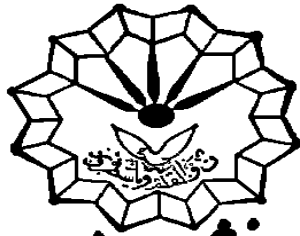


سلافة



دانشگاه رازی

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی عمران گرایش سازه

عنوان پایان نامه

بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح دارای خاموت دورپیچ

دانشجو:

حکمت کوشکی

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۲/۱۸ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

- | | | | | |
|------------------------------|------------------------|-----------------|----------|-------|
| ۱- استاد راهنمای پایان نامه: | دکتر ابراهیم خلیل زاده | با مرتبه ی علمی | استادیار | امضاء |
| ۲- استاد داور داخل گروه: | دکتر حمیدرضا اشرفی | با مرتبه ی علمی | استادیار | امضاء |
| ۳- استاد داور داخل گروه: | دکتر مجتبی فتحی | با مرتبه ی علمی | استادیار | امضاء |

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.

با تشکر

از استاد گرامی

دکتر ابراهیم خلیل زاده

به پاس زحمات فراوان ایشان

با توجه به اینکه بر روی رفتار تیرهای بتنی، با خاموت بسته تحت اثر برش و پیچش مطالعات زیادی چه به صورت تئوری چه به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته است، اما بر روی تیرهای بتنی با خاموت دورپیچ مطالعات زیادی صورت نگرفته است، هدف مطالعه حاضر بررسی اثر خاموت های دورپیچ بر روی رفتار تیرهای با سطح مقطع مستطیلی و مقایسه عملکرد این تیرها در مقابل نیروی برشی با تیرهای دارای خاموت معمولی می باشد. در بخش دیگر این مطالعه به بررسی رفتار تیرهای تحت اثر پیچش پرداخته شده است. که در آنها مقایسه لنگر نهایی، تغییر شکل و جذب انرژی خاموت های دورپیچ با خاموت های معمولی صورت گرفته است. در این تحقیق مشاهده شد که در تیرهای تحت اثر برش، خاموت های دورپیچ پیشرفته (SPA) نسبت به خاموت معمولی (ST) افزایش مقاومت نهایی و جذب انرژی به ترتیب در حدود ۲۳ درصد و ۴۹ درصد را از خود نشان می دهند. در تیرهای تحت اثر پیچش، در دورپیچ های موافق (SPL) نسبت به خاموت معمولی (ST) افزایش مقاومت نهایی و جذب انرژی به ترتیب در حدود ۱۲ درصد و ۲۷ درصد مشاهده شد. زاویه قرار گیری خاموت ها هم به عنوان متغیر دیگری که بر روی رفتار اینگونه تیرها تاثیر گذار می باشد مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور انواع تیرهای دارای دورپیچ و خاموت معمولی به صورت عددی با نرم افزار ABAQUS مدل شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. برای صحت سنجی مدل سازی از نتایج آزمایشگاهی موجود و معتبر (۲۰۱۳) استفاده شده است.

واژگان کلیدی: تیر بتنی، خاموت دورپیچ، برش، پیچش، جذب انرژی.

۵ چکیده

۹ فصل اول

۱۰ ۱-۱ مقدمه

۱۰ ۲-۱ رفتار اعضاء بتن آرمه تحت برش

۱۳ ۳-۱ تیر با خاموتهای قائم

۱۴ ۴-۱ تیر با خاموتها یا میلگردهای مایل

۱۶ ۵-۱ نکات و محدودیتهای آئیننامه‌های

۱۶ ۱-۵-۱ جزئیات فولاد گذاری برشی بر اساس ACI318

۱۸ ۲-۵-۱ جزئیات فولاد گذاری برشی بر اساس آبا

۱۹ ۶-۱ پیچش

۲۱ ۷-۱ تنش پیچشی در مقطع مستطیل

۲۲ ۸-۱ سختی پیچشی مقاطع همگن

۲۲ ۹-۱ پیچش اعضاء بتنی غیر مسلح (تئوری خمش کج)

۲۶ ۱۰-۱ پیچش اعضاء بتن مسلح - تئوری خرابای فضایی

۲۷ ۱۱-۱ جزئیات فولاد گذاری پیچشی

۲۷ ۱-۱۱-۱ جزئیات فولاد گذاری پیچشی بر اساس ACI318

۲۸ ۲-۱۱-۱ جزئیات فولاد گذاری پیچشی بر اساس آیین نامه بتن ایران (آبا)

۳۰ فصل دوم

۳۱ ۱-۲ مقدمه

- ۲-۲ بررسی ظرفیت برشی تیرها با آرما تورهای عرضی ممتد ۳۱
- ۲-۳ تاثیر دورپیچ های مستطیلی بر قاب های بتن مسلح ۳۲
- ۲-۴ مطالعه رفتار تیرهای T شکل با سیم های فولادی ممتد ۳۳
- ۲-۵ بررسی تاثیر دورپیچ های مستطیلی بر دوران پلاستیک تیرها ۳۵
- ۲-۶ بررسی محصور شدگی تیرها با دورپیچ های مستطیلی ۳۷
- ۲-۷ مزایای استفاده از دورپیچ های مستطیلی در تیرها ۳۷
- ۲-۸ بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح تحت برش ۴۴
- ۲-۹ بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح تحت پیچش ۴۴
- ۲-۱۰ مطالعه نحوه پیدایش و گسترش ترک ها ۴۴

فصل سوم ۴۷

- ۳-۱ مقدمه ۴۸
- ۳-۲ مزایای ABAQUS ۴۹
- ۳-۳ نحوه مدل سازی بتن در ABAQUS ۵۰

فصل چهارم ۵۳

- ۴-۱ صحت سنجی مدل سازی ۵۴
- ۴-۲ پارامترهای بررسی شده در این مطالعه ۵۸
- ۴-۳ مشخصات نمونه های مدل سازی شده تحت پیچش ۵۸
- ۴-۳-۱ مشخصات مکانیکی مصالح ۵۸
- ۴-۳-۲ ابعاد نمونه ها ۵۹
- ۴-۴ بررسی عملکرد انواع مختلف خاموت در پیچش ۶۲
- ۴-۵ بررسی اثر فاصله در خاموت SPL تحت پیچش ۶۷
- ۴-۶ بررسی اثر فاصله در خاموت ST تحت پیچش ۶۹

۷-۴ بررسی اثر فاصله در خاموت SPU تحت پیچش ۷۰_____

۸-۴ بررسی اثر زاویه خاموت در تیر تحت پیچش ۷۲_____

۹-۴ مشخصات نمونه های مدل سازی شده تحت برش ۷۷_____

۱-۹-۴ مشخصات مکانیکی مصالح ۷۷_____

۲-۹-۴ ابعاد نمونه ها ۷۸_____

۱۱-۴ بررسی اثر فاصله در خاموت گذاری تحت برش ۸۷_____

۱-۱۱-۴ بررسی اثر فاصله در خاموت SPA تحت برش ۸۷_____

۲-۱۱-۴ بررسی اثر فاصله در خاموت SP تحت برش ۸۹_____

۳-۱۱-۴ بررسی اثر فاصله در خاموت ST تحت برش ۹۱_____

۱۲-۴ بررسی اثر زاویه خاموت در تیر تحت برش ۹۲_____

۹۹ _____ فصل پنجم

جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۰_____

منابع ۱۰۱_____

منابع و مأخذ ۱۰۲_____

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

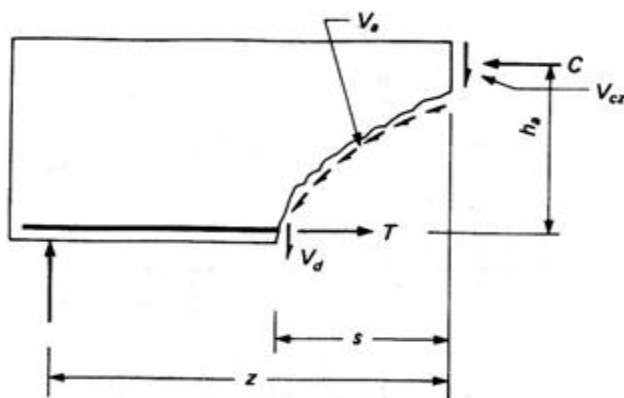
با توجه به اینکه بر روی رفتار تیرهای بتنی، با خاموت بسته تحت اثر برش و پیچش مطالعات زیادی چه به صورت تئوری چه به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته است؛ اما بر روی تیرهای بتنی با خاموت دورپیچ مطالعات زیادی صورت نگرفته است؛ لذا هدف مطالعه حاضر بررسی اثر خاموت‌های دورپیچ بر روی رفتار تیرهای با سطح مقطع مستطیلی است و عملکرد این تیرها در مقابل لنگر پیچشی و نیروی برشی در مقایسه با تیر با خاموت بسته پرداخته شده است.

۲-۱ رفتار اعضاء بتن آرمه تحت برش

پس از ترک خوردن، انتقال برش در عضو بتنی توسط ترکیبی از مکانیزم‌های زیر مطابق شکل (۱-۱) صورت می‌گیرد:

۱- مقاومت برشی بتن ترک نخورده V_{cz}

۲- نیروی ناشی از درگیر بودن دانه‌های سنگی در محل ترک V_a (که مشابه نیروی اصطکاک ناشی از تماس سطوح ناصاف بتن در دو طرف ترک است)



شکل ۱-۱ مکانیزم انتقال برش پس از ایجاد ترک [۲۰۱].

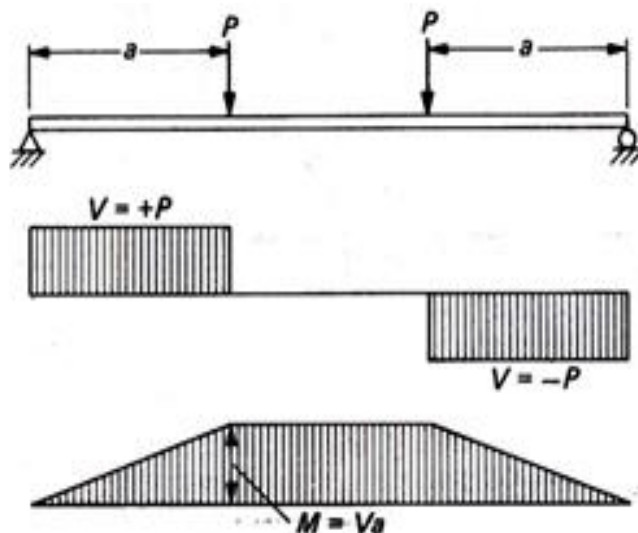
۳- عمل برشی آرماتور طولی V_a (یعنی مقاومت آرماتور طولی در مقابل نیروی عرضی)

برای تیرهای با مقطع مستطیل شکل، مکانیزم های فوق به ترتیب بین ۲۰ تا ۴۰ درصد، ۳۳ تا ۵۰ درصد و ۱۵ تا ۲۵ درصد برش را انتقال می دهند. اینکه آیا پس از ترک خوردن، عضو بتنی می تواند بار اضافی تحمل کند یا خیر بستگی به ابعاد مقطع و نسبت تنش های برشی و خمشی در مقطع دارد. از آنجا که حداکثر تنش کششی ناشی از خمش (f_t) متناسب با M/bd^2 و حداکثر تنش برشی نیز متناسب با v/bd است نسبت این دو تنش در مقطع برابر است با رابطه (۱-۱) [۲و۱].

$$\frac{f_t}{v} = k \frac{M}{Vd} \quad (1-1)$$

که در آن k یک ضریب تناسب است. برای یک تیر ساده که توسط دو بار متمرکز مساوی به طور متقارن بارگذاری شده است. در شکل (۲-۱) نسبت m/v را می توان به فاصله a ، که در آن برش ثابت است، تعبیر کرد. فاصله a را اصطلاحاً دهانه برش می نامند. در حالت کلی، یعنی وقتی برش در طول تیر تغییر می کند، دهانه برش را می توان با عبارات زیر بیان کرد :

$$a = \frac{M}{V} \quad (2-1)$$



شکل ۲-۱ تعریف دهانه برش [۲].

که برای نقاط مختلف طول تیر مقادیر مختلفی دارد.

با قرار دادن رابطه (۲-۱) در رابطه (۱-۱)، نسبت تنش‌های خمشی و برشی برابر می‌شود با:

$$\frac{f_t}{v} = k \left(\frac{a}{d} \right) \quad (۳-۱)$$

نتایج آزمایش‌ها نشان داده‌اند که نسبت a/d تأثیر اساسی بر مقاومت برشی مقطع ترک خورده دارد. به طور کلی بسته به مقدار این نسبت، مکانیزم گسیختگی را می‌توان در چهار گروه دسته‌بندی کرد: [۱ و ۲ و ۳]

۱. تیرهای عمیق با نسبت a/d کوچکتر از ۱
۲. تیرهای کوتاه با نسبت a/d بین ۱ تا ۲/۵ که در این دو حالت مقدار مقاومت برشی بیشتر از مقاومت ترک خوردگی قطری است.
۳. تیرهای معمولی با دهانه‌های متوسط و نسبت a/d بین ۲/۵ تا ۶، که در این حالت مقاومت برشی برابر مقاومت ترک خوردگی قطری است.
۴. تیرهای بلند با نسبت a/d بزرگتر از ۶ که معمولاً در آنها مقاومت خمشی از مقاومت برشی کمتر است، به عبارت دیگر، قطعه به ندرت به مقاومت برشی خود می‌رسد.

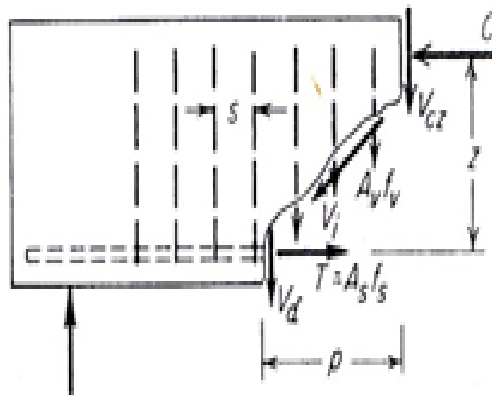
به طور خلاصه مطالعه حالات رفتاری فوق نتیجه می‌دهد که در اثر برش، ترکهای قطری به وجود می‌آیند؛ در اثر این ترک خوردگی، تیرهای معمولی با دهانه‌های متوسط فوراً به مقاومت برشی رسیده و گسیخته می‌شوند، در حالی که تیرهای کوتاه‌تر در اثر بازتوزیع تنش‌های مقطع ترک خورده، همچنان به مقاومت در مقابل برش ادامه می‌دهند؛ به عبارت دیگر دارای ذخیره مقاومت هستند. در شرایط حاضر نتایج تئوری و تجربی در مورد این ذخیره مقاومت و میزان بازتوزیع تنش‌ها بسیار محدود است و لذا در طراحی کلیه تیرها (به استثنای تیرهای عمیق) فرض می‌شود که با ایجاد ترک‌های قطری، قطعه به مقاومت برشی خود می‌رسد [۱ و ۲ و ۳].

رابطه (۴-۱) محاسبه برش ترک خوردگی تیرها را نشان می‌دهد: [۱]

$$V_c = \left[0.5\sqrt{f'_c} + 175 \frac{p_w V_u d}{M_u} \right] b_w d \leq .93\sqrt{f'_c} b_w d \quad (۴-۱)$$

۳-۱ تیر با خاموت‌های قائم

چون آرماتورهای عرضی در تیر ترک نخورده مؤثر نمی‌باشند، مقدار نیرو و یا تنش برشی که باعث به وجود آمدن ترک می‌شود، مشابه تیر بدون آرماتور عرضی می‌باشد. اغلب آرماتورهای عرضی از خاموت‌های قائم تشکیل می‌شوند. نیروهای مؤثر بر چنین تیری در شکل (۳-۱) نشان داده شده است: [۴ و ۵].



شکل ۳-۱ نیروهای مؤثر بر تیر با خاموت‌های قائم [۵].

تعداد نیروها در امتداد قائم ایجاب می‌نماید که:

$$V_c + V_s + V_d + V_{iy} = V_r \quad (5-1)$$

که در آن $V_s = \sum n A_v f_v$ مجموع نیروهای قائم در خاموت‌ها و n تعداد خاموت‌های قطع شده توسط ترک می‌باشند. اگر S فاصله خاموت‌ها و p تصویر افقی ترک همانند شکل (۳-۱) باشد، خواهیم داشت [۵]

$$n = \frac{p}{s} \quad (6-1)$$

بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی محدود موجود در شرایط حاضر به طور محافظه کارانه فرض می‌شود که قبل از شکست یک تیر با آرماتور برشی، رابطه زیر برقرار است [۵]

$$V_c + V_d + V_{iy} = V_{cr} \quad (7-1)$$

همان طور که ملاحظه شد، n تعداد خاموت‌هایی که به فاصله s از یکدیگر قرار دارند، بستگی به طول p یعنی تصویر افقی ترک‌های قطری دارد. طول تصویر افقی مساوی ارتفاع مؤثر تیر در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، مقاومت برشی نهایی برابر با V_r خواهد بود [۵]:

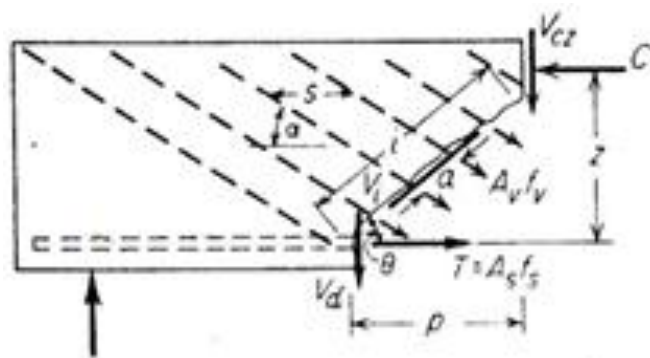
$$V_r = V_{cr} + \frac{A_v f_y d}{s} \quad (۸-۱)$$

با تقسیم طرفین رابطه بر bd می‌توان رابطه فوق را بر مبنای تنش بیان نمود [۵]:

$$\frac{V_r}{bd} = \frac{V_{cr}}{bd} + \frac{A_v f_y}{bs} \quad (۹-۱)$$

۴-۱ تیر با خاموت‌ها یا میلگردهای مایل

شکل (۴-۱) مجدداً نیروهای وارد بر یک ترک قطری را که نهایتاً باعث شکست می‌شود، نشان می‌دهد:



شکل ۴-۱ نیروهای مؤثر بر تیر با خاموت‌های مایل [۵]

ترک با تصویر افقی p و طول در امتداد شیب $L = p / \cos \theta$ توسط میلگردهای مایل که در فواصل افقی s قرار گرفته‌اند، قطع می‌گردد. تمایل ترک با زاویه θ و تمایل میلگردها با زاویه α نشان داده شده است. فاصله بین میلگردها به موازات امتداد ترک طبق قوانین مثلثاتی به صورت زیر به دست می‌آید [۵]:

$$a = \frac{s}{\sin \theta (\cot \theta + \cot \alpha)} \quad (۱۰-۱)$$

تعداد میلگردهایی که ترک را قطع می کنند $n=L/a$ پس از مقداری عملیات جبری به صورت زیر بیان می شود [۵]:

$$n = \frac{p}{s}(1 + \cot \alpha \tan \theta) \quad (11-1)$$

مؤلفه قائم نیروی یک میلگرد یا خاموت مایل مساوی $A_v F_y \sin \alpha$ می باشد؛ بنابراین، مجموع مؤلفه های قائم نیروی تمام میلگردهایی که ترک را قطع می کنند برابر است با [۵]:

$$V_s = n A_v f_v \sin \alpha = A_v f_v \frac{p}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \alpha) \quad (12-1)$$

همچنین تمام فرضیات دیگر، مشابه خاموتهای قائم فرض می شوند؛ بدین معنی که تصویر افقی ترک قطری مساوی $V_c + V_d + V_{i,y,d}$ در نظر گرفته می شود. بالاخره زاویه تمایل ترک قطری θ ، مساوی ۴۵ درجه در نظر گرفته می شود، هرچند که این زاویه متأثر از عوامل متعددی می باشد. بر این پایه، مقاومت نهایی وقتی که شکست توسط برش حادث می شود، به صورت زیر به دست می آید [۵]:

$$V_r = V_{cr} + \frac{A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s} \quad (13-1)$$

رابطه (۸-۱) که برای خاموتهای قائم به دست آمده، حالت خاصی از رابطه عمومی (۱۳-۱) در حالت $a=0$ می باشد، لازم به تذکر است که روابط (۸-۱) و (۱۳-۱) وقتی قابل استفاده هستند که هر ترک قطری دلخواه حداقل توسط یک خاموت یا میلگرد مایل قطع شده باشد. در غیر این صورت آرماتورهای عرضی در مقاومت برشی مشارکت نخواهند داشت و ترک قطری می تواند در حد فاصل دو خاموت تشکیل شده و تیر را همانند حالتی که در جان فولاد های برشی تعبیه نشده است، از بین ببرد. این مسئله ایجاب می کند که یک حد فوقانی برای فاصله s در نظر گرفته شود تا اطمینان حاصل گردد که ترک قطری حتماً توسط آرماتورهای عرضی قطع می شود [۶و۵].

اگر بحث را خلاصه کنیم، در حال حاضر طبیعت و مکانیسم شکست‌های کششی قطری تقریباً به طور واضح به صورت کیفی مشخص شده است؛ ولی، بعضی از فرضیات کمی که در روابط مورد استفاده قرار گرفته اند نمی‌توانند بر پایه کاملاً تحلیلی اثبات گردند، اما نتایج محاسبه شده قابل قبول هستند و عموماً به طور محافظه کارانه ای با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت دارند و مهم‌تر اینکه عملکرد سازه‌هایی که بر این مبنا محاسبه گشته‌اند، رضایت بخش می‌باشند [۶۵].

۵-۱ نکات و محدودیت‌های آئین‌نامه‌ای

۱-۵-۱ جزئیات فولاد گذاری برشی بر اساس ACI 318

حداکثر فاصله خاموت‌های برشی

بر اساس ACI 318 حداکثر فاصله خاموت‌های برشی که عمود بر محور تیر قرار می‌گیرند، نباید بیش از $d/2$ و یا ۶۰۰ باشد. با این محدودیت فاصله، هر ترک مورب ۴۵ حداقل یک خاموت برشی را در میانه ارتفاع تیر قطع می‌کند. حداکثر فاصله خاموت‌ها برای فولادهای برشی مایل به صورتی رعایت می‌شود که هر ترک مورب با زاویه ۴۵ درجه، حاقل توسط یک خاموت برشی قطع شود. این محدودیت به صورت $S_{max} = (d/2)(1 + \cot \theta)$ بیان می‌شود، که برای خاموت‌های مایل با زاویه ۴۵ درجه برابر d خواهد بود. [۷]

محدودیت حداکثر فاصله خاموت‌ها برای فولاد برشی قائم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\text{اگر } V_s \leq 2 V_c \rightarrow S_{max} = \min [d/2 , 600 \text{ mm}] \quad (۱۴-۱)$$

$$\text{اگر } V_s > 2 V_c \rightarrow S_{max} = \min [d/2 , 600 \text{ mm}] \quad (۱۵-۱)$$

در روابط بالا V_c باید براساس رابطه زیر منظور شود.

$$V_c = 1/6 \sqrt{f_c} b_w d \quad (۱۶-۱)$$

حداقل فولاد جان:

برای جلوگیری از شکست ناگهانی برشی به محض تشکیل اولین ترک مورب، لازم است حداقل فولاد برشی در مقطع تامین شود. این حداقل توسط ACI 318 به صورت زیر معرفی شده است:

$$\left(\frac{A_v}{s}\right)_{\min} = 1/16\sqrt{f_c} \frac{b_w}{f_y} \geq 1/3 \frac{b_w}{f_y} \quad (17-1)$$

در رابطه فوق اگر $f_c < 28\text{mpa}$ باشد، قسمت دوم رابطه؛ و در غیر این صورت قسمت اول رابطه تعیین کننده خواهد بود. [۷]

حداکثر فولاد جان

ACI 318 برای تامین ایمنی کافی در مقابل باز شدن بیش از حد ترک‌های مورب تحت بارهای سرویس، و نیز اطمینان از عدم خورد شدن بتن تحت فشار بین دو ترک قطری، حداکثر فولاد جان را به صورت زیر محدود می‌کند

$$V_s \leq 2/3\sqrt{f_c} b_w d \quad (18-1)$$

چنان چه در محاسبات برشی از رابطه ساده ۷-۲۱ برای تعیین V_c استفاده شود، محدودیت حداکثر فولاد جان را می‌توان با یکی از روابط زیر، کنترل نمود: [۷]

$$V_s \leq 4 V_c \quad (19-1)$$

$$V_n \leq 5 V_c \quad (20-1)$$

$$V_u \leq 5\phi V_c \quad (21-1)$$

حداکثر فولاد جان برای خاموت‌های قائم را می‌توان به صورت زیر کنترل کرد:

$$\left(\frac{A_v}{s}\right)_{\min} = 2/3 \frac{\sqrt{f_c}}{f_y} b_w \quad (22-1)$$

۱-۵-۲ جزئیات فولاد گذاری برشی بر اساس آبا

حداکثر فاصله خاموت‌های برشی

بر اساس آئین نامه آبا حداکثر فاصله خاموت‌های قائم به صورت زیر محدود می‌شود:

$$\text{اگر } V_s \leq 2v_c b_w d \rightarrow S_{\max} = d/2 \quad (۲۳-۱)$$

$$\text{اگر } V_s > 2v_c b_w d \rightarrow S_{\max} = d/4 \quad (۲۴-۱)$$

در مورد خاموت‌های مایل فاصله بین میلگردها باید چنان باشد که هر خط ۴۵ درجه که از وسط مقطع می‌گذرد، حداقل به وسیله یک ردیف از فولادهای برشی قطع گردد. این فاصله در صورتی که $V_s > 2v_c b_w d$ باشد، به نصف کاهش می‌یابد. [۸]

حداقل فولاد برشی

حداقل فولاد برشی از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$A_V = 0.35 \frac{b_w S}{f_y} \quad (۲۵-۱)$$

این ضابطه در مورد دالها و شالوده‌ها، سقف‌های تیرچه و بلوک و تیرهای با ارتفاع کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر رعایت نمی‌شود [۸] .

حداکثر فولاد برشی:

نیروی برشی مقاوم نهایی خاموت‌ها V_s در هیچ حالتی نباید بیشتر از $4V_c$ در نظر گرفته شود، یعنی

همواره باید $V_s \leq 2v_c b_w d$ باشد. [۸]

۶-۱ پیچش

به کرات اتفاق می افتد که اعضای بتن مسلح تحت تأثیر پیچش تنها و یا پیچش توأم با برش و خمش قرار می گیرند. تیر طره ای شکل (۵-۱) الف به مقدار زیادی تحت پیچش و به مقدار کمی تحت تأثیر برش و خمش ناشی از وزن خود قرار دارد. تیر دو سر گیر دار شکل (۵-۱) ب به طور همزمان تحت تأثیر برش و خمش و پیچش قابل توجه قرار دارد. در شکل های (۵-۱) پ و ت، تیرهای لبه ای کف ساختمان ها که دال بتن آرمه فقط از یک طرف بر آن متصل است، تحت تأثیر پیچش ناشی از لنگر انتهایی دال قرار دارند. [۵]

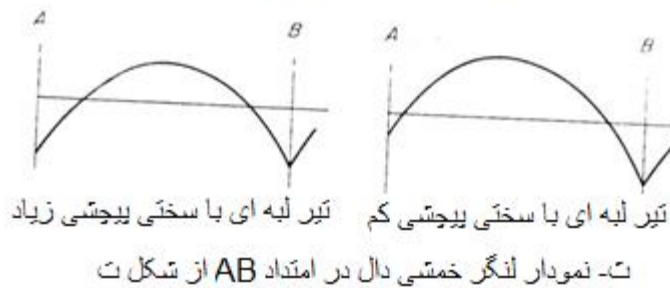
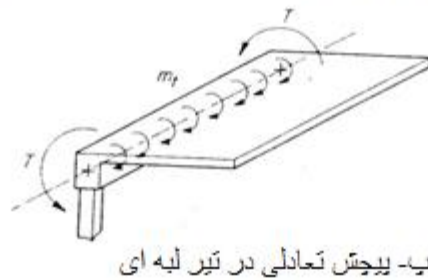
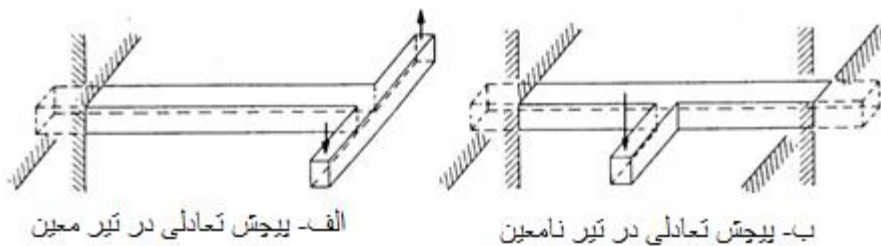
با توجه به مثالهای فوق، پیچش موجود در سازه ها را می توان به دو دسته تقسیم نمود:

۱- پیچش معین استاتیکی (یا پیچش تعادلی) که مقدار آن را می توان توسط معادلات استاتیکی تعیین نمود.

۲- پیچش نامعین استاتیکی (یا پیچش سازگاری) که تعیین مقدار آن نیاز به استفاده از معادلات سازگاری تغییر شکل ها دارد.

علت وجودی این نوع پیچش، دوران لازم برای ایجاد سازگاری تغییر شکل ها بین اجزای متصل به هم (نظیر تیر لبه ای، دال و ستون) می باشد.

در شکل (۵-۱)، شکل های الف و ب و پ تحت پیچش تعادلی و شکل ت تحت پیچش سازگاری قرار دارد.



شکل (۵-۱) اعضای بتن مسلح تحت پیچش [۵]

در مثال‌های اشکال (۶-۱) الف و ب، مقدار پیچشی که لازم است اعضا با آن مقابله نمایند، بر پایه احتیاجات استاتیکی است و مستقل از سختی اعضاء می‌باشد. پیچش نامعین استاتیکی، همانطور که در اشکال (۶-۱) پ و ت نشان داده شده است، در وضعیت‌هایی به وجود می‌آید که اگر عامل نامعینی هندسی حذف گردد، پیچش از بین می‌رود برای نمونه، اگر در شکل (۶-۱) پ تکیه گاه A حذف گردد پیچش از بین می‌رود. به طور مشابه اگر در شکل (۶-۱) ت یک مفصل در نقطه B قرار داده شود، پیچش حذف می‌شود. برای چنین وضعیت‌هایی، مقدار لنگر پیچشی هر یک از اعضاء بستگی به مقدار سختی پیچشی و خمشی نسبی اعضاء دارد.