتم IDARC، که در بخش (۲-۵) به شرح آن پرداخته می‌شود، در این برنامه ابتدا از حل دقیق انتگرال‌های روابط (۸) و (۹) در کل مقطع استفاده شده و تابع غیرخطی حاصل به صورت دقیق با استفاده از امکانات کتابخانه برنامه‌ی FORTRAN حل شده است.

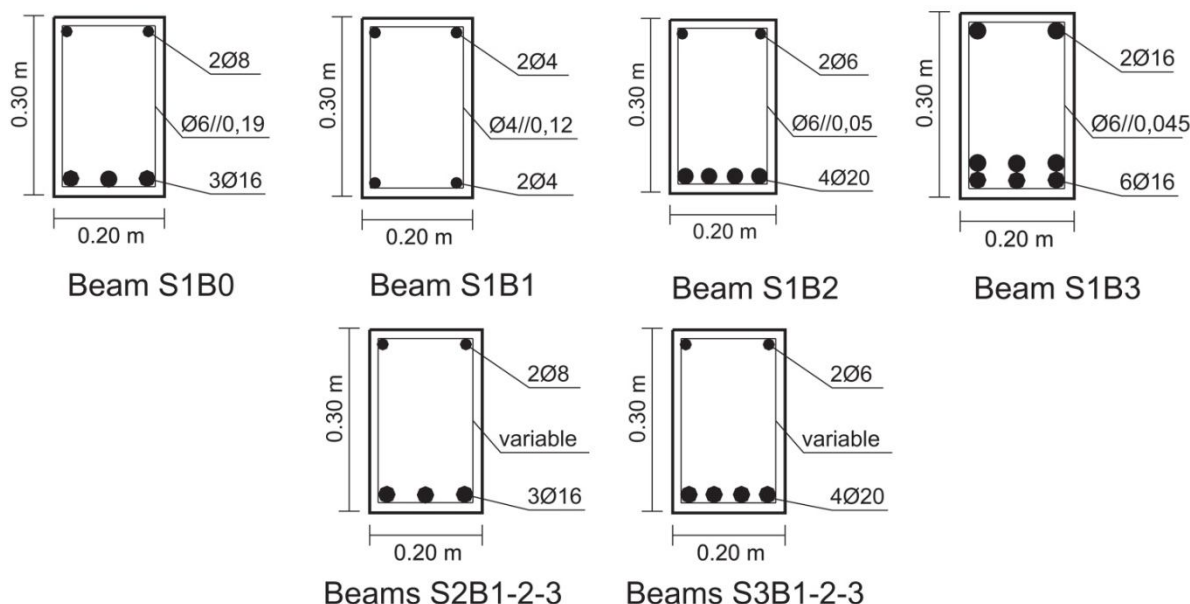
۲-۳- نمونه‌ی تیرهای انتخابی

در این پژوهش برای مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، از اطلاعات تیرها و نتایج آزمایش‌ها استفاده شده است [۲]. با توجه به این‌که منحنی لنگر- انحنای نمونه‌ی S1B1 در [۲] ارائه نشده، در این مقاله نیز این نمونه از مطالعات حذف شده است. هم‌چنین نمونه‌های سری S3 و S4 مرجع مذکور با توجه به کاربرد نوع خاصی از آرما تور، مورد توجه واقع نشده‌اند. در ادامه، شکل مقاطع و مشخصات مصالح به کار رفته در آن‌ها ارائه می‌شود.

با توجه به نمونه‌های آزمایش شده‌ی مقاومت فشاری بتن، که برای نمونه‌ی مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری است، در مراحل محاسباتی این اعداد به کمک ضرایب مبحث نهم مقررات ملی ساختمان به مقاومت فشاری استوانه‌ای استاندارد تبدیل شده‌اند.

۲-۴- مدل‌سازی

به منظور ارزیابی عملکرد IDARC در محاسبه‌ی منحنی لنگر- انحنای تیرهای مورد مطالعه در این برنامه، مدل



شکل (۴) جزییات مقاطع و آرماتورگذاری تیرهای نمونه [۲]

مقطع نقش دارد مقدار کرنش نهایی بتن در فشار است. تاکنون افراد مختلفی در این زمینه روابطی را پیشنهاد کرده‌اند که با توجه به هدف مقایسه نتایج می‌توان با وسواس کم‌تری مدل تعریفی کرنش نهایی بتن را انتخاب کرد. بدین منظور، از رابطه‌ی پیشنهادی Priestley [۱۴] برای پیش‌بینی کرنش نهایی بتن استفاده شده است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (19)$$

در این رابطه ε_{cu} کرنش نهایی بتن، ρ_s نسبت حجمی آرماتورهای عرضی به هسته‌ی بتن، ε_{su} کرنش فولاد در تنش نهایی آن و f'_{cc} تنش فشاری بتن محصور شده است. Priestley در [۱۴] بیان کرده، که این رابطه برای بتن موجود در مقاطع ستون تحت نیروی محوری فشاری ارائه شده است و در خصوص تیرها اعداد این رابطه حداقل ۵۰٪ محافظه کارانه است. به همین دلیل با توجه به سروکار داشتن با مقاطع تیر، اعداد حاصل از رابطه‌ی (۱۹) دو برابر و استفاده شده‌اند.

۲-۵- بررسی نتایج

ابتدا به بررسی صحت عملکرد برنامه IDARC در محاسبه‌ی آثار محصور شدگی پرداخته می‌شود. در مدل به‌کار رفته در کد IDARC، آثار محصور شدگی بتن به‌وسیله‌ی اثر دادن ضریب ZF در شاخه‌ی نزولی منحنی تنش-کرنش بتن لحاظ می‌شود (روابط ۴ تا ۶). راهنمای برنامه‌ی IDARC بیان کرده در صورت صفر منظور کردن ضریب ZF، برنامه به‌صورت خودکار این ضریب را محاسبه می‌کند. برای بررسی صحت آن در خصوص سه تیر S1B3، S1B0 و S2B3 منحنی لنگر-انحنای در سه حالت محاسبه شده است؛

جدول (۱) مشخصات تیرهای نمونه [۲]

| Beam | A_s cm^2 | A'_s cm^2 | A_{sw}/s cm^2/m | ρ % | ρ' % | $f_{cm.cube}$ Mpa |
|------|-----------------|------------------|------------------------|-------------|--------------|-------------------|
| S1B1 | 0.25 | 0.25 | 2.10 | 0.05 | 0.05 | 29.9 |
| S1B2 | 12.57 | 0.57 | 11.40 | 2.38 | 0.11 | |
| S1B3 | 12.06 | 4.02 | 12.67 | 2.34 | 0.78 | 30.6 |
| S1B0 | 6.03 | 1.01 | 3.00 | 1.13 | 0.19 | 29.9 |
| S2B1 | 6.03 | 0 | 0 | 1.13 | - | 38.3 |
| S2B2 | 6.03 | 1.01 | 6.33 | 1.13 | 0.19 | 38.6 |
| S2B3 | 6.03 | 1.01 | 12.66 | 1.13 | 0.19 | 38.9 |
| S3B1 | 12.57 | 0 | 0 | 2.38 | - | 38.9 |
| S3B2 | 12.57 | 0.57 | 6.33 | 2.38 | 0.11 | 40.0 |
| S3B3 | 12.57 | 0.57 | 12.66 | 2.38 | 0.11 | 39.8 |

جدول (۲) تنش تسلیم و تنش نهایی متوسط آرماتورها [۲]

| Beams | Steel | Diameter | f_y | f_u |
|--------------------|--------|----------|-------|-------|
| | | □ (mm) | (Mpa) | (Mpa) |
| 1st series | S500NR | 4 | 642 | 815 |
| | | 6 | 587 | 665 |
| | | 8 | 526 | 632 |
| | | 16 | 531 | 645 |
| | | 6 | 571 | 612 |
| 2nd and 3rd series | S500NR | 8 | 599 | 706 |
| | | 16 | 596 | 694 |
| | | 20 | 619 | 723 |
| | | 6 | 571 | 612 |

نتایج حاصل از این برنامه با نتایج برنامه‌ی OpenSees مقایسه شده که حاکی از انطباق کامل آن‌ها است. پس از اطمینان از صحت نتایج برنامه‌ی نوشته شده، در گام بعدی مطالعات الگوریتم IDARC بررسی دقیق‌تری شده و با رفع ایراد آن و ارائه الگوریتم اصلاحی، دوباره برنامه‌ای برای تحلیل مقطع با استفاده از این الگوریتم نوشته شده است. نتایج تحلیل مقطع با استفاده از این الگوریتم با نتایج حل دقیق، مقایسه شده که حاکی از انطباق دقیق نتایج با یکدیگر است. روند گام به گام الگوریتم پیشنهادی در بخش (۲-۶) ارائه خواهد شد.

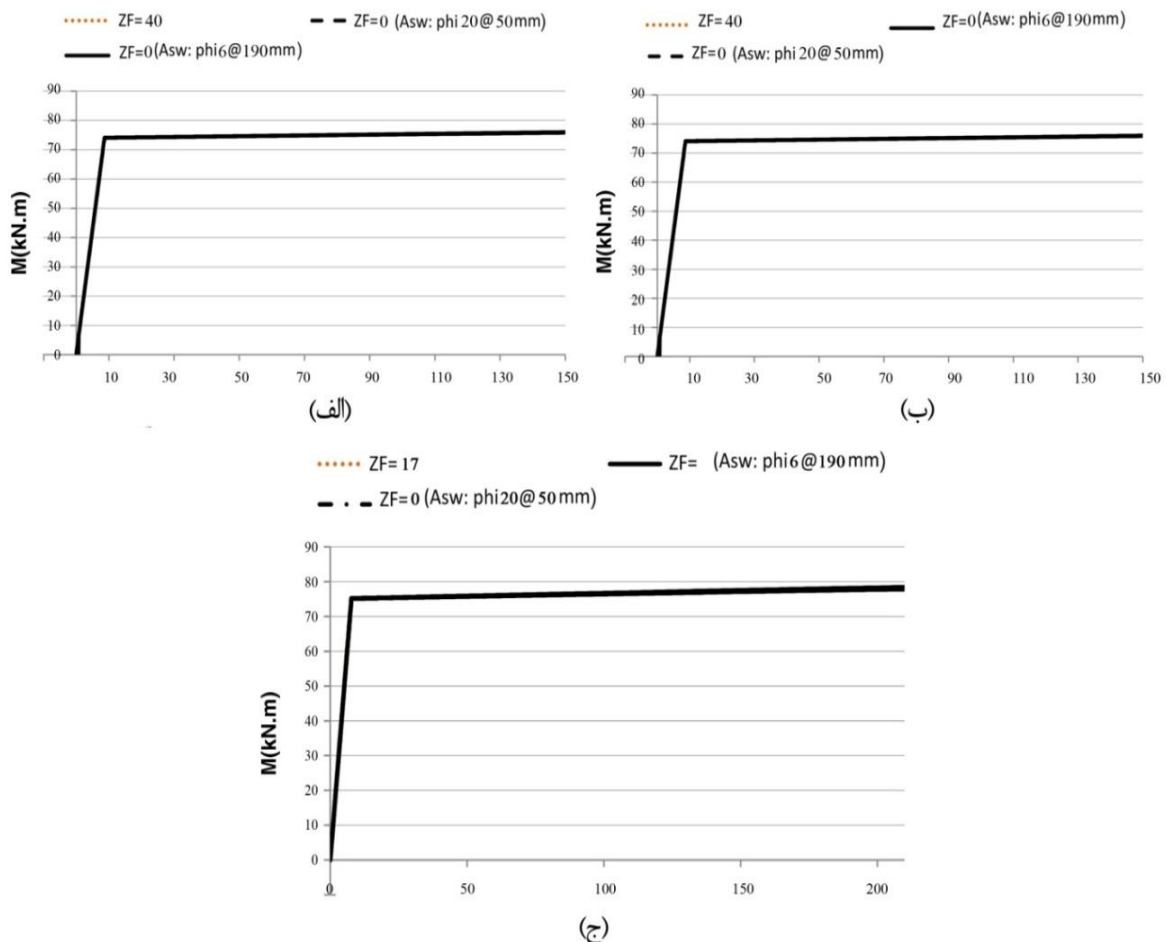
برای مدل‌سازی در OpenSees از المان تیر BeamWithHinges و مدل بتن Concrete-07 استفاده شده است. مشخصات بتن پوسته از نوع بتن محصور نشده و از نوع بتن محصور شده است.

فاکتور بسیار مهم در محاسبه‌ی منحنی لنگر-انحنای مقطع، که دقت آن به‌طور مستقیم در دقت انحنای نهایی

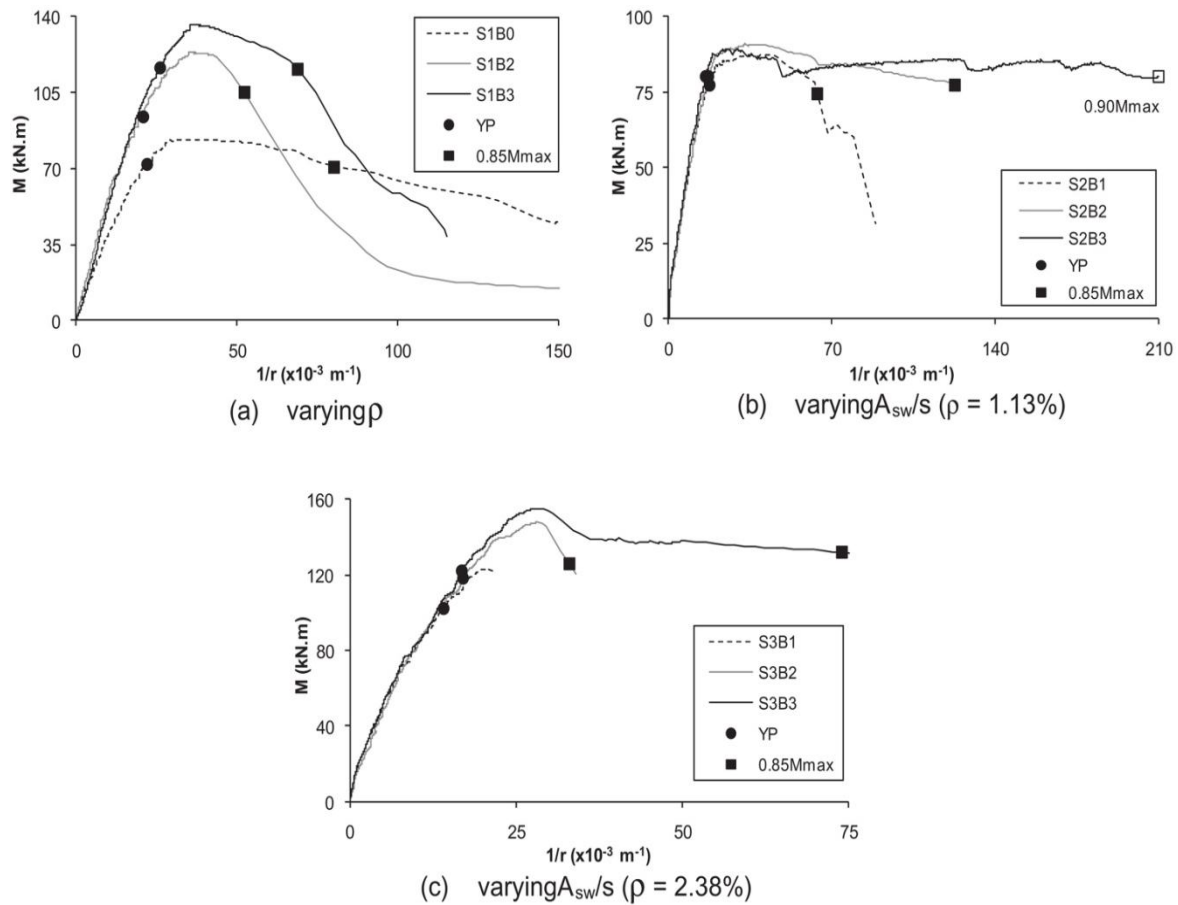
انحنای تیرها را بر اساس نتایج آزمایشگاهی و شکل (۷) نتایج IDARC، OpenSees و خروجی برنامه‌ی تهیه شده بر اساس روش تحلیلی انتگرالی را نشان می‌دهد. برای سهولت مقایسه‌ی نتایج، در این شکل‌ها کران بالای انحنا در منحنی‌های لنگر-انحنای حاصل از تحلیل، مشابه با کران بالای منحنی‌های حاصل از آزمایش انتخاب شده است؛ اما در برخی از نمونه‌های منحنی‌های لنگر-انحنای حاصل از تحلیل، پس از کران‌های بالای انحنا نشان داده شده نیز هم‌چنان ادامه داشته‌اند. در این قسمت چون هدف از مقایسه‌ی منحنی‌ها، بررسی شکل کلی آن‌هاست، مقدار انحنا به کران‌های نهایی آزمایش‌ها محدود شده است.

در حالت اول، مقدار ZF به صورت دستی محاسبه و در برنامه وارد شده است؛ در حالت دوم و سوم، مقدار آرماتور عرضی دارای دو مقدار حدی زیاد و کم انتخاب و محاسبه‌ی ZF به برنامه واگذار شده است. شکل (۵) نتایج نرم‌افزار IDARC را برای سه حالت مذکور نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود برای هر سه تیر و در هر سه حالت، مقدار آرماتور عرضی هیچ تأثیری بر منحنی لنگر-انحنای نگذاشته که این نتیجه مغایر با واقعیت است.

در ادامه‌ی بحث به صحت سنجی پاسخ‌های IDARC، OpenSees و برنامه‌ی نوشته شده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. شکل (۶) منحنی لنگر-



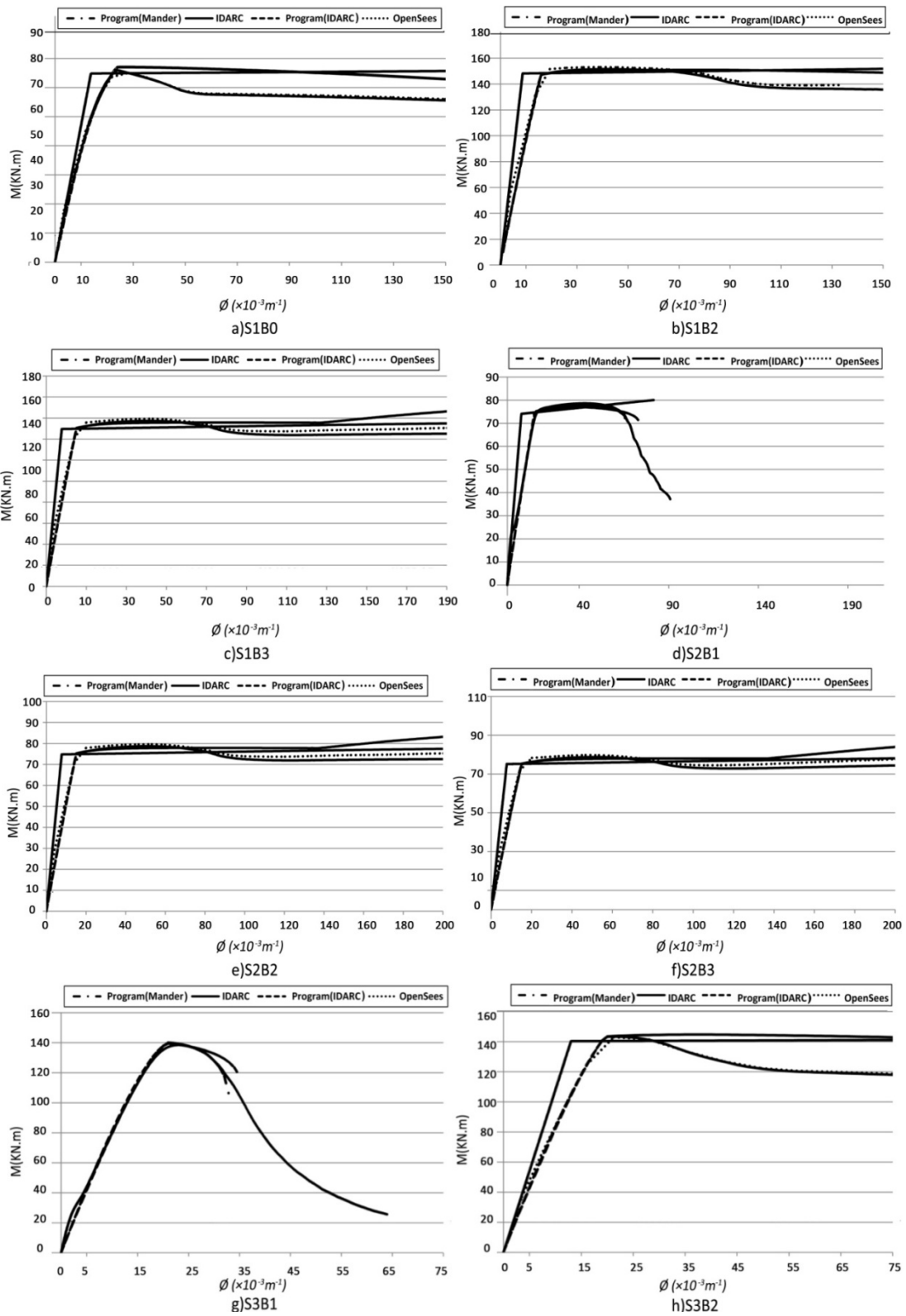
شکل (۵) بررسی صحت محاسبه‌ی ضریب ZF بر حسب شرایط مختلف خاموت‌گذاری الف - تیر S1B0 ب- تیر S1B3 ج- تیر S2B3



شکل (۶) منحنی لنگر - انحنای حاصل از آزمایش [۲]

بیش از مقدار واقعی بوده و به کاهش شیب نزولی منحنی لنگر-انحنا پس از رسیدن به ظرفیت خمشی نهایی منجر شده است. با وجود این اگرچه شیب قسمت نزولی منحنی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی به دقت قابل مقایسه نیستند، باردیگر یادآوری می‌شود، هدف از این پژوهش تنها صحت سنجی عملیات تحلیلی نرم‌افزارهای مذکور بر حسب فرضیات ورودی یکسان و تحقیق درباره‌ی کارایی نظریه‌های مختلف برای تعیین کرنش نهایی بتن خارج از بحث آن است، اما نتایج نشان می‌دهند که مدل بتن Mander به‌تر از مدل Kent & Park توانسته است کاهش ظرفیت مقطع را در قسمت نزولی تخمین بزند.

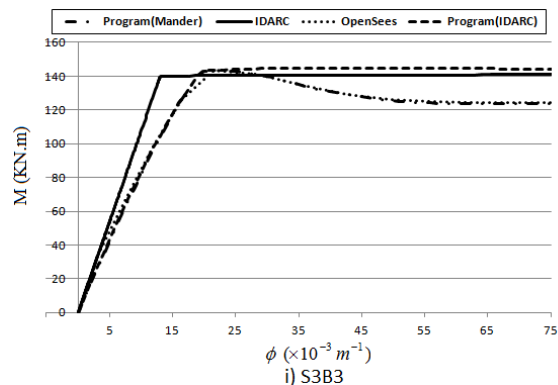
با مقایسه‌ی شکل کلی منحنی‌های حاصل از تحلیل، می‌توان درباره‌ی کارایی مدل‌های بتن به‌کار رفته قضاوت کرد. همان‌طور که دیده می‌شود در هیچ‌یک از نمونه‌ها، مدل بتن Kent & Park نتوانسته است به خوبی افت مقاومت پس از رسیدن به ظرفیت خمشی ماکزیمم مقطع را انعکاس دهد؛ اگرچه شیب منحنی‌های لنگر-انحنای به‌دست آمده از مدل بتن Mander نیز به اندازه شیب منحنی‌های حاصل از آزمایش نیست؛ اما دلیل آن را می‌توان در انتخاب مقادیر زیاد برای کرنش نهایی بتن در مطالعات تحلیلی جست. به بیان دیگر مقادیر انتخاب شده‌ی کرنش نهایی بتن محصور شده بر اساس [۱۴]،



شکل (۷) منحنی لنگر - انحنای مقاطع حاصل از تحلیل به روش‌های مختلف تا لحظه‌ی رسیدن به انحنای حاصل از آزمایش

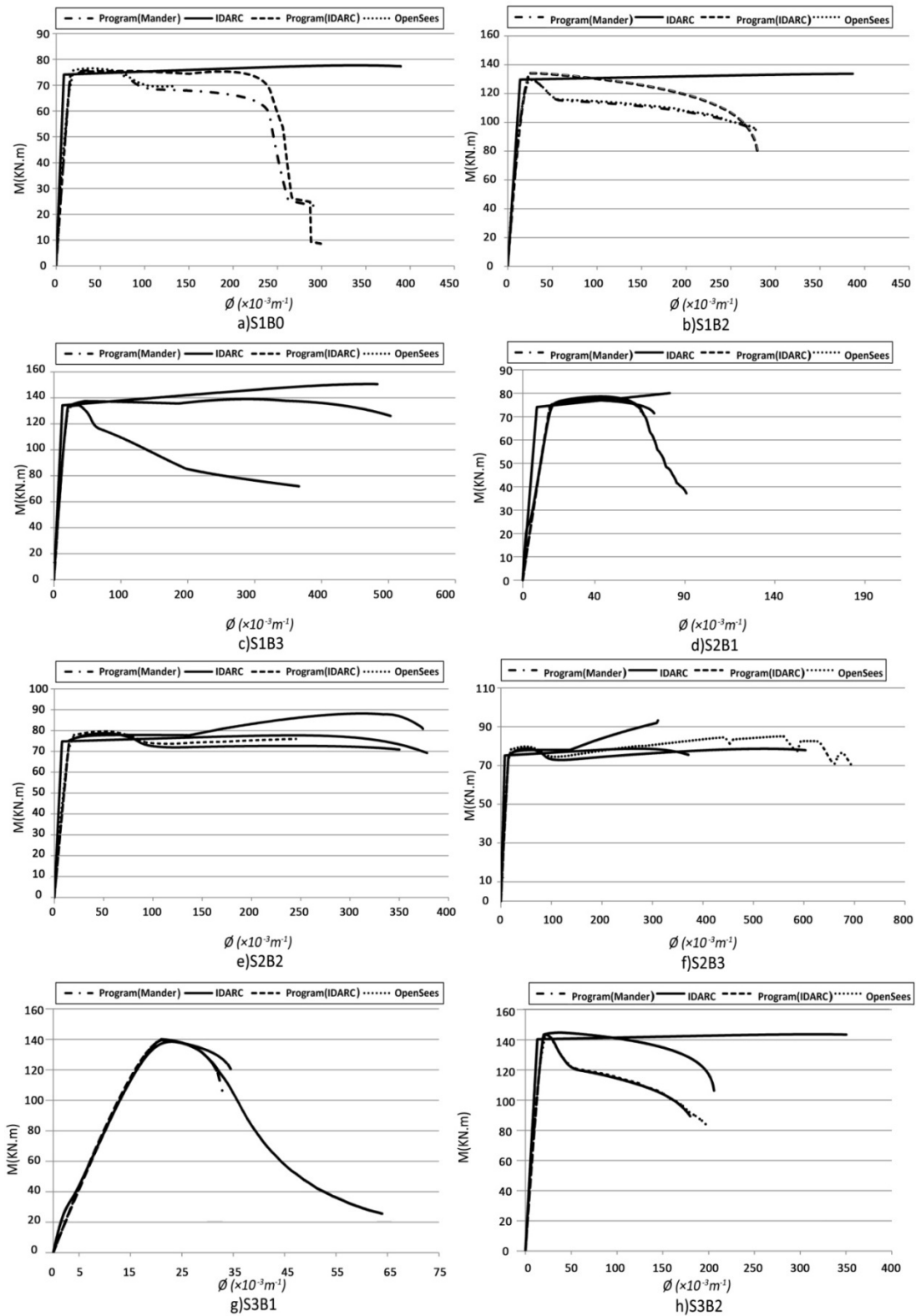
مقطع نوشته شده و ارتفاع تار خشی محاسبه شده است. سپس، با در دست داشتن الگوی توزیع کرنش و تنش در ارتفاع مقطع، نیروی محوری برآیند در مقطع محاسبه شده است (جدول ۳).

همان‌طور که دیده می‌شود آنالیز لنگر-انحنای IDARC در برخی موارد - مانند تیر S1B2 - شرط حفظ تعادل نیروی محوری در مقاطع تیرها را تأمین نمی‌کند! این نتیجه به تنهایی می‌تواند صحت روند تحلیل مقطع در برنامه‌ی IDARC را نقض کند. موضوع دیگر بررسی صحت مقادیر گزارش شده‌ی «انحنای نهایی» در این نرم‌افزار است. توجه دوباره به شکل (۸) نشان می‌دهد که مقدار انحنای نهایی مقطع در تیرهای S1B0، S1B2 و S3B2 توسط IDARC بسیار بزرگ‌تر از مقدار به‌دست آمده از تحلیل برنامه با مدل بتن Kent&Park است. برنامه‌ی IDARC به طور مستقیم منحنی لنگر-انحنای مقطع را به عنوان خروجی ارائه نمی‌دهد؛ بنابراین برای دستیابی به این منحنی از المان‌های تیر در یک قاب استفاده شده است. از آنجا که مکانیزم شکست در قاب ممکن است به دلیل گسیخته شدن سایر اعضای قاب، نه تیر در نظر گرفته شده، رخ دهد، برای تعیین مقدار انحنای نهایی از گزارش نهایی IDARC استفاده شده است. جدول (۴) نشانگر کرنش دورترین تار فشاری بتن را در سه نمونه‌ی تیر مذکور در وضعیت انحنای نهایی به‌دست آمده است. از آنجا که الگوریتم IDARC، شرط تعادل نیروی محوری مقطع را ارضا نمی‌کند، نتایج این نرم‌افزار قابل اطمینان نبوده و در این جدول ارائه نشده است؛ اما منحنی لنگر-انحنای حاصل از برنامه، در هر سه مقطع تا لحظه‌ی رسیدن کرنش دورترین تار فشاری بتن به کرنش نهایی بتن ادامه یافته است، جدول (۴) بنابراین مقادیر انحنای نهایی حاصل از تحلیل برنامه را می‌توان به عنوان انحنای نهایی مقطع پذیرفت. به این ترتیب ادامه‌ی منحنی، پس از این نقاط و رسیدن به مقادیر بزرگ‌تری از انحنای نهایی مقطع نادرست است.



ادامه شکل (۷) منحنی لنگر-انحنای مقاطع حاصل از تحلیل به روش‌های مختلف تا لحظه‌ی رسیدن به انحنای حاصل از آزمایش

برای تکمیل صحت سنجی نتایج IDARC و OpenSees، منحنی‌های لنگر-انحنای مقاطع تیرها، دوباره و این بار بدون محدود کردن کران انحنای تا لحظه‌ی رسیدن کرنش در دورترین تار بتن فشاری به کرنش نهایی به‌دست آمده که شکل (۸) نشانگر آن است. در تمام موارد، نتایج حاصل از OpenSees و برنامه‌ی ارائه شده بر اساس مدل بتن Mander انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. اما در مواردی هم‌چون S2B1، S2B2، S1B0، S1B2 و S3B3 برنامه OpenSees نتوانسته است تحلیل مقطع را تا رسیدن به انحنای نهایی ادامه دهد که حاکی از قوت روش تحلیلی به‌کار رفته در برنامه نسبت به الگوریتم نرم‌افزار OpenSees است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از نرم‌افزار IDARC و برنامه‌ی نوشته شده نشان می‌دهد، انطباقی که پیش از این در خصوص نتایج برنامه و OpenSees برقرار بود، این بار نیست. به عنوان نمونه، منحنی لنگر-انحنای تیر S1B2 حاکی از اختلاف قابل توجه در نتایج دو برنامه‌ی مذکور است (شکل ۸). برای بررسی بیشتر یک انحنای منحنی لنگر-انحنای تیر S1B0 (که انطباق نتایج IDARC و برنامه‌ی نوشته شده‌ی مشهود است) و یک انحنای منحنی تیر S1B2 (که نتایج دو برنامه از یکدیگر فاصله گرفته‌اند) انتخاب شده است. جدول ۳ نشانگر مقادیر لنگر و انحنای نقاط انتخابی است. به منظور بررسی صحت نتایج، تعادل نیروی محوری مقطع در هر چهار مورد کنترل شده است. برای این کار با در دست داشتن انحنای لنگر داخلی مقطع، رابطه‌ی تعادل لنگر در



شکل (۸) منحنی لنگر- انحنای مقاطع حاصل از تحلیل تا لحظه‌ی رسیدن به کرنش نهایی بتن

اصلاح الگوریتم، حذف پارامتر مدول الاستیسیته در الگوریتم IDARC و کاربرد مستقیم پارامتر تنش به جای آن است. روند گام به گام الگوریتم پیشنهادی برای مقطع تیر به صورت زیر است:

جدول (۴) مقادیر کرنش در دورترین تار فشاری بتن در لحظه‌ی

انحنای نهایی

| مقطع تیر | نتایج تحلیل با استفاده از برنامه | | نتایج تحلیل با استفاده از IDARC | مقدار کرنش نهایی بتن (پارامتر ورودی در IDARC و برنامه) |
|----------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--|
| | انحنای نهایی ($\times 10^{-3} 1/m$) | کرنش دورترین تار فشاری بتن | انحنای نهایی ($\times 10^{-3} 1/m$) | |
| S1B0 | ۲۴۲ | ۰/۰۲۶۳۵۹ | ۶۷۵ | ۰/۰۲۶۵۸۸ |
| S1B2 | ۲۸۰ | ۰/۰۶۵۵۲۴ | ۸۴۳ | ۰/۰۶۷۶۵۰ |
| S3B2 | ۲۰۶ | ۰/۰۳۴۹۷۰ | ۶۸۹ | ۰/۰۳۶۱۷۰ |

شروع گام k ام:

۱- نموی کوچک انحنا ($\Delta\phi_k$) به انحنا معلوم گام قبل (ϕ_{k-1}) اضافه شود.

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \Delta\phi_k \quad (20)$$

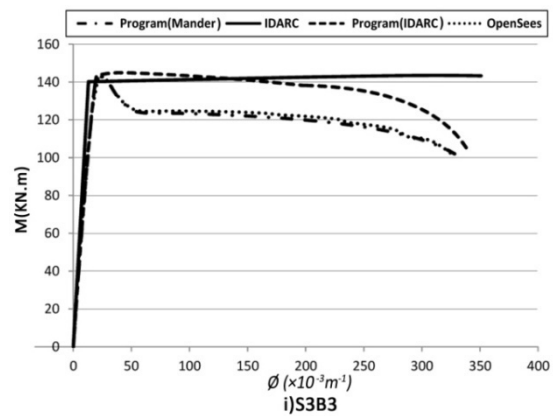
شروع عملیات تکراری

۲- کرنش در هر نوار با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود. در این روابط زیرنویس f و k به ترتیب نشانگر شماره‌ی نوار و گام است. بالانویس i نیز نشانگر شماره‌ی تکرار در هر گام است.

$$\varepsilon_{f,K}^i = \varepsilon_{0,K}^i + z_f \times \phi_k \quad (21)$$

($\varepsilon_{0,1}^i$ صفر لحاظ می‌شود)

۴- بر اساس مقدار کرنش در هر نوار، مقدار تنش (f_{sf}) در نوار بتنی و (f_{sf} در نوار فولادی) و مدول الاستیسیته در هر نوار (E_{sf} در نوار بتنی و E_{sf} در نوار فولادی) محاسبه می‌شود. (روابط ۲ و ۳)



ادامه شکل (۸) منحنی لنگر - انحنا مقاطع حاصل از تحلیل تا لحظه‌ی رسیدن به کرنش نهایی بتن

جدول (۳) بررسی تعادل نیروی محوری در نتایج تحلیل مقطع دو تیر

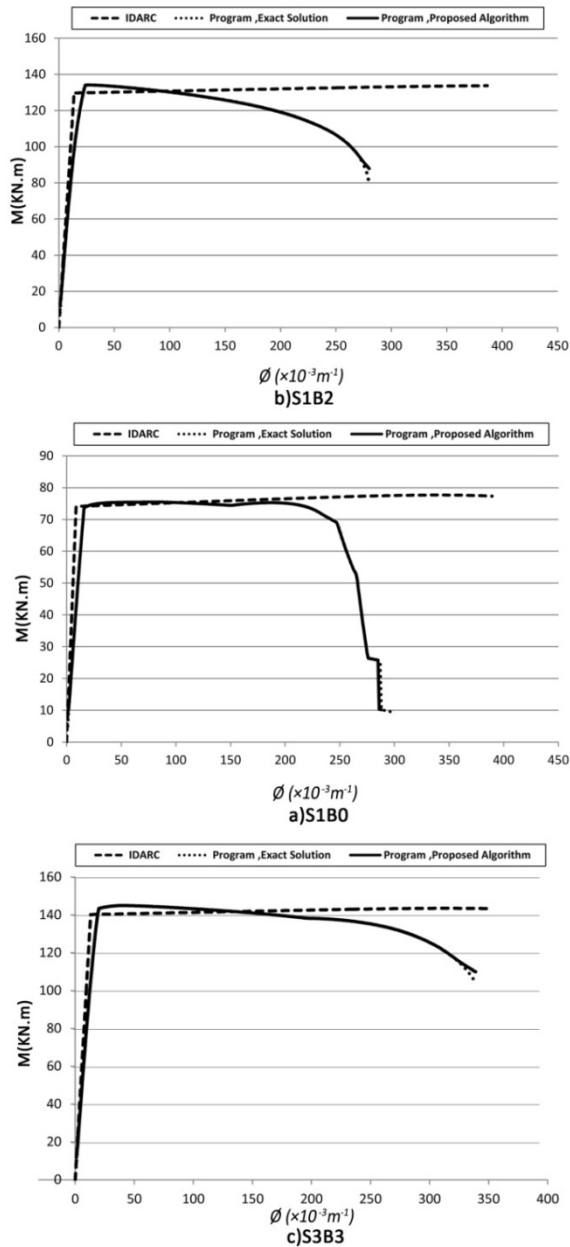
| نام تیر | روش تحلیل | انحنا | لنگر | ارتفاع تار خشی | نیروی محوری |
|---------|----------------|--------------------------|--------|----------------|-------------|
| | | ($\times 10^{-3} 1/m$) | (KN.m) | (cm) | (KN) |
| S1B0 | نتیجه‌ی IDARC | ۹۹/۹۷ | ۷۵/۳ | ۶/۶۰ | ۷/۸۹ |
| | نتیجه‌ی برنامه | ۱۰۰ | ۷۵/۳۳ | ۶/۳۵ | ۲/۰۱ |
| S1B2 | نتیجه‌ی IDARC | ۲۴۹/۰۷ | ۱۳۲/۶ | ۱۱/۲۴ | -۲۱۰/۷ |
| | نتیجه‌ی برنامه | ۲۵۰/۰ | ۱۰۶/۵ | ۱۸/۶۸ | -۰/۱۵ |

همان‌طور که پیش از این نیز توضیح داده شد مقدار خطای برنامه در این قسمت به طور مستقیم روی صحت شاخص خسارت پارک اثر می‌گذارد.

۲-۶- الگوریتم اصلاح شده

در بخش پیشین با مقایسه‌ی نتایج منحنی لنگر-انحنای تعدادی تیر، عدم کفایت الگوریتم به‌کار رفته در IDARC نشان داده شد. در این قسمت الگوریتم مذکور اصلاح شده، به عنوان نمونه و برای جلوگیری از طولانی شدن بحث، تنها نتایج تحلیل مقطع تیرهای S1B0، S1B2 و S3B3 با استفاده از این الگوریتم ارائه می‌شود. ایده‌ی به‌کار رفته در

پیشنهادی به‌طور کامل منطبق با نتایج روش دقیق سات
شکل (۹).



شکل (۹) مقایسه‌ی نتایج تحلیل مقطع به روش الگوریتم پیشنهادی، حل دقیق و نرم‌افزار IDARC

۳- نتیجه‌گیری

با بررسی‌های صحت نتایج تحلیل لنگر- انحنای مقطع

۵- نیروی محوری برآیند تنش‌ها در مقطع با استفاده از
رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta N_K^i = (\sum f_{ci} \times A_{ci} + \sum f_{sj} \times A_{sj})_K^i \quad (22)$$

۶- کنترل هم‌گرایی:

• اگر $|\Delta N_K^i| \leq \epsilon$ گام هم‌گرا شده است، در نتیجه ϕ_K ثبت می‌شود و لنگر نظیر این انحنا نیز به صورت ذیل محاسبه می‌شود. در این رابطه z_{sb} موقعیت پایین‌ترین آرما تور مقطع است.

$$M_K = \sum f_{ci} \times A_{ci} \times (z_i - z_{sb}) + \sum f_{sj} \times A_{sj} \times (z_j - z_{sb}) \quad (23)$$

(۲۳) بعد از تعیین M_K فرایند گام به گام بالا با برگشت به گام ۱ تکرار می‌شود.

• اگر $|\Delta N_K^i| > \epsilon$ مقدار نمودی کرنش مرکز سطح مقطع به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta \epsilon_K^{i+1} = \frac{-\Delta N_K^i}{K_{A,K}^i} \quad (24)$$

$$K_{A,K}^i = \left(\sum_{i=1}^{NCC} E_{cf} \times A_{cf} + \sum_{j=1}^{NSS} E_{sf} \times A_{sf} \right)_K^i \quad (25)$$

با تعیین مقدار نمودی $\Delta \epsilon_K^{i+1}$ باردیگر کرنش در مرکز سطح مقطع محاسبه می‌شود:

$$\left\{ \begin{matrix} \epsilon_0 \\ \phi \end{matrix} \right\}_K^{i+1} = \left\{ \begin{matrix} \epsilon_0 \\ \phi \end{matrix} \right\}_K^i + \left\{ \begin{matrix} \Delta \epsilon_0 \\ 0 \end{matrix} \right\}_K^{i+1} \quad (26)$$

با در دست داشتن مقادیر جدید $\epsilon_{0,K}^{i+1}$ و ϕ_K^{i+1} و با افزایش شماره‌ی تکرار $(i = i + 1)$ به مرحله‌ی ۲ بر می‌گردیم.

شکل (۹) نشانگر منحنی لنگر- انحنای تیرهای مذکور با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و روش حل انتگرالی است. برای این‌که تنها سنجش صحت الگوریتم، تعداد نوارهای مقطع زیاد لحاظ شده تا تقریبات موجود در روش نواری باعث انحراف از هدف اصلی نشود. نتایج الگوریتم

2. Adelino V. Lopes , Sérgio M.R. Lopes, Ricardo N.F. do Carmo, "Effects of the compressive reinforcement buckling on the ductility of RC beams in bending", J. Eng. Struct. 2012 (37), 14-23
3. SEQMC: SEQAD Moment Curvature Analysis Tools, Priestley
4. UCFYBER: Cross Section Analysis Structural Software, Chadwell, Charles B. , Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 1999
5. Park, Y. J. ; Ang, A. H.-S. "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", J. Struct. Div. ASCE 111(4), 722-739, 1985.
6. Reinhorn, A.M., Valles, R.E. and Kunnath, S. K. (2006). IDARC 2D version 6.1 "A program for the Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete structures". State University of New York, Buffalo, N.Y.
7. Kent, D. C. ; Park, R. "Flexural members with confined concrete." J. Struct. Div., ASCE, 97 (7), 1969-1990
8. Chang, G.A.; Mander, J.B., "Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part 1 – Evaluation of Seismic Capacity," NCEER Technical Report No. NCEER-94-0006, State University of New York, Buffalo, N.Y. 1994.
9. Open Sees: open system for earthquake engineering simulations.
10. <http://www.opensees.org>
11. Scott BD, Park R, Priestley MJN. "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates." ACI J 1982; 79 (1):13-27.
12. Park, R., Priestley, M. J. N., and Gill, W. D. "Ductility of square confined concrete columns." J. Struct. Div., ASCE, 108(4), 929-950. (1982)
13. Valles R.E.; Kunnath S.K.; Reinhorn A.M.; Lobo R.F. IDARC version 4.0 " A program for the inelastic damage analysis of RC structures", Technical Report NCEER-96-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo NY. 1996.

به وسیله نرم افزارهای IDARC و OpenSees نتایج ذیل حاصل شده است:

۱- منحنی لنگر- انحنای به دست آمده از نرم افزار IDARC در برخی از موارد شرط تعادل نیروی محوری در مقطع را تأمین نمی کند؛ بنابراین نتایج آنالیز مقطع این نرم افزار صحت لازم را ندارد.

۲- IDARC در محاسبه انحنای نهایی مقطع، شرط محدود بودن کرنش دورترین تار فشاری بتن به کرنش نهایی بتن را تأمین نمی کند؛ بنابراین اعدادی که به عنوان انحنای نهایی معرفی می کند خطای زیادی دارد که صحت عملکرد برنامه را در محاسبه شاخص خسارت Park زیر سوال می برد.

۳- IDARC بر خلاف آنچه که ادعا کرده است آثار آرماتور جانبی را به طور خودکار در محاسبه ضریب ZF، و بالتبع در محاسبه منحنی لنگر انحنا، وارد نمی کند.

۴- الگوریتم پیشنهاد شده به خوبی توانسته است ایرادهای الگوریتم برنامه IDARC را برطرف کند و انطباق کاملی با نتایج تحلیلی به روش دقیق دارد.

۵- نتایج تحلیل مقطع OpenSees دقت کافی دارد. تنها در برخی از نمونه ها تحلیل تا لحظه رسیدن به کرنش نهایی بتن ادامه نیافته است.

۶- نتایج مدل بتن Mander نسبت به Kent&Park انطباق به تری با نتایج آزمایشگاهی دارد. به طور کلی به نظر می رسد استفاده از مدل های بتن نوین تر در کد IDARC، می تواند به افزایش صحت نتایج کمک کند.

۴- مراجع

1. Chugh, R. Studies on RC Beams, Columns and Joints for Earthquake-resistant Design, M. Tech. Thesis, IIT Madras (2004).

15. Priestley, Seible, Calvi, "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, 1996.

14. Mander; Priestley; Park. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", J.Struct. Eng., ASCE , 114(8), p.1804-1826, 1988.