

اصول طراحی تیرهای لانه زنبوری به
همراه مدل سازی آن در نرم افزار ایتبس

علیرضا بینوایان

ناظر علمی:

عبدالله صفایی

Sabzsaze Group

sabzsaze.com

 Sabzsaze

 Sabzsaze



سبزسازه



مدلسازی و طراحی تیر لانه زنبوری در نرم افزار ایتبس

گروه صنعتی
سبزسازه

مقدمه

تیرهای لانه زنبوری به دلیل وزن کمتر، صرفه اقتصادی و افزایش ظرفیت خمشی، یکی از پرکاربردترین مقاطع در سازه‌های فولادی به شمار می‌آیند. این تیرها با ایجاد حفره‌های شش ضلعی در جان تیر آهن ساخته می‌شوند و در کنار مزایای متعدد، ضعف‌هایی مانند کاهش مقاومت برشی و احتمال کماتش جانبی نیز دارند.

از این رو در این مقاله با نحوه تولید و انواع مقاطع لانه زنبوری و روش نام‌گذاری آن‌ها آشنا می‌شوید. همچنین محاسبه و طراحی یک مثال جامع بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ای ارائه خواهد شد و در پایان، نحوه مدل‌سازی و تقویت تیر لانه زنبوری در نرم‌افزار ETABS آموزش داده می‌شود.

نام مقاله: مدلسازی و طراحی تیر لانه زنبوری در نرم افزار ایتبس
 نویسنده: علیرضا بینوایان
 ناظر علمی: عبدالله صفایی
 ناشر: سبزسازه
 نسخه: شهریور ماه ۱۴۰۴



نشانی دفتر مرکزی: تهران، خیابان مطهری، خیابان ملایری پور غربی،

پلاک ۱۰۲، طبقه ۵، واحد ۱۳

نشانی دفتر آموزش: بیرجند، معلم ۲۴، پلاک ۱۴

تلفن: ۰۵۶۳۲۰۱۷۰۰۱

کد پستی: ۹۷۱۷۶۳۴۶۷۲

پرسش و پاسخ درباره این کتاب:

<https://sabzsaze.com/castellated-beam/>

حق چاپ و نشر محفوظ و مخصوص ناشر می باشد. لذا هرگونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب بدون ذکر نام سبزسازه ممنوع بوده، شرعا حرام است و پیگرد قانونی دارد.



فهرست مطالب

صفحه

۱	علائم و تعاریف	۴
۲	تاریخچه‌ای در ارتباط با تیرهای با مقطع لانه‌زنبوری	۵
۳	دسته‌بندی لانه‌زنبوری	۶
۱.۳	انواع تیرآهن لانه‌زنبوری از نظر ابعاد	۷
۲.۳	انواع تیرآهن لانه‌زنبوری بر اساس شکل حفره	۷
۱.۲.۳	تیرآهن لانه‌زنبوری با سوراخ شش‌ضلعی	۷
۲.۲.۳	تیرآهن لانه‌زنبوری با سوراخ دایره‌ای	۷
۱.۲.۲.۳	مزایای تیرآهن لانه‌زنبوری (سوراخ شش‌ضلعی) و سلولی (سوراخ دایره‌ای)	۸
۳.۳	انواع تیرآهن لانه‌زنبوری (سوراخ‌های شش‌ضلعی) از نظر خط برش	۹
۴	انواع برشکاری جان تیرآهن	۱۰
۱.۴	روش گرم یا برنول	۱۱
۲.۴	روش سرد یا کوپال	۱۱
۵	مزایای و معایب تیرآهن لانه‌زنبوری	۱۲
۶	راهکارهای تقویت تیرآهن‌های لانه‌زنبوری	۱۴
۱.۶	تقویت تیرهای لانه‌زنبوری با استفاده از ورق	۱۴
۲.۶	تقویت تیرهای لانه‌زنبوری با بتن و فولاد	۱۵
۷	نام‌گذاری تیرهای لانه‌زنبوری (با سوراخ‌های شش‌ضلعی و دایره‌ای)	۱۶
۱.۷	مقایسه‌ی تیرهای لانه‌زنبوری با سوراخ‌های شش‌ضلعی و دایره‌ای	۱۷
۸	کاربرد اصلی تیرهای لانه‌زنبوری	۱۷
۱.۸	سازه‌های مربوط به پارکینگ‌ها	۱۸
۲.۸	تأسیسات صنعتی	۱۸
۳.۸	عبور تأسیسات تهویه و سایر تأسیسات بهره‌برداری از داخل جان تیر	۱۹
۴.۸	مقاومت در برابر ارتعاش	۱۹
۵.۸	زیبایی‌شناسی از منظر معماری در استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی	۲۰
۹	ضوابط آیین‌نامه‌ای طراحی تیرهای لانه‌زنبوری	۲۰
۱.۹	ضوابط آیین‌نامه‌ی طراحی تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی (AISC)	۲۹
۱۰	طراحی تیر لانه‌زنبوری غیرمرکب (غیر کامپوزیت)	۴۵
۱۱	نحوه ساخت و استفاده از مقطع لانه‌زنبوری در نرم افزار ایتبس	۶۸
۱.۱۱	روش اول	۶۹
۲.۱۱	روش دوم	۷۰
۳.۱۱	روش سوم	۷۲
۱۲	نتیجه‌گیری و جمع‌بندی	۷۳



۱ علائم و تعاریف

در این بخش علائم اختصاری و تعاریف اصطلاحات استفاده شده در این مقاله را با هم بررسی و تعریف می کنیم.

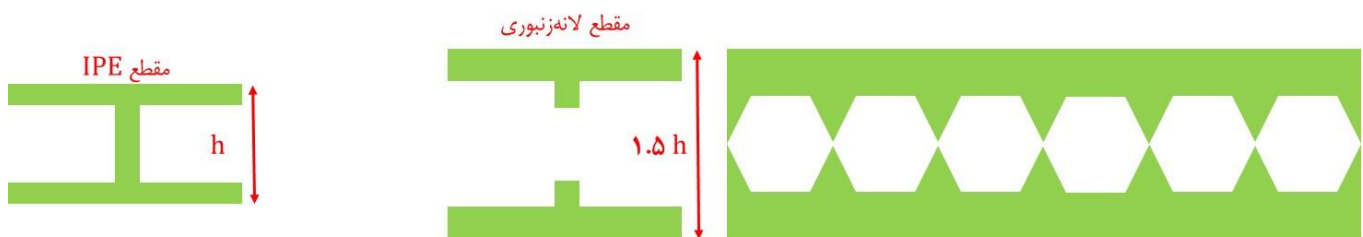
علائم	تعریف	واحد	علامت	تعریف	واحد
P_r	نیروی محوری مورد نیاز	بر حسب (N)	K_z	ضریب طول موثر حول محور z	-
M_r	لنگر خمشی مورد نیاز	بر حسب (N.mm)	K_y	ضریب طول موثر حول محور y	-
d_{effect}	فاصله ی بین مرکز سپری های بالا و پایین تیر لانه زنبوری	بر حسب (mm)	K_x	ضریب طول موثر حول محور x	-
A_{net}	مجموع مساحت های دو مقطع سپری بالا و پایین در مقطع تیر لانه زنبوری	بر حسب (mm ²)	r_x	شعاع ژیراسیون حول محور x	بر حسب (mm)
A_{tee}	مساحت هر کدام از مقطع سپری بالا و پایین بصورت جداگانه در مقطع تیر لانه زنبوری	بر حسب (mm ²)	r_y	شعاع ژیراسیون حول محور y	بر حسب (mm)
V_r	مقاومت برشی مورد نیاز	بر حسب (N)	$\bar{r}$	شعاع ژیراسیون قطبی	بر حسب (mm)
e	طول قسمت جان صلب در راستای محور طولی در تیر با مقطع لانه زنبوری (با سوراخ های شش ضلعی)	بر حسب (mm)	M_y	لنگر تسلیم حول محور خمشی	بر حسب (N.mm)
D_0	قطر سوراخ (حفره) در تیرهای سلولی	بر حسب (mm)	S_{x-tee}	مدول الاستیک سپری حول محور (x)	بر حسب (mm ³)
$L_c = KL$	طول موثر عضو بر	حسب (mm)	d	عمق سپری (تحت فشار)	بر حسب (mm)
C_w	ثابت تابیدگی مقطع	-	λ_{pf}	ضریب لاغری برای بال فشرده	-
G	مدول برشی فولاد	بر حسب (MPa)	λ_{rf}	ضریب لاغری برای بال غیرفشرده	-
J	ثابت پیچشی	بر حسب (mm ⁴)	L_b	طول بدون مهاربندی جانبی	بر حسب (mm)
x_0 و y_0	مختصات مرکز برش با توجه به مختصات اصلی	بر حسب (mm)			

۲ تاریخچه‌ای در ارتباط با تیرهای با مقطع لانه‌زنبوری

تیرهای با مقاطع وب^۱ (جان) گسترش یافته (افزایش ارتفاع جان تیر) با بازشوهای تکرار شونده برای اولین بار در سال ۱۹۱۰ در پل شیکاگو^۲ مورد استفاده قرار گرفت. این ایده نیز به طور مستقل توسط G.M. Boyd در سال ۱۹۳۵ در آرژانتین و بعداً در انگلستان به ثبت رسید. در دهه ۱۹۴۰، استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری^۳ و سلولی^۴ به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. ساخت چنین تیرهایی از نظر اقتصادی کارآمد نبود. در نتیجه، تا زمانی که تکنیک‌های تولید خودکار در دسترس قرار گرفت، استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی کاهش یافت. اتوماسیون بهبود یافته در ساخت، همراه با نیاز معماران و مهندسان سازه برای جستجوی راه‌های کارآمدتر و کم‌هزینه‌تر برای طراحی سازه‌های فولادی، منجر به استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی در ایالات متحده شده بود. افزایش استفاده از مقاطعی که ارتفاع جان آن‌ها افزایش یافته بود، در سراسر جهان رخ داده بود و به شکل‌گیری موسسه بین‌المللی تولیدکنندگان تیرهای سلولی در سال ۱۹۹۴ برای توسعه، ایجاد و حفظ استانداردهایی برای طراحی و ساخت تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی در سراسر جهان کمک کرده بود.

تیر آهن لانه‌زنبوری با برش طولی در تیر آهن IPE طبق الگویی مشخص ساخته می‌شود. هدف از ایجاد برش در تیر آهن لانه‌زنبوری، ایجاد حفره در جان تیر و اتصال مجدد دو قسمت تیر آهن به یکدیگر است، تا به این طریق ارتفاع جان تیر افزایش پیدا کند. با افزایش جان تیر، ممان اینرسی مقطع افزایش پیدا کرده، و این مساله منجر به افزایش مقاومت خمشی تیر می‌شود. دو قسمت تیر IPE به گونه‌ای برش داده می‌شوند که با جوشکاری نیمه‌های برش داده شده به یکدیگر، سوراخ‌های چندضلعی در بدنه تیر لانه‌زنبوری ایجاد گردد. تیرهای لانه‌زنبوری را می‌توان بر اساس شکل سوراخ‌های ایجاد شده در جان تیر طبقه‌بندی کرد؛ مانند لانه‌زنبوری شش ضلعی، دایره‌ای، هشت ضلعی و ...

تیر لانه زنبوری در مقایسه با تیرهای IPE، ارتفاع جان بیشتری دارند (۱/۵ برابر بیشتر از مقاطع IPE) ولی وزن آن‌ها تقریباً یکسان است. برای مثال، در تیر لانه زنبوری که از تیر IPE سایز ۱۸ ساخته شده باشد، ارتفاع تیر از ۱۸ سانتی‌متر به ۲۷ سانتی‌متر افزایش پیدا می‌کند (به دلیل ایجاد سوراخ‌هایی در جان تیرهای IPE). هدف از ساخت تیر لانه زنبوری این است که تیر بتواند ممان خمشی بیشتری را با خیز (تغییر شکل) کمتر، تحمل کند.



شکل ۱- مقاطع تیرهای لانه‌زنبوری

افزایش ارتفاع تیر به دلیل ایجاد بازشو (سوراخ و حفره) در جان تیر

افزایش ارتفاع تیر باعث افزایش مدول مقطع (S_x) و ممان اینرسی (I_x) مقطع می‌شود.

افزایش مدول مقطع (S_x) و ممان اینرسی (I_x) مقطع باعث افزایش مقاومت خمشی تیر لانه‌زنبوری می‌شود.

^۱ web section

^۲ Chicago Bridge

^۳ Castellated beam

^۴ Cellular beam



از مهم ترین ویژگی های تیرهای لانه زنبوری عبارتند از:

کارآمد بودن

از جمله اصلی ترین ویژگی تیرهای لانه زنبوری، می توانیم به افزایش عمق تیر بدون افزایش وزن آن اشاره کنیم. در نتیجه، تیرهای لانه زنبوری برای افزایش ظرفیت باربری بسیار کارآمد هستند و ۴۰ درصد ظرفیت حمل لحظه ای بیشتری دارند.

ارتفاع تیرآهن

حداکثر ارتفاع تیرهای لانه زنبوری (به لحاظ سازه تیرآهن) را می توانیم افزایش بدهیم که باعث می شود برای طراحی های بهینه با دهانه عریض و دهانه باز مناسب باشند.

طراحی نامتقارن

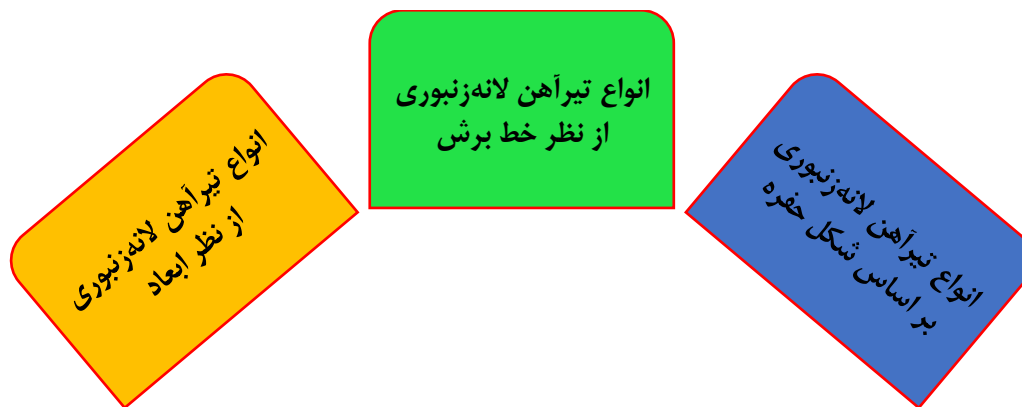
ایجاد سوراخ (حفره) در طول جان تیرآهن و افزایش عمق آن، باعث کاهش وزن تیر و افزایش ظرفیت حمل بار آن می شود.

سایر خواص

طراحی و نصب تیرهای لانه زنبوری، بسیار ساده است. ویژگی های فیزیکی تیرهای لانه زنبوری را برای دستیابی به اهداف مختلف می توانیم تغییر بدهیم و یا به صورت سفارشی تولیدشان کنیم. وزن تیرآهن لانه زنبوری را می توانیم تا ۴۰ درصد در مقایسه با تیر آهن IPE کاهش بدهیم.

۳ دسته بندی لانه زنبوری

دسته بندی تیرآهن لانه زنبوری از جنبه های گوناگون امکان پذیر است. مهم ترین دسته بندی تیرآهن های لانه زنبوری عبارتند از:



۱.۳ انواع تیرآهن لانه زنبوری از نظر ابعاد

تیرهای لانه زنبوری از تیرآهن سایزهای ۱۲ تا ۳۰ میلی متر ساخته می شوند که در نهایت، سایز یا ارتفاع آن ها تا ۱/۵ برابر تیرآهن های معمولی افزایش می یابد.

۲.۳ انواع تیرآهن لانه زنبوری بر اساس شکل حفره

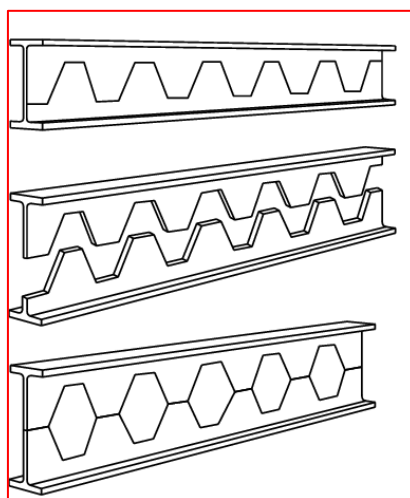
حفره هایی که در طول جان تیرآهن های لانه زنبوری ایجاد می شود، می تواند در اشکال مختلفی باشد. رایج ترین شکل تیرآهن لانه زنبوری، سوراخ های شش ضلعی و دایره ای می باشد.

۱.۲.۳ تیرآهن لانه زنبوری با سوراخ شش ضلعی

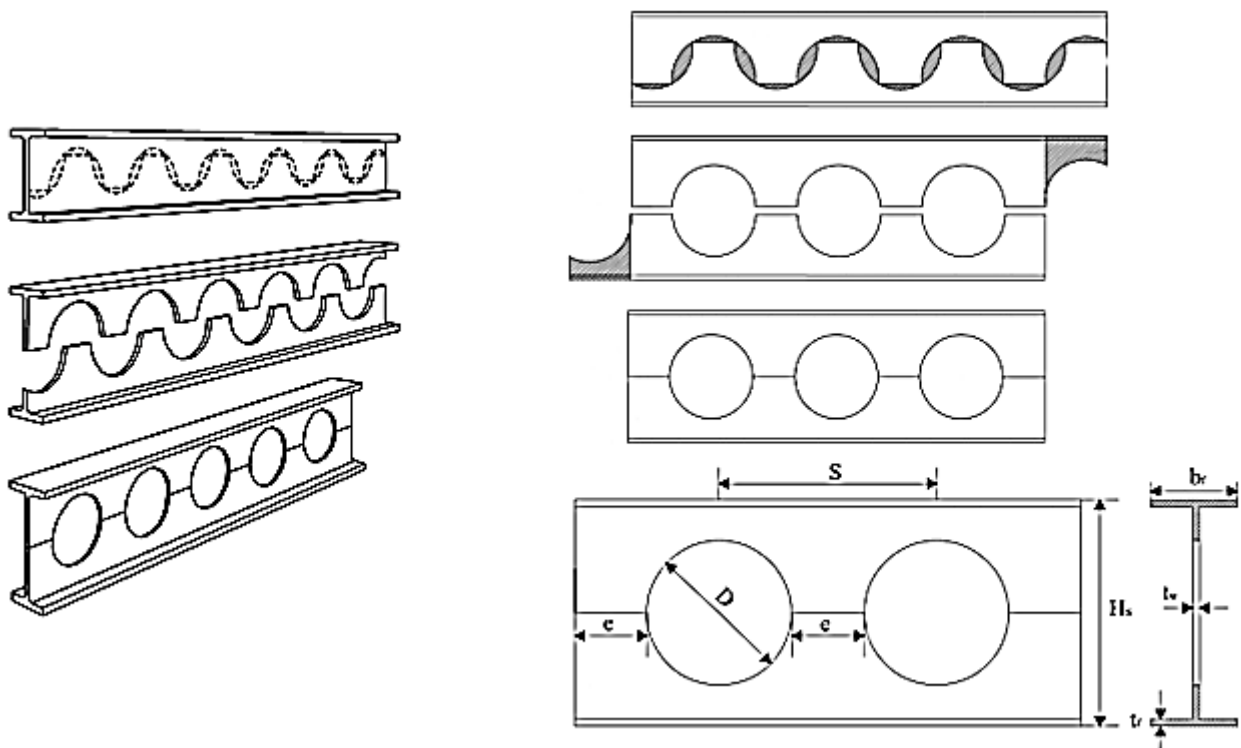
برای ساخت این نوع حفره، یک برش طولی در جان تیر اصلی به صورت خطوط شکسته زیگزاگ ایجاد می شود. سپس قسمت بریده شده بالایی با یک پله انتقال روی قسمت بریده شده پایینی حرکت داده می شود و دو قسمت در محل مشخص به یکدیگر جوش می شوند. با این کار، ارتفاع تیر به اندازه ارتفاع برش زیگزاگ افزایش می یابد و سوراخ های متوالی شش ضلعی در جان تیرآهن ایجاد می گردد.

۲.۲.۳ تیرآهن لانه زنبوری با سوراخ دایره ای

برای ساخت این نوع تیرآهن لانه زنبوری در طول خط مرکزی جان تیرآهن، الگوهای نیم دایره برش داده می شود. در مرحله بعد، درست مانند تیرآهن با سوراخ شش ضلعی، دو نیمه تیرآهن روی هم قرار داده شده و به یکدیگر جوش داده می شوند. در نهایت، تیرآهن لانه زنبوری با سوراخ دایره ای ایجاد می شود.



شکل ۲- تیرهای لانه زنبوری با سوراخ های شش ضلعی



شکل ۳- تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای (تیر سلولی)

تیرآهن‌های لانه زنبوری دارای سوراخ‌های شش ضلعی می‌باشند. در مورد تیرآهن لانه زنبوری این سوراخ‌ها در اندازه محدودیت دارند یعنی برای سایزهای بزرگتر نیاز به اصلاح دارند.

تیرآهن‌های سلولی دارای سوراخ‌های دایره‌ای هستند. تیرآهن‌های سلولی انعطاف پذیری بیشتری دارند و بدون افزایش قیمت و تغییر در روند ساخت می‌توان اندازه‌های مختلف از این تیرآهن را داشته باشیم.

۱.۲.۲.۳ مزایای تیرآهن لانه زنبوری (سوراخ شش ضلعی) و سلولی (سوراخ دایره‌ای)

در ادامه به مزایای تیرآهن لانه زنبوری (سوراخ شش ضلعی) و سلولی (سوراخ دایره‌ای) اشاره می‌کنیم.

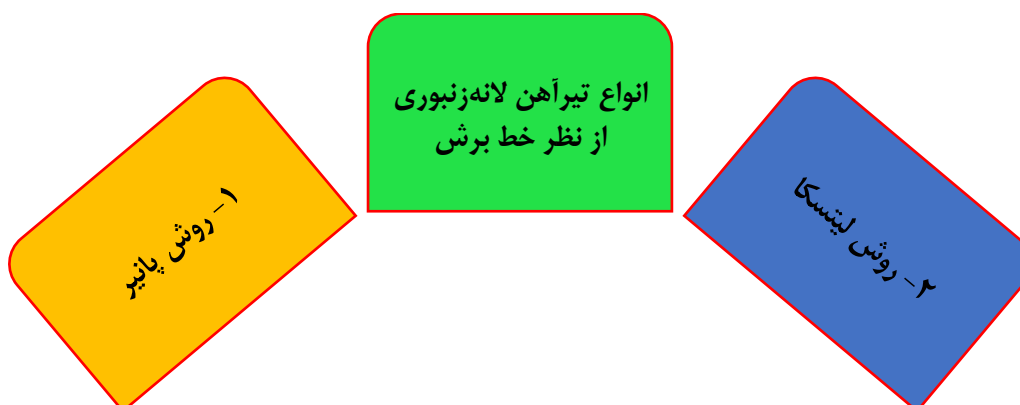


به منظور ساختن تیرهای لانه زنبوری، با استفاده از الگوی شش ضلعی از ورق آهن سفید نیم میلی متری (شابلن) ابتدا روی جان تیر آهن نورد شده و با توجه به استاندارد ساخت، علامت گذاری می‌گردد. سپس تیر آهن را روی یک شاسی افقی با زدن تک خال جوش در نقاط مختلف برای جلوگیری از تاب برداشتن قرار می‌دهند. آن گاه با استفاده از دستگاه برش در امتداد خط علامت گذاری شده اقدام به برش می‌کنند تا پروفیل به دو قسمت بالا و پایین تقسیم شود. حال اگر قسمت بالا را به اندازه یک دندان جابه‌جا کنیم و دندانهای دو قسمت بالا و پایین را به دقت مقابل هم قرار داده و از دو طرف با جوش پر می‌کنند. جوش قوسی نیمه اتوماتیک برای اتصال دو قسمت بریده شده؛ می‌تواند یک جوش خوب، بی‌عیب، سریع و مقرون به صرفه باشد. سپس جهت رفع نقص کاهش مقاومت برشی با توجه به منحنی نیروی برشی تیر، بعضی از حفره‌ها با ورق‌های تقویتی پر می‌شوند. لازم به ذکر است حداقل باید یک حفره در مجاورت تکیه‌گاه با ورق و به وسیله جوش کامل پر شود.

برای بریدن تیر می‌توان از روش کوپال نیز استفاده کرد. در این روش، با استفاده از دستگاه قطع کن سنگین که مجهز به گیوتین مخصوص است، تیر آهن به شکل سرد در امتداد خط شکسته قطع می‌شود.

۳.۳ انواع تیرآهن لانه زنبوری (سوراخ‌های شش ضلعی) از نظر خط برش

طراحی حفره‌ها یا سوراخ‌ها (شش ضلعی) به روش‌های متفاوتی روی جان تیرها انجام می‌گیرد. از جمله این روش‌ها پانیر یا لیتسکا است. در این دو روش طراحی، به وسیله یک سری عملیات مشخص، شکل روی مقطع جان را طراحی می‌کنیم و در نهایت برش می‌زنیم.



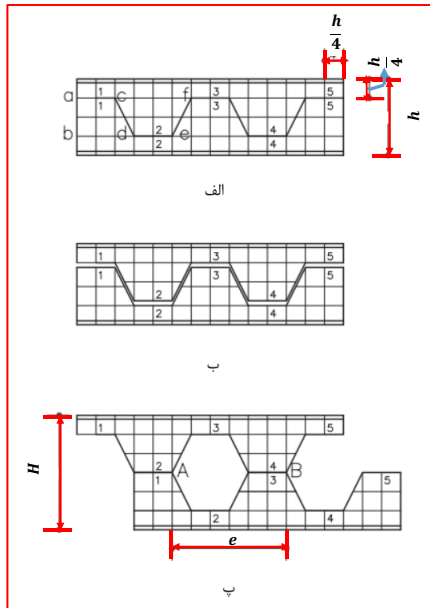


روش ساخت تیر آهن لانه زنبوری با ترسیم لیتسکا

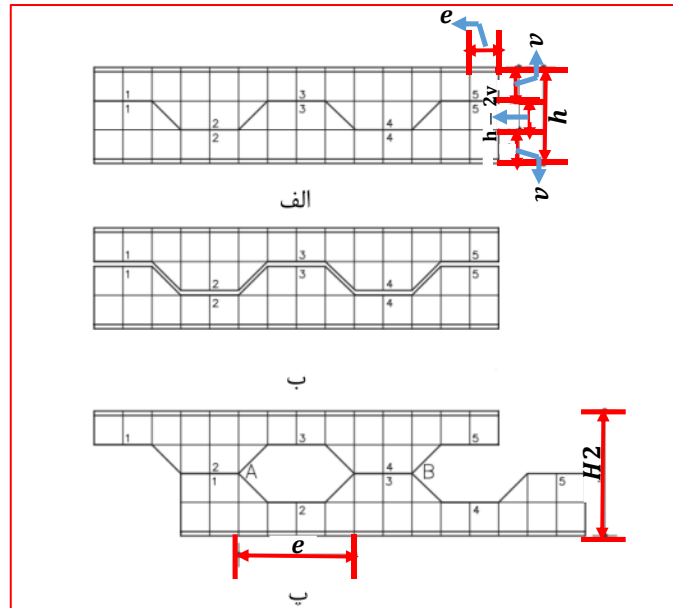
- در هر دو روش می توانیم قطعات ورق مربع یا مستطیل شکل را در روی دندانها جوش بدهیم که باعث افزایش ظرفیت خمش تیر می شود. در این گونه تیرها باید نهایت دقت را در جوشکاری به عمل بیاوریم.

روش ساخت تیر آهن لانه زنبوری با ترسیم پانیر

- در این روش ارتفاع تیر لانه زنبوری یکونیم برابر تیر I شکل معمولی می باشد. شیوه برش پانیر از متداول ترین اشکال برای برش تیر لانه زنبوری می باشد.



ساخت تیر آهن لانه زنبوری با ترسیم پانیر



ساخت تیر آهن لانه زنبوری با ترسیم لیتسکا

شکل ۴- برشکاری تیر لانه زنبوری (با سوراخ های شش ضلعی) به روش لیتسکا و پانیر

۴ انواع برشکاری جان تیر آهن

همان طور که پیشتر اشاره شد برای ایجاد طرح لانه زنبوری، ابتدا باید الگوی مشخصی روی جان تیر آهن پیاده سازی کنیم. سپس مقطع تیر برش می دهیم تا به دو نیم تقسیم کنیم. برای این منظور می توانیم از دو روش گرم و سرد استفاده کنیم که در ادامه به توضیح آن ها خواهیم پرداخت.

انواع برشکاری جان تیرآهن



روش گرم یا برنول



روش سرد یا کوپال

۱.۴ روش گرم یا برنول

به طور کلی، هر روشی که در آن از حرارت برای برش استفاده کنیم، روش گرم نام دارد. در اینجا منظور از روش گرم، احتراق گاز استیلن و اکسیژن است که شعله بنفش رنگی ایجاد می کند و از این شعله برای برش تیرآهن لانه زنبوری استفاده می کنیم (این روش در کشور ما نیز بیشتر رایج است). در صورتی که برای برش تیرآهن لانه زنبوری به روش گرم از شعله دستی یا نیمه خودکار استفاده کنیم، اعوجاج بیشتری نسبت به سایر روش ها ایجاد می کند و برای جوش لبه گوه ها به یکدیگر، نیاز به آماده سازی خواهد داشت.



شکل ۵- برشکاری به روش برنول

۲.۴ روش سرد یا کوپال

برای تقسیم تیر در این روش از دستگاه های اتوماتیک برش مجهز به تیغه یا گیوتین و برای ایجاد سوراخ در جان تیر نیز از روش پانچ استفاده می شود. در این دستگاه با استفاده از چرخش غلتک ها، تیرآهن به جلو هدایت شده و تیغه های مخصوص، برش های چندضلعی در جان تیرآهن ایجاد می کند و در نتیجه، تیرآهن



به دو نیم تقسیم می‌شود. در این روش، اعوجاج لبه‌ها بسیار کمتر از روش گرمایی خواهد بود. در ایران بیشتر از این روش برای برش تیرآهن لانه زنبوری استفاده می‌شود.



شکل ۶- برشکاری به روش کوپال

نکته: باید در استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری در قسمت‌های فوق دقت شود و مشکل کمانش جانبی که در برخی کاربردهای تیرهای لانه زنبوری رخ می‌دهد، باید حل شود.

۵ مزایای و معایب تیرآهن لانه‌زنبوری

در ادامه برخی از مزایای و معایب تیرآهن لانه‌زنبوری اشاره می‌کنیم. به طور کلی، مزایای تیرهای لانه‌زنبوری بسیار بیشتر از معایب آن است؛ اما با این حال مقاطع لانه‌زنبوری معایب مخصوص به خود را نیز دارد.

به دلیل ارتفاع بیشتر نسبت به تیرآهن‌های معمولی، ظرفیت تحمل لنگر خمشی بیشتری دارند.

سبک‌تر بودن این نوع تیرآهن، باعث کاهش ۲۰ تا ۵۰ درصد وزن سازه می‌شود.

ساخت سازه با حداقل استفاده از مصالح را امکان‌پذیر می‌کند.

سوراخ‌های تیرهای لانه‌زنبوری امکان نصب آسان‌تر تجهیزات را فراهم می‌کند و مشکل افزایش ارتفاع بیش از حد ساختمان برطرف می‌شود.



باعث انعطاف و زیبایی بیشتر در ساختار سازه می گردد و فضای داخلی را جادارتر نشان می دهد.

به دلیل وزن سبک تر، امکان جابه جایی راحت تری دارند.

سوراخ های لانه زنبوری به اشکال دایره، شش ضلعی، هشت ضلعی و سینوسی قابل ساخت است.

سوراخ های بدنه باعث کاهش سطح رنگ تیر آهن و در نتیجه کاهش هزینه های رنگ کاری می شود.

مقاطع لانه زنبوری به تعمیر و نگهداری کمتری نیاز دارد.

استفاده از مقاطع لانه زنبوری، مشکلات ارتعاش کف را به حداقل می رساند.

در صورت افزایش بار می توان تیر را به صورت نامتقارن طراحی کرد.

می توان از آنها در ساخت کف دال های بتنی پیش ساخته و پیش تنیده استفاده کرد.

برخی از معایب تیرهای لانه زنبوری در ادامه بیان می کنیم.

نسبت به تیر آهن های دیگر مقاومت برشی کمتری دارد.

جان تیرهای لانه زنبوری نسبت به تیر آهن های دیگر ضعیف تر است.

دارای ضریب امنیتی کمتر و امکان گسیختگی است.

امکان لهیدگی بخش های جوش خورده وجود دارد.

به دلیل جوشکاری در تیرهای لانه زنبوری، خواص فولاد کمی تغییر می کند.

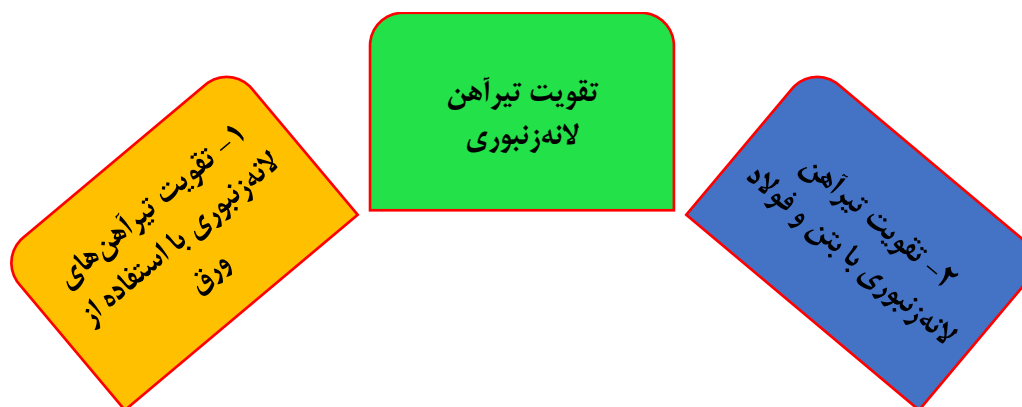
استفاده از تیرهای لانه زنبوری به عنوان تیر همبند در دهانه هایی که بادبند های واگرا دارند، مجاز نیست.

در ساختن این نوع تیر، باید اصول استاندارد کاملاً رعایت شود. در غیر این صورت، احتمال تخریب تیر زیر بار وارد شده وجود خواهد داشت.



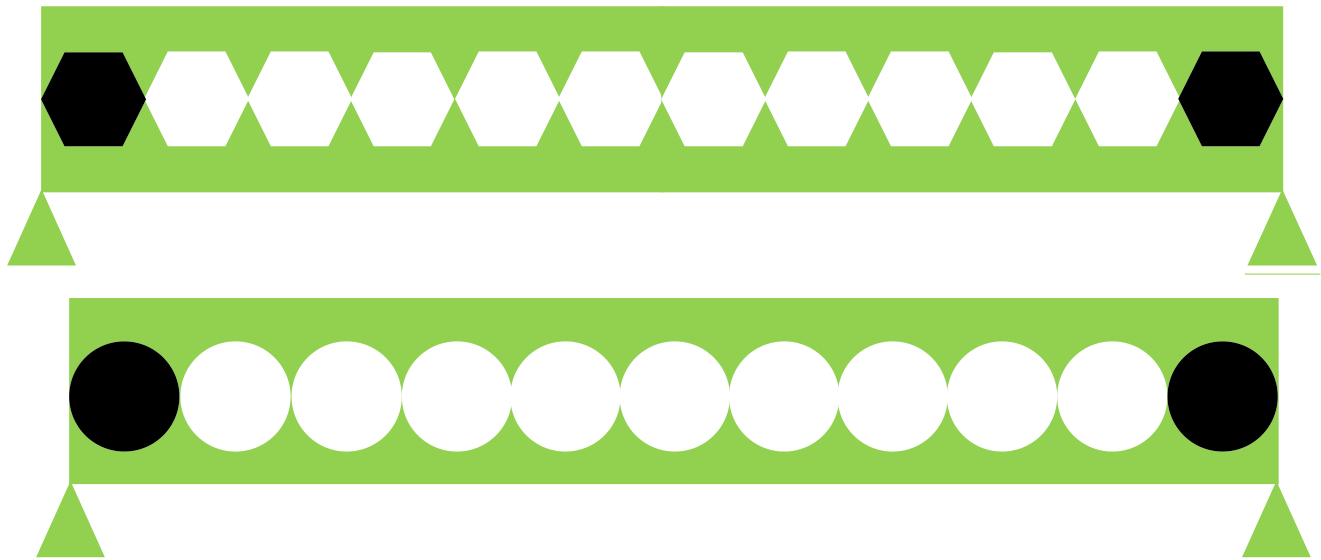
۶ راهکارهای تقویت تیرآهن‌های لانه زنبوری

یکی از عیب‌های تیرهای لانه‌زنبوری مقاومت برشی کم آن‌ها بدلیل وجود سوراخ یا حفره در جان این تیرها می‌باشد. به این منظور لازم است با روش‌هایی به تقویت تیرهای لانه‌زنبوری بپردازیم که در ادامه در مورد آن‌ها بحث می‌کنیم.



۱.۶ تقویت تیرهای لانه‌زنبوری با استفاده از ورق

در ساخت تیرهای لانه‌زنبوری، علاوه بر تنش‌های خمشی اصلی در محل حفره‌ها و سوراخ‌ها، تنش‌های خمشی ثانویه حاصل از برش در مقطع در این نوع تیر نیز به وجود می‌آید که گاهی از تنش‌های خمشی اصلی بزرگتر هستند. این تنش‌ها از کارایی تیرهای لانه‌زنبوری می‌کاهند و برای مقابله با آن‌ها باید سوراخ‌های کناری را با ورق پُر کنیم. همچنین تیرهای لانه‌زنبوری ساخته شده در محل تکیه‌گاه سوراخ‌های خالی، در مقابل تنش‌های برشی ضعیف می‌شوند. با توجه به منحنی نیروی برشی (حداکثر برش در محل تکیه‌گاه‌ها رخ می‌دهد)، سوراخ‌ها را به صورت کامل با ورق‌های تقویتی توسط جوش پر می‌کنیم. نوعی از تیرهای لانه‌زنبوری وجود دارند که برای بریدن قطعات بالا و پایین آن‌ها لازم است از ورق واسطه استفاده کنیم. ورق واسطه بین دندانه‌ها جوش می‌کنیم. تیرهای لانه‌زنبوری که به این روش ساخته می‌شوند، بسیار قوی‌تر از نوع ساده آن هستند.



تقویت تیرهای لانه زنبوری با ورق های پُرکننده در محل تکیه گاه

شکل ۷- تقویت تیرهای لانه زنبوری با ورق های پُرکننده در محل تکیه گاه

۲.۶ تقویت تیرهای لانه زنبوری با بتن و فولاد

نکته دیگر مربوط به وجود نیروی برشی و لنگر خمشی در محل تکیه گاه تیر است که تنش های خمشی را به شدت افزایش می دهد. برای رفع این مساله (وجود تنش های خمشی در محل تکیه گاه ها) نیاز اساسی به تقویت تیرهای لانه زنبوری دارد، که از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر نیست. به همین دلیل با استفاده از تکنیک ترکیب بتن و فولاد برای تقویت تیرهای لانه زنبوری استفاده می کنیم. در این تکنیک به این صورت عمل می کنیم که داخل تیرهای لانه زنبوری (در نقاطی که تنش های ثانویه قابل ملاحظه است) از بتن پر می کنیم. این کار، سختی و مقاومت تیر را افزایش می دهد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. لازم به توضیح است که استفاده از بتن به کاهش مقاومت برشی، خمش ثانویه، ناپایداری پیچشی جانبی، کمانش های موضعی بال، کمانش موضعی جان و اثرات تغییر شکل های ثانویه کمک می کند.



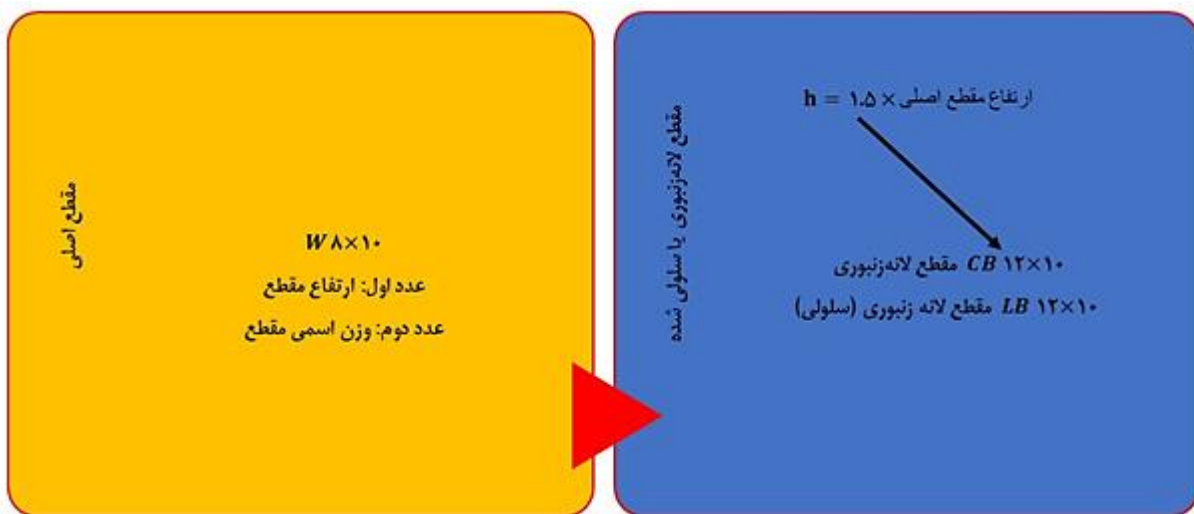
شکل ۸- روش اجرایی تقویت تیرهای لانه زنبوری

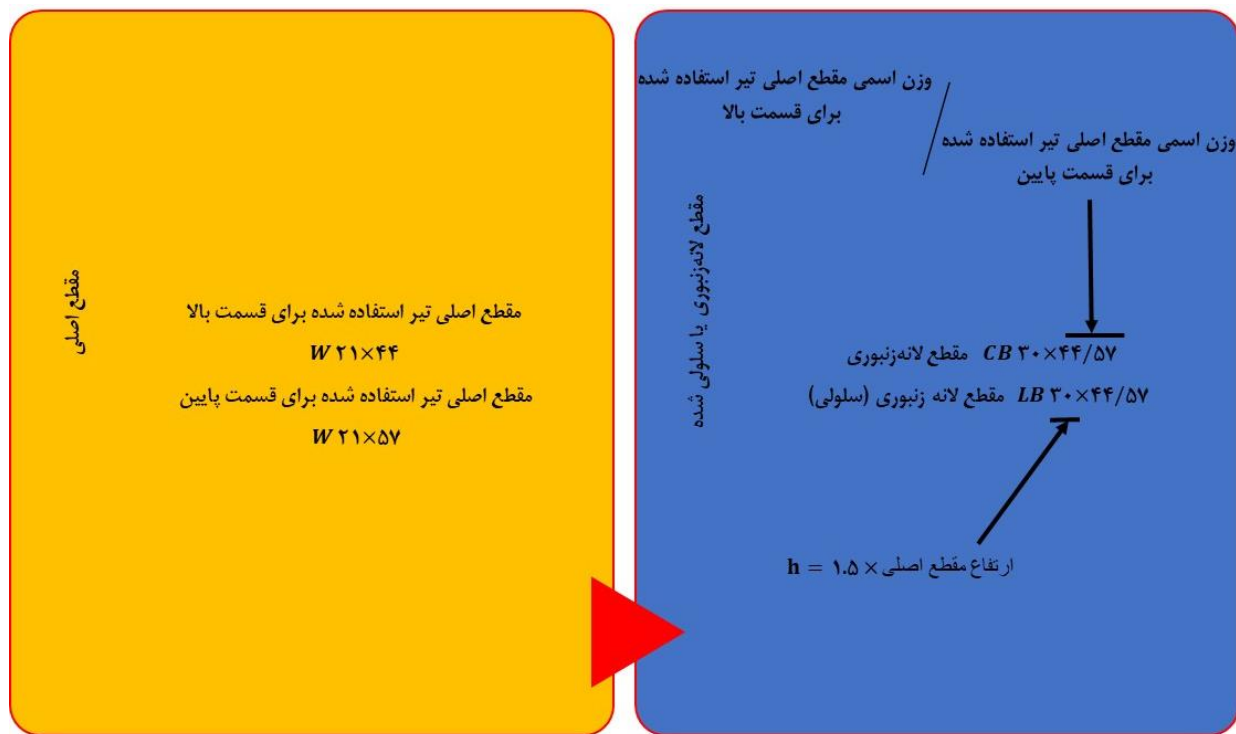


۷ نام گذاری تیرهای لانه زنبوری (با سوراخهای شش ضلعی و دایره‌ای)

دلیل نام گذاری تیرهای لانه زنبوری، شکل نهایی این تیرها پس از عملیات برش، دوباره جوش دادن و تکمیل پروفیل است. این تیرها در طول خود دارای حفره‌ها و سوراخهای توخالی در جان خود می‌باشند که به لانه‌ی زنبور شبیه است؛ به همین سبب به این تیرها، تیرهای لانه زنبوری گفته می‌شود علامت اختصاری تیرهای لانه زنبوری در نقشه‌ها و مدارک فنی با افزودن حرف C مخفف کلمه‌ی Cast به علامت اختصاری تیر نورده شده، مشخص می‌گردد (به عنوان مثال $CNP160$ یعنی تیر آهن 160 INP که لانه زنبوری شده است).

به طور معمول نام گذاری برای یک مقطع فولادی از یک نوع شکل در آئین نامه‌ها و مستندات فنی کشور آمریکا بر اساس عمق تقریبی بر حسب اینچ و وزن تقریبی آن بر حسب پوند بر واحد طول (فوت) می‌باشد. به عنوان مثال پروفیل $W 8 \times 10$ نمایانگر یک مقطع بال پهن با عمق تقریبی ۸ اینچ و وزن اسمی $10 \frac{\text{پوند}}{\text{فوت}}$ است. مشابه این حالت برای تیرهای لانه زنبوری و سلولی نیز استفاده می‌شود. تیرهای لانه زنبوری با علامت CB نشان داده می‌شوند درحالی که تیرهای سلولی با علامت LB نمایش می‌دهند. نحوه‌ی نمایش این تیرها با نمایش مقاطع فولادی استاندارد یکسان است. به عنوان مثال یک تیر لانه زنبوری و سلولی ساخته شده از یک مقطع اصلی $W 8 \times 10$ به ترتیب با عناوین $CB 12 \times 10$ و $LB 12 \times 10$ فراخوانی می‌شوند، چرا که عمق آن‌ها تقریباً یک و نیم برابر تیر اصلی است ولی وزن آن‌ها یکسان است. در شرایط خاص، ساخت مقطع نامتقارن می‌تواند مفید واقع شود. در این حالت، نام گذاری این مقاطع بر اساس دو تیر متفاوت با مقطع اصلی برای بالاترین سطح تیر لانه زنبوری یا سلولی از پروفیل $W 21 \times 44$ و برای قسمت پایین آن از مقطع با پروفیل اصلی $W 21 \times 57$ استفاده شود، در این صورت تیرهای لانه زنبوری یا سلولی شده به ترتیب به صورت $CB 30 \times 44/57$ و $LB 30 \times 44/57$ نمایش داده می‌شوند. عدد اولی عمق تقریبی و عدد دومی وزن اسمی مقطع اصلی تیر استفاده شده برای مقطع بالایی تیر لانه زنبوری یا سلولی و عدد سوم بعد از خط کج (اسلش) بیانگر وزن اسمی مقطع اصلی تیر استفاده شده برای قسمت پایین است. وزن در واحد فوت برای هر تیر نامتقارن لانه زنبوری یا سلولی شده برابر با حاصل میانگین دو وزن ارائه شده در قسمت بالا و پایین مقطع است. البته در ایران نمایش پروفیل‌ها بر اساس نوع پروفیل اصلی انجام می‌گیرد. به عنوان مثال مقطع $IPE 200$ نمایانگر این است که نوع پروفیل از IPE نیم پهن و ارتفاع کلی مقطع آن ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در صورت لانه زنبوری یا سلولی شدن آن‌ها می‌توان از نام گذاری $CIPE 200$ و $LIPE 200$ به ترتیب برای تیرهای مذکور استفاده کرد.





۱.۷ مقایسه‌ی تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی و دایره‌ای

تیرهای لانه زنبوری و سلولی (با سوراخ‌های دایره‌ای در جان) در مقایسه با تیرهای با مقطع اصلی‌شان دارای مزایای زیادی در طراحی و ساخت هستند. در نتیجه‌ی افزایش ارتفاع جان و ایجاد بازشوها در جان تیر، این اعضا نسبت ارتفاع کلی به وزن آن‌ها افزایش یافته و باعث افزایش مدول مقطع حول محور x (S_x) و ممان اینرسی مقطع حول محور x (I_x) می‌شود. این افزایش نه تنها استفاده از آن‌ها را در دهانه‌های بزرگتر ممکن می‌سازد، بلکه سبب افزایش کارایی و نیز امکان صرفه‌جویی در هزینه‌های قابل توجهی را فراهم می‌سازد.



۸ کاربرد اصلی تیرهای لانه زنبوری

کاربرد اصلی تیرهای لانه زنبوری و سلولی، استفاده از آن‌ها در دهانه‌های بزرگ با مقاطع سبک‌تر می‌باشد. به طور کلی، تیرهای لانه زنبوری و سلولی برای دهانه‌های بیشتر از ۹ متر کاربرد دارند و همچنین اثبات شده است که برای دهانه‌های بیشتر از ۱۲ متر نیز یک گزینه‌ی بسیار کاربردی و مقرون به صرفه به

شمار می‌رود. استفاده از قابلیت‌های تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی در دهانه‌های بزرگتر می‌تواند برای پلان و چیدمان طرح معماری، انعطاف‌پذیری بهتر و بیشتری به ارمغان بیاورد. از مزایای دیگر تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی می‌توان به توانایی استفاده‌ی کمتر از ستون‌ها و فونداسیون با توجه به تحمل باربری آن‌ها در دهانه‌های طویل اشاره نمود. تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی برای سازه‌هایی با فضای بزرگ و باز مانند گاراژهای پارکینگ، تأسیسات و انبارهای صنعتی، ساختمان‌های اداری، مدارس و بیمارستان‌های بسیار ایده‌آل هستند.

۱.۸ سازه‌های مربوط به پارکینگ‌ها

در سالیان گذشته استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی در سازه‌های پارکینگ به طرز چشمگیری افزایش یافته است. سازه‌های پارکینگ معمولاً دارای دهانه‌های در حدود ۱۸ متر می‌باشند و اغلب به کنترل قابلیت سرویس‌دهی بیش از مقاومت طراحی نیاز دارند. استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری باعث صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌های مستقیم مصالح می‌گردد و این امر منجر به کاهش جرم کلی سازه می‌شود و در نتیجه، کاهش نیروهای طراحی جانبی و کاهش بارهای ستون‌ها را به دنبال خواهد داشت. مقاطع لانه‌زنبوری یا سلولی (مقاطع با جان باز) امکان انتقال نور از طریق ایجاد بازشوهای ایجاد شده در جان مقاطع را فراهم می‌سازد و فضای داخلی ساختمان را نیز روشن‌تر می‌سازد (جهت کسب اطلاعات بیشتر می‌توانیم به مقاله‌ی [آموزش طراحی رمپ پارکینگ در ایتبس](#) مراجعه نماییم).



شکل ۹ - استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی در سازه‌های پارکینگ

۲.۸ تأسیسات صنعتی

در کارخانجات تأسیسات صنعتی معمولاً از نیم‌طبقات برای تامین زیربنای اضافی برای استفاده مواردی همچون نقاله‌های هوایی، تجهیزات اداری، تجهیزات پردازشی مانند دستگاه‌های کامپیوتری مرتبط با تجهیزات و حتی فضاهای اداری استفاده می‌کنند. استفاده از قابلیت‌های تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی برای چنین عملکردی بسیار خوب و مناسب است. این تیرها در به حداقل رساندن تعداد ستون‌های تکیه‌گاهی در نیم‌طبقات و داشتن پارامترهای ارتعاشی مناسب کمک می‌کنند (در حقیقت استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری باعث کاهش ارتعاش می‌شود).



شکل ۱۰- استفاده از تیرهای لانه زنبوری و سلولی در نیم طبقات یکی از کارخانجات صنعتی

۳.۸ عبور تأسیسات تهویه و سایر تأسیسات بهره برداری از داخل جان تیر

یکی از بزرگترین مزایای تیرهای لانه زنبوری و سلولی، توانایی اجرای مستقیم تأسیسات از طریق بازشوها و سوراخهای جان مقاطع این تیرها می باشد. با استفاده از مقاطع با جان باز، می توان چندین سانتی متر از ارتفاع در هر طبقه از سازه را کاهش داد. از بازشوها و سوراخهای جان در تیرهای لانه زنبوری می توان برای نصب کانال، عبور لوله ها و کانال های تهویه مطبوع و سیستم لوله کشی و هر نوع سیستم تأسیساتی دیگر استفاده نمود. استفاده از تیرهای لانه زنبوری و سلولی در ساختمان های اداری این انعطاف پذیری را برای نصب سیم کشی اضافی برای تلفن ها، رایانه ها یا سایر تجهیزات دفتری می دهد.



شکل ۱۱- عبور تأسیسات تهویه ی هوای مطبوع از میان مقاطع با جان باز (تیرهای لانه زنبوری و سلولی)

۴.۸ مقاومت در برابر ارتعاش

تیرهای لانه زنبوری و سلولی دارای ارتفاع تقریبی ۱/۵ برابری تیرهای بال پهن (IPE) با وزن یکسان هستند. در نتیجه، تیرهای لانه زنبوری و سلولی در مقایسه با تیرهای اصلی خود از مقاومت بالایی در برابر لرزش یا ارتعاش برخوردارند. افزایش سختی باعث کاهش لرزش بر روی کف یا سیستم سقف می شود.

۸. ۵ زیبایی شناسی از منظر معماری در استفاده از تیرهای لانه زنبوری و سلولی

فرایند ساخت یک تیر لانه زنبوری و سلولی، انعطاف پذیری بیشتری را در عناصر سازه ای به صورت قابل توجهی از منظر معماری ایجاد می نماید. تیرهای لانه زنبوری و سلولی را می توانیم به صورت قوسی یا انحنا در آوریم. برخلاف تیرهای بال پهن سنتی که از طریق روش های مکانیکی یا با استفاده از گرما خم داده می شدند، اما در فرایند ساخت یک تیر لانه زنبوری این خم یا انحنا را می توانیم ایجاد کنیم. این فرایند باعث می شود که تیرها با قوس دادن قسمت بالایی و بعد از جوشکاری نیمه بالا و پایین، تیر منحنی یا قوسی ایجاد گردد. به طور کلی تیرهای لانه زنبوری و سلولی به عنوان المان های سازه ای زیبا محسوب می شوند و در سازه هایی که تیرهای نمایان و آشکار هستند، به عنوان یک مزیت در منظر معماری از تیرهای لانه زنبوری و سلولی بهره می برند.



شکل ۱۲ - استفاده از تیرهای قوسی لانه زنبوری و سلولی

۹ ضوابط آیین نامه ای طراحی تیرهای لانه زنبوری

در پیوست ۵ مبحث ۱۰ ویرایش سال ۱۴۰۱ در ارتباط با الزامات طراحی تیرهای لانه زنبوری با سوراخ های شش ضلعی بحث شده است.

پیوست ۵

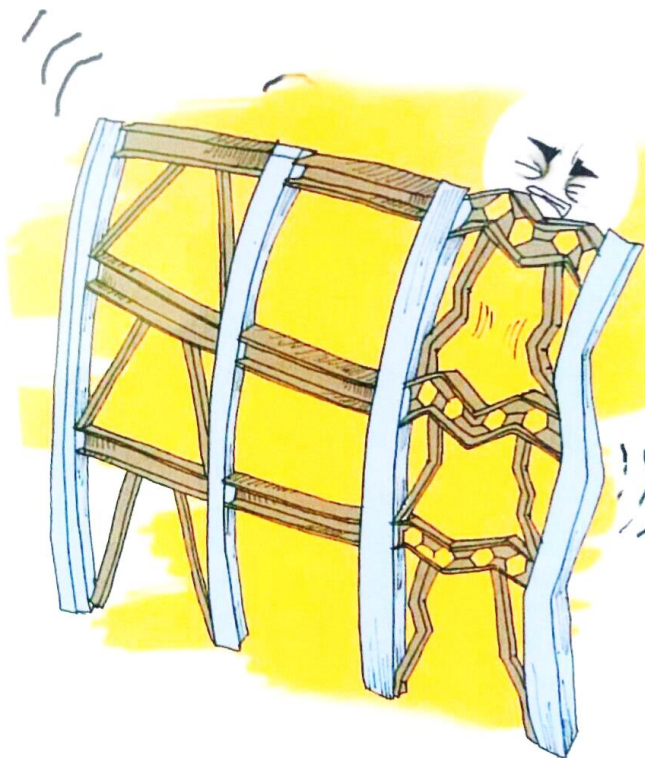
الزامات طراحی تیرهای لانه زنبوری با

سوراخ‌های شش ضلعی

۱۰-۵-۱ دامنۀ کاربرد

این پیوست به الزامات طراحی تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی می‌پردازد. کاربرد این نوع تیرها محدود به تیرهای باربر ثقلی و عموماً دو سر مفصل بوده که در سرتاسر طول خود دارای مهار جانبی کافی باشد. این نوع تیرها هم می‌تواند به صورت فولادی تنها و هم به صورت مختلط مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این نوع تیرها در سیستم باربر جانبی از نوع قاب خمشی (فولادی و مختلط)، در دهانه‌های مهاربندی شده همگرا و واگرا و در جزء افقی دیوارهای برشی فولادی مجاز نیست.

نکته: با توجه به مباحث مطرح شده در این پیوست، استفاده از تیرهای با جان باز (مثل تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی و یا دایره‌ای) در قاب‌های خمشی و در دهانه‌های مهاربندی شده‌ی همگرا و واگرا ممنوع می‌باشد (مقاطع با جان باز (مقاطع لانه زنبوری) علیرغم ممان اینرسی بیشتر و مقاومت خمشی بهتر در مقایسه با مقاطع اولیه‌ی بدون سوراخ در جان تیر، در برابر برش وارده دارای ضعف می‌باشند).



شکل ۱۳- عملکرد ضعیف تیرهای لانه زنبوری در برابر برش (باعث ممنوعیت استفاده از مقاطع لانه زنبوری در دهانه‌های

مهاربندی می‌باشد)



۱۰-۳-۳ الزامات لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی

۱۰-۳-۳-۱ الزامات لرزه‌ای قاب‌های خمشی معمولی (OMF)

قاب‌های خمشی معمولی (OMF) به قاب‌هایی اطلاق می‌شوند که از آن‌ها انتظار تغییرشکل‌های فرا ارتجاعی حداقلی در برابر نیروی جانبی زلزله می‌رود و به این علت برای طراحی اعضا و اتصالات آن‌ها مقررات تکمیلی حداقلی در نظر گرفته شده است. در طراحی اعضا و اتصالات این نوع قاب‌ها، چنانچه بخشی از سیستم برابر لرزه‌ای سازه باشند، علاوه بر الزامات متعارف فصل‌های ۱۰-۱ و ۱۰-۲ و نیز الزامات لرزه‌ای عمومی بخش ۱۰-۳-۲ باید الزامات تکمیلی این بخش نیز رعایت شود.

۱۰-۳-۳-۱-۱ الزامات تحلیل

در تحلیل این نوع قاب‌های خمشی رعایت ضابطه اضافی، الزامی نیست.

۱۰-۳-۳-۱-۲ محدودیت تیرها و ستون‌ها

در قاب‌های خمشی معمولی تیرها و ستون‌ها باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) بال‌های تیرها و ستون‌ها باید مطابق ضوابط بخش ۱۰-۳-۲ این مبحث، فشرده بوده و جان آن‌ها غیر لاغر باشد.

ب) استفاده از ستون‌های با مقطع متشکل از چند نیمرخ بست‌دار مجاز است، مشروط بر آنکه خمش در ستون حول محور با مصالح (عمود بر جان‌های مقاطع) باشد.

پ) استفاده از تیرهای با جان سوراخ‌دار و با سوراخ‌های متوالی (لانه‌زنبوری) به‌عنوان اعضای باربر جانبی مجاز نیست. در صورت لزوم به ایجاد سوراخ در جان تیر، این سوراخ باید در یک‌سوم میانی طول دهانه تیر قرار گیرد. اطراف سوراخ باید به نحوی تقویت شود که مقاومت برشی و خمشی تیر با احتساب آثار ناشی از خمش ثانویه به‌طور کامل فراهم گردد.



۱۰-۳-۲ الزامات لرزه‌ای قاب‌های خمشی متوسط (IMF)

قاب‌های خمشی متوسط (IMF) به قاب‌هایی اطلاق می‌شوند که در برابر نیروی جانبی زلزله بتوانند تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی محدودی را تحمل کنند.

در طراحی اعضا و اتصالات این نوع قاب‌ها، چنانچه بخشی از سیستم باربر لرزه‌ای سازه باشند، باید الزامات تکمیلی سخت‌گیرانه‌تری نسبت به قاب‌های خمشی معمولی منظور شود. به همین منظور در طراحی اعضا و اتصالات این نوع قاب‌ها علاوه بر الزامات متعارف فصل‌های ۱۰-۱ و ۱۰-۲ و نیز الزامات لرزه‌ای عمومی بخش ۱۰-۳-۲، باید الزامات تکمیلی این بخش نیز رعایت شود.

۱۰-۳-۳-۲ محدودیت تیرها و ستون‌ها

در قاب‌های خمشی متوسط، تیرها و ستون‌ها باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) اجزای مقاطع تیرها و ستون‌ها باید از نوع فشرده لرزه‌ای با محدودیت حداکثر نسبت پهنا به ضخامت برابر λ_{md} مطابق مقادیر جدول ۱۰-۳-۴ باشند.

ب) استفاده از ستون‌های با مقطع متشکل از چند نیمرخ بست‌دار مجاز نیست.

پ) استفاده از تیرهای با جان سوراخ‌دار با سوراخ‌های متوالی (لانه‌زنبوری) به‌عنوان اعضای باربر جانبی مجاز نیست. در صورت لزوم به ایجاد سوراخ در جان تیر، این سوراخ باید خارج از ناحیه حفاظت‌شده دو انتهای تیر و در یک‌سوم میانی طول دهانه تیر قرار گیرد. اطراف سوراخ باید به نحوی تقویت شود که مقاومت‌های موجود برشی و خمشی تیر، با احتساب آثار ناشی از خمش ثانویه، به‌طور کامل فراهم گردد.



۱۰-۳-۳ الزامات لرزه‌ای قاب‌های خمشی ویژه (SMF)

قاب‌های خمشی ویژه (SMF) به قاب‌هایی اطلاق می‌شوند که در برابر نیروی جانبی زلزله بتوانند تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی قابل ملاحظه‌ای را تحمل نمایند. برای طراحی اعضا و اتصالات این نوع قاب‌ها، چنانچه بخشی از سیستم برابر لرزه‌ای سازه باشند، الزامات لرزه‌ای سخت‌گیرانه‌تری نسبت به قاب‌های خمشی متوسط در نظر گرفته شده است. به همین منظور در طراحی اعضا و اتصالات این نوع قاب‌ها علاوه بر الزامات متعارف فصل‌های ۱۰-۱ و ۱۰-۲ و نیز الزامات لرزه‌ای عمومی بخش ۱۰-۳-۲ باید الزامات لرزه‌ای این بخش نیز رعایت شوند.

۱۰-۳-۳-۱ الزامات تحلیل

در تحلیل قاب‌های خمشی ویژه، اگر به صورت قاب‌های خمشی صفحه‌ای مجزا مورد استفاده قرار گیرند، رعایت ضابطه اضافی الزامی نیست. در مورد ستون‌هایی از این قاب‌ها که در محل تقاطع دو قاب خمشی قرار می‌گیرند، ضوابط بندهای ۱۰-۳-۳-۶، ۱۰-۳-۳-۹ و ۱۰-۳-۳-۱۰ باید با توجه به آثار لنگر خمشی در امتداد متعامد، اقناع گردد.

۱۰-۳-۳-۲ محدودیت تیرها و ستون‌ها

تیرها و ستون‌ها در قاب‌های خمشی ویژه باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) اجزا مقاطع تیرها و ستون‌ها باید از نوع فشرده لرزه‌ای با محدودیت حداکثر نسبت پهنا به ضخامت برابر λ_{eff} مطابق مقادیر جدول ۱۰-۳-۴ باشند.

ب) در ستون‌ها استفاده از مقطع متشکل از چند نیمرخ بست‌دار مجاز نیست. اجزای مقطع ستون باید در تمامی طول آن به صورت پیوسته به یکدیگر متصل شوند.

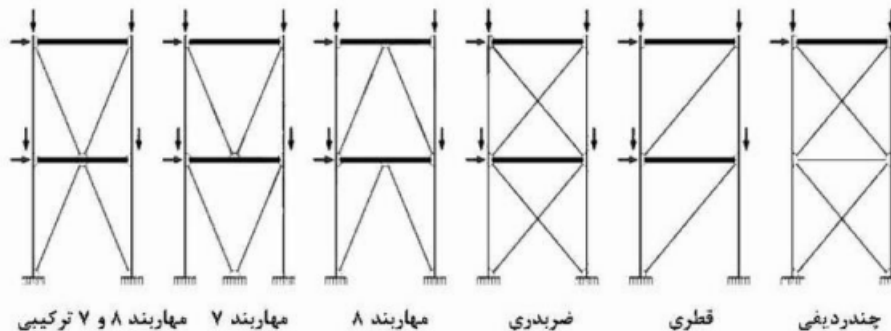
پ) استفاده از تیرهای با جان سوراخ‌دار و با سوراخ‌های متوالی (لانه زنبوری) به عنوان اعضای باربر جانبی مجاز نیست. در صورت لزوم ایجاد سوراخ در جان تیر، این سوراخ باید خارج از ناحیه حفاظت‌شده دو انتهای تیر و در یک سوم میانی طول دهانه تیر قرار گیرد. اطراف سوراخ باید به نحوی تقویت شود که مقاومت‌های موجود برشی و خمشی تیر، با احتساب آثار ناشی از خمش ثانویه، به طور کامل فراهم گردد.

۱-۳-۴ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده و دیوارهای برشی فولادی

۱-۴-۳-۱۰ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای معمولی (OCBF)

۱-۴-۳-۱۰ الزامات عمومی

قاب‌های مهاربندی شده همگرای معمولی (OCBF) به قاب‌هایی گفته می‌شوند که از آن‌ها انتظار تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی محدودی، بدون کاهش قابل ملاحظه در مقاومت اعضا و اتصالات آن‌ها، تحت اثر زلزله طرح می‌رود. پیکربندی مهاربندهای مجاز در این نوع قاب‌ها شامل مهاربندهای قطری، ضربدری، مهاربندهای به شکل ۷ یا ۸ و مهاربندهای چند ردیفی در یک طبقه می‌شوند. همچنین تعبیه سوراخ‌های متوالی در جان تیرهای دهانه‌های مهاربندی شده با هر نوع مهاربندی (قطری، ضربدری، ۷ یا ۸ و چند ردیفی) مجاز نیست. در صورت لزوم به تعبیه سوراخ در جان تیر، اطراف آن باید به نحوی تقویت گردد که مقاومت‌های موجود در مقطع سوراخ‌دار از مقاومت‌های موجود مقطع کامل تیر کوچک‌تر نباشد. در شکل ۱-۴-۳-۱۰ چند نمونه از پیکربندی این نوع مهاربندها نشان داده شده است.



شکل ۱-۴-۳-۱۰: چند نمونه مجاز از پیکربندی مهاربندهای همگرا

۱-۴-۳-۲ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه (SCBF)

۱-۴-۳-۲ الزامات عمومی

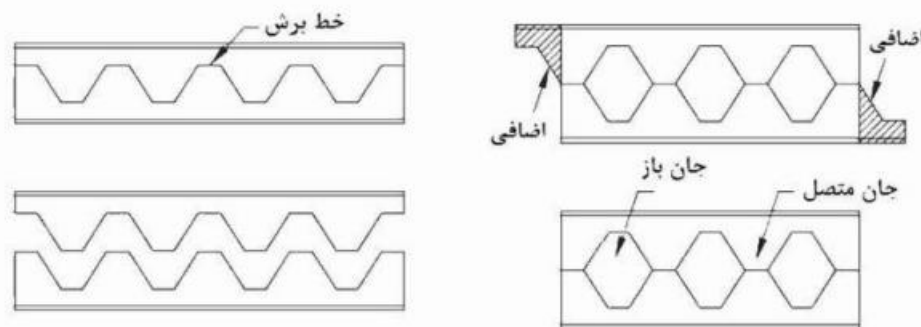
قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه (SCBF) به قاب‌هایی گفته می‌شوند که در آن‌ها از مهاربندها انتظار می‌رود تحت اثر بار جانبی زلزله طرح تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی قابل ملاحظه‌ای تحمل کنند و در آن‌ها کاهش مقاومت چندانی رخ ندهد. رفتار فرا ارتجاعی موردنظر ممکن است به مرحله بعد از کمانش مهاربند توسعه یابد. از این رو پیکربندی و طراحی مهاربندها و اتصالات آن باید چنان باشد که از عهده این تغییر شکل‌ها برآیند. پیکربندی مهاربندهای مجاز در این نوع قاب‌ها شامل مهاربندهای قطری، ضربدری، مهاربندهای به شکل ۷ یا ۸ و مهاربندهای چند ردیفی در یک طبقه می‌باشند. همچنین تعبیه سوراخ‌های متوالی در جان تیرهای دهانه‌های مهاربندی شده با هر نوع مهاربندی (قطری، ضربدری، ۷ یا ۸) مجاز نیست. در صورت لزوم به تعبیه سوراخ در جان تیر، اطراف آن باید به نحوی تقویت گردد که مقاومت‌های موجود در مقطع سوراخ‌دار از مقاومت‌های موجود مقطع کامل تیر کمتر نباشد.



نکته: با توجه با مباحث مطرح شده در این پیوست، استفاده از تیرهای با جان باز (مثل تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی و یا دایره‌ای) در قاب‌های خمشی معمولی، متوسط و ویژه و همچنین در دهانه‌های مهاربندی شده‌ی همگرا معمولی، متوسط و ویژه ممنوع می‌باشد (البته مبحث ۱۰ راهکارهایی نیز برای این موضع پیشنهاد داده است تا در بتوانیم از مقاطع لانه زنبوری در قاب‌های خمشی و دهانه‌های مهاربندی شده استفاده نماییم (مثل تقویت مقطع تیر لانه زنبوری با جوش ورق در سوراخ‌های مقطع تیر لانه زنبوری و ...)).

۱۰-۵-۲ نحوه ساخت

مراحل ساخت این نوع تیرهای لانه زنبوری که باید از تیرهای نورد شده تولید شوند، مطابق **شکل ۱۰-۵-۱** است.



شکل ۱۰-۵-۱: مراحل ساخت تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی

نکته: این پیوست در ارتباط با مراحل ساخت مقاطع تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی، مطلبی ارائه نکرده است.

۱۰-۵-۳ الزامات طراحی تیرهای لانه زنبوری

۱۰-۵-۳-۱ الزامات تحلیل

در تحلیل و مدل سازی تیرهای لانه زنبوری، برای در نظر گرفتن آثار حضور سوراخ‌های متوالی در طول تیر و نیز آثار تغییر شکل‌های برشی، مشخصات هندسی مقطع تیر باید براساس 90 درصد مشخصات مقطع سوراخ دار در نظر گرفته شود.



3.7 DEFLECTION

Castellated and cellular beams typically have higher span-to-depth ratios than ordinary wide-flange sections; consequently, deflection typically does **not govern the design**. In most cases, castellated and cellular beams behave like prismatic sections as it relates to deflection. However, additional deflection due to **shear deformation around the openings does occur**. The magnitude of this deflection is usually only significant in very short spans or when heavy concentrated loads are present. For most applications, it is not necessary to do any rigorous deflection calculations beyond what is typically done for prismatic sections. **The deflection for both composite and noncomposite castellated and cellular beams can be approximated by using 90% of the moment of inertia at the net section and treating it as a prismatic section**. Transformed section properties, at a section cut through an opening, may be used for deflection calculations in the composite condition. More complex methods of predicting deflection have also been developed (Hosain et al., 1974; Altfillisch et al., 1957).

شکل ۱۴- کنترل خیز تیرهای لانه زنبوری طبق ضوابط آیین نامهی طراحی تیرهای لانه زنبوری و سلولی (AISC)

نکته: برای کنترل خیز تیرهای لانه زنبوری، مشخصات هندسی تیر داری سوراخ برابر با ۹۰ درصد مشخصات مقطع بدون سوراخ در نظر گرفته می شود.

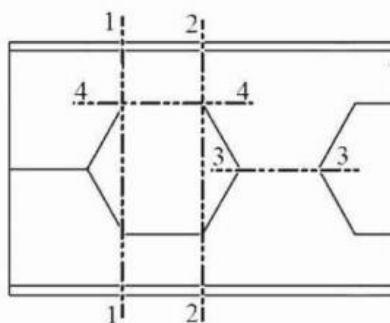
۱۰-پ-۳-۲ مقاومت های مورد نیاز

الف) مقاومت محوری مورد نیاز

مطابق شکل ۱۰-پ-۲، در هر یک از سوراخ ها مقاومت مورد نیاز (P_r و T_r) در مقاطع بحرانی ۱ و ۲ باید از طریق تبدیل لنگر خمشی تیر در آن مقاطع به یک زوج نیروی کششی و فشاری که باید در محل محور خنثی الاستیک دو بخش T شکل فوقانی و تحتانی قرار گیرد، تعیین می شود.

ب) مقاومت برشی مورد نیاز

در هر یک از سوراخ ها مقاومت برشی مورد نیاز هر یک از مقاطع T شکل فوقانی و تحتانی (V_r) در وسط سوراخ (وسط مقاطع بحرانی ۱ و ۲ در شکل ۱۰-پ-۲) برابر نصف مقاومت برشی مورد نیاز کل در این مقطع خواهد بود.



شکل ۱۰-پ-۲: مقاطع بحرانی در محل سوراخ ها

۱۰-پ-۳-۲ مقاومت‌های موردنیاز

تبصره: در صورتی که مقاطع T شکل فوقانی و تحتانی دارای عمق متفاوتی باشند، مقاومت برشی موردنیاز هر یک از مقاطع T شکل باید متناسب با سختی آن‌ها تعیین شود.

ب) مقاومت خمشی ثانویه موردنیاز

در هر یک از سوراخ‌ها، مقاومت خمشی ثانویه موردنیاز در مقاطع بحرانی 1 و 2 از طریق حاصل ضرب مقاومت برشی موردنیاز مقاطع T شکل در نصف فاصله بین 1 و 2 تعیین می‌گردد

$$m_r = V_r \times \frac{e}{2}$$

ت) مقاومت برشی افقی موردنیاز در جان (مقاومت برشی موردنیاز در مقطع 3-3)

در حداقل هر یک از سوراخ‌ها، مقاومت برشی موردنیاز افقی در مقطع 3-3 از طریق تفاضل مقاومت محوری موردنیاز دو سوراخ متوالی به دست می‌آید.

ث) مقاومت خمشی موردنیاز در جان (مقاومت خمشی موردنیاز در مقطع 4-4)

مقاومت خمشی موردنیاز در جان، از طریق حاصل ضرب مقاومت برشی افقی موردنیاز در مقطع 3-3 در فاصله عمودی مقاطع 3-3 و 4-4 تعیین می‌شود.

ج) مقاومت محوری موردنیاز در مقطع 3-3

مقاومت محوری موردنیاز در مقطع 3-3 باید برابر تفاضل نیروی برشی قائم مقاطع T شکل در دو سوراخ متوالی در نظر گرفته شود.

تبصره ۱: چنانچه سوراخ‌های متوالی به صورت دایره‌ای شکل باشند، مقاومت‌های موردنیاز باید براساس بحرانی‌ترین مقدار در فاصله بین مرکز سوراخ تا انتهای آن در حضور مقاومت‌های موجود در نظر گرفته شود.

تبصره ۲: چنانچه مقطع تیر لانه‌زنبوری از نوع مختلط با دال بتنی متکی بر تیر فولادی توأم با برشگیرهای کافی باشد، مقاومت محوری موردنیاز (موضوع بند الف) در مقاطع بحرانی 1 و 2 باید از طریق تبدیل لگر خمشی تیر در آن مقاطع به یک زوج نیروی کششی و فشاری که باید در محل محور خنثی الاستیک مقطع تبدیل‌یافته فوقانی و محور خنثی الاستیک مقطع T شکل تحتانی قرار گیرد، تعیین می‌شود. سایر مقاومت‌های موردنیاز مشابه پنجاهی (ب) تا (ث) خواهد بود.

انواع مقاومت‌های مورد نیاز (در تیرهای لانه‌زنبوری) طبق پیوست ۵م بحث ۱۰ در تصاویر فوق مشاهده می‌کنیم (این مقاومت‌های بایستی کنترل شوند). همچنین توضیحات مربوطه در ارتباط با انواع مقاومت‌های مورد نیاز در تیرهای لانه‌زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای شکل و مقاطع لانه‌زنبوری از نوع مختلط، مشاهده می‌کنیم.



۱۰-۵-۳ مقاومت‌های موجود

الف) مقاومت محوری موجود

مقاومت کششی موجود هر یک از قطعات T شکل به ترتیب باید براساس الزامات بخش‌های ۱۰-۲-۳ و ۱۰-۲-۴ تعیین شود.

ب) مقاومت برشی موجود

مقاومت برشی موجود هر یک از قطعات T شکل باید براساس الزامات بخش ۱۰-۲-۶ برای تیرهای لانه‌زنبوری با مقطع فولادی تنها و براساس الزامات بخش ۱۰-۲-۸ برای تیرهای لانه‌زنبوری با مقطع مختلط با دال بتنی متکی بر مقطع فولادی تعیین شود.

پ) مقاومت خمشی ثانویه موجود

مقاومت خمشی موجود در هر یک از قطعات T شکل باید براساس الزامات بخش ۱۰-۲-۵ تعیین شود.

ت) مقاومت برشی افقی موجود در جان (مقاومت برشی موجود در مقطع 3-3)

مقاومت برشی افقی موجود در جان باید مطابق الزامات بخش ۱۰-۲-۶ تعیین شود.

ث) مقاومت خمشی موجود در جان (مقاومت خمشی موجود در مقطع 4-4)

در این مقطع مقاومت خمشی موجود در جان باید براساس الزامات بخش ۱۰-۲-۵ تعیین شود. در تعیین مقاومت‌های موجود این بخش علاوه بر تأمین الزامات فصل ۱۰-۲ این مبحث، رعایت الزامات تکمیلی راهنمای شماره 31 آیین‌نامه AISC* نیز ضروری است.

۱۰-۵-۴ اثر بار متمرکز

در صورت وجود بار متمرکز در محدوده هر یک از سوراخ‌های موجود در جان، این سوراخ باید از طریق ورق پوشانده شود. همچنین در محل بار متمرکز کلیه کنترل‌های مربوط به این بار، نظیر خمش موضعی بال، تسلیم موضعی جان، چروکیدگی موضعی جان و کمانش جانبی جان مطابق الزامات فصل ۱۰-۲ این مبحث الزامی است.

* AISC Design Guide 31: Castellated and Cellular Beam Design

نکته: برای محاسبات مربوط به انواع مقاومت‌های موجود (در تیرهای لانه‌زنبوری) طبق پیوست ۵ مبحث ۱۰ باید طبق بخش‌های مختلف این مبحث اقدام نماییم. همچنین در این پیوست، رعایت آیین‌نامه‌ی طراحی تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی (AISC) ^۱ الزام‌آور است.

۹.۱ ضوابط آیین‌نامه‌ی طراحی تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی (AISC)

در ادامه مباحث موجود در آیین‌نامه‌ی طراحی تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی (AISC)، بررسی می‌کنیم.

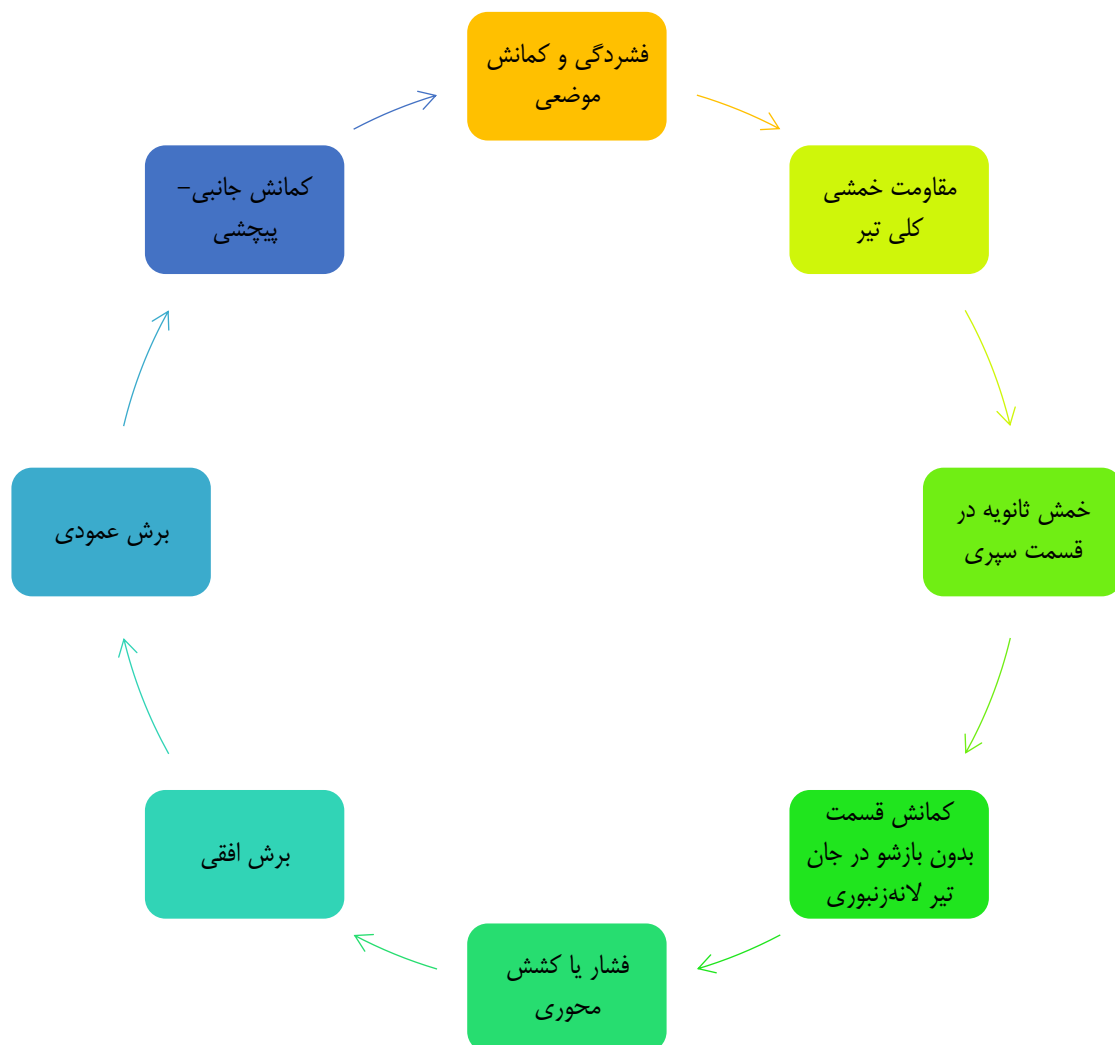
^۱ AISC Design Guide 31: Castellated and Cellular Beam Design



The following limit states should be investigated when designing castellated or cellular beams:

1. Compactness and local buckling
2. Overall beam flexural strength
3. Vierendeel bending of tees
4. Web post buckling
5. Axial tension/compression
6. Horizontal shear
7. Vertical shear
8. Lateral-torsional buckling

نکته: در طراحی تیرهای لانه زنبوری و سلولی مطابق الزامات این آیین نامه، بایستی حالات حدی زیر کنترل کنیم:





3.2.1 Calculation of Axial Force and Vierendeel Moment at Each Opening

3.2.1.1 Calculation of Axial Forces in Beam

The axial (tensile/compressive) force is a function of the global bending moment in the beam. It is similar to a chord force in a truss. The axial force is calculated by dividing the global moment in the beam by the distance between the

centroids of the top and bottom tees, d_{effec} . The axial force is assumed to act uniformly over the cross section. See Figure 3-1 for terminology and variables used to calculate the axial forces.

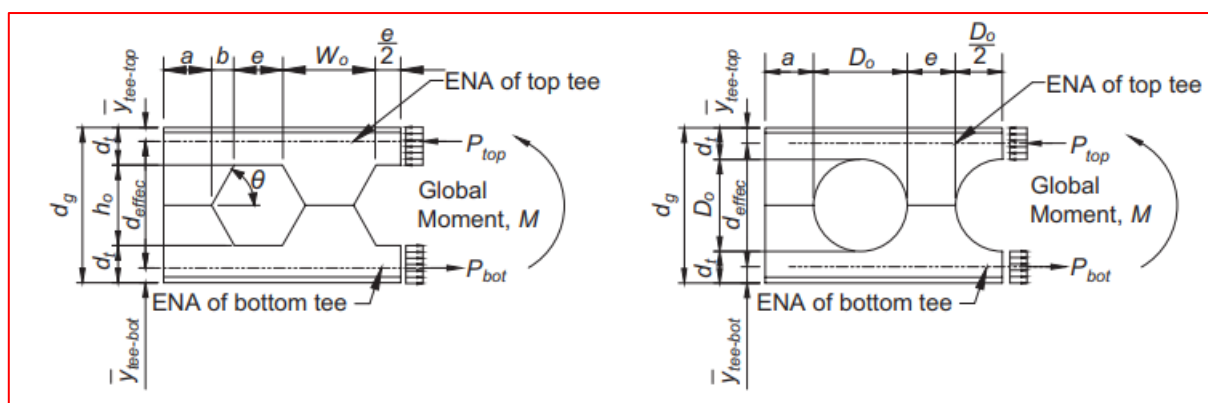
Required axial compressive strength:

$$P_r = \frac{M_r}{d_{effec}} \quad (3-1)$$

where

M_r = required flexural strength, kip-in. (N-mm)

d_{effec} = distance between centroids of top and bottom tees, in. (mm)



شکل ۱۵- متغیرهای استفاده شده در تیرهای لانه زنبوری و سلولی جهت محاسبه نیروی محوری

نکته: مقاومت فشاری محوری برابر است با:

$$P_r = \frac{M_r}{d_{effect}}$$

P_r : نیروی محوری مورد نیاز بر حسب (N)

M_r : لنگر خمشی مورد نیاز بر حسب (N.mm)

d_{effect} : فاصله بین مرکز سپری های بالا و پایین تیر لانه زنبوری بر حسب (mm)



3.2.1 Calculation of Axial Force and Vierendeel Moment at Each Opening

3.2.1.2 Calculation of Vierendeel Moment in Beam

The Vierendeel moment is calculated by dividing the global shear force in the beam between the top and bottom tees and multiplying that shear force by a moment arm. If the top and bottom tees are identical, then the shear can be divided equally between the top and bottom tees. If the top and bottom tees are not identical (as is the case in asymmetric sections), the shear force should be proportioned between the top and bottom tees based on the areas of the tees relative to each other. For castellated sections, the moment arm for calculating the Vierendeel moment is one-half the width of the top of the opening, $e/2$. For cellular beams, the moment arm should be taken as $D_o/4$ (Bjorhovde, 2000).

Vierendeel required flexural strength, M_{vr}

$$\text{Castellated Beams: } M_{vr} = V_r \left(\frac{A_{tee}}{A_{net}} \right) \left(\frac{e}{2} \right) \quad (3-2)$$

$$\text{Cellular Beams: } M_{vr} = V_r \left(\frac{A_{tee}}{A_{net}} \right) \left(\frac{D_o}{4} \right) \quad (3-3)$$

where

A_{net} = combined area of top and bottom tees, in.² (mm²)

A_{tee} = area of tee section, in.² (mm²)

D_o = opening diameter, in. (mm)

V_r = required shear strength, kips (N)

e = length of solid-web section along centerline, in. (mm)

The axial forces (compression or tension) and the flexural forces act concurrently on the top and bottom tees. In the case of a positive global moment, the top tee is in compression and the bottom tee is in tension. Both tees undergo flexure from the global shear forces in the beam.

نکته: مقاومت خمشی ثانویه مورد نیاز (این مقاومت خمشی در اثر انتقال نیروی برشی از طریق سوراخ‌ها (حفره‌ها) در جان به منظور سازگار شدن با میزان

تغییر لنگر خمشی در امتداد تیر ایجاد می‌شود) برابر است با:

مقاومت خمشی ثانویه برای تیرهای لانه‌زنبوری (با سوراخ‌های شش ضلعی)

$$M_{vr} = V_r \left(\frac{A_{tee}}{A_{net}} \right) (e/2)$$

مقاومت خمشی ثانویه برای تیرهای سلولی (با سوراخ‌های دایره‌ای)

$$M_{vr} = V_r \left(\frac{A_{tee}}{A_{net}} \right) (D_o/4)$$

A_{net} : مجموع مساحت‌های دو مقطع سپری بالا و پایین در مقطع تیر لانه‌زنبوری بر حسب (mm²)

A_{tee} : مساحت هر کدام از مقطع سپری بالا و پایین بصورت جداگانه در مقطع تیر لانه‌زنبوری بر حسب (mm²)

V_r : مقاومت برشی مورد نیاز بر حسب (N)

e : طول قسمت جان صلب در راستای محور طولی در تیر با مقطع لانه‌زنبوری (با سوراخ‌های شش ضلعی) بر حسب (mm)

D_o : قطر سوراخ (حفره) در تیرهای سلولی بر حسب (mm)

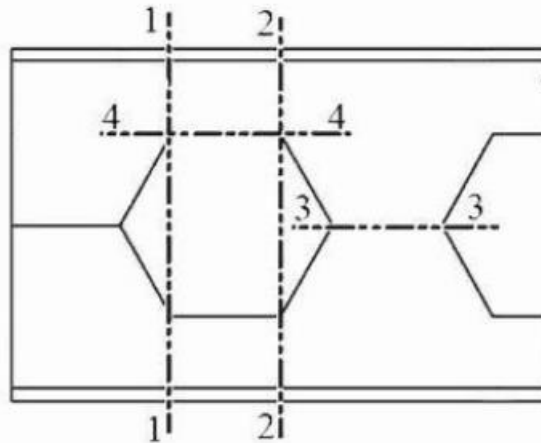
توضیحات مرتبط با مقاومت خمشی ثانویه در مبحث ۱۰م بصورت زیر آمده است:



پ) مقاومت خمشی ثانویه موردنیاز

در هر یک از سوراخ‌ها، مقاومت خمشی ثانویه موردنیاز در مقاطع بحرانی 1 و 2 از طریق حاصل ضرب مقاومت برشی موردنیاز مقاطع T شکل در نصف فاصله بین 1 و 2 تعیین می‌گردد

$$(m_r = V_r \times \frac{e}{2})$$



شکل ۱۰-۵-۲: مقاطع بحرانی در محل سوراخ‌ها

نکته: از مفاهیم مقاومت مصالح می‌دانیم که در صورت اعمال لنگر خمشی مثبت، قسمت بالایی مقطع تحت فشار و قسمت پایینی تحت کشش قرار می‌گیرد. در مقاطع لانه‌زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی و یا دایره‌ای نیز در صورت اعمال لنگر خمشی مثبت، سپری بالا تحت فشار قرار و سپری پایین تحت کشش قرار می‌گیرد. ضمن آنکه هر دو سپری بالا و پایین تحت اثر نیروهای برشی خم می‌شوند.

3.2.2 Calculation of Axial (Tensile/Compressive) and Flexural Strength of Top and Bottom Tees

3.2.2.1 Calculation of Nominal Axial Strength of Top and Bottom Tees

The nominal compressive strength, P_n , is the lowest value obtained based on the applicable limit states of **flexural buckling and flexural-torsional buckling**.

Design Assumptions

1. $K_x = 0.65$ (assumes rotation and translation are fixed at the ends of the tee section)
2. $K_y = 1.0$
3. $E = 29,000 \text{ ksi (200 000 MPa)}$
4. L = laterally unbraced length of the member, in. (mm)
= e for castellated beams
= $D_o/2$ for cellular beams
5. $L_e = KL$ = effective length, in. (mm)
6. $L_{cx} = K_x L$
= $K_y L$
7. $G = 11,200 \text{ ksi (77 200 MPa)}$



نکته: برای محاسبه‌ی مقاومت فشاری اسمی بر اساس حالات حدی (کمانش خمشی و نیز کمانش خمشی-پیچشی) بایستی فرضیات زیر را در نظر بگیریم:

$$K_x: 0.65 \text{ (با فرض: چرخش و انتقال در دو انتهای سپری‌ها ثابت باشند).}$$

$$K_y: 1$$

$$E = 2 \times 10^5 \text{ (بر حسب MPa)}$$

$$L: \text{طول مهاربندی نشده عضو بر حسب (mm)}$$

$$L: \text{برابر با } e \text{ در تیرهای لانه‌زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی}$$

$$L: \text{برابر با } D \cdot \frac{1}{4} \text{ در تیرهای لانه‌زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای (تیرهای سلولی)}$$

$$L_c = KL: \text{طول موثر عضو بر حسب (mm)}$$

$$L_{cy} = K_y L \text{ و } L_{cx} = K_x L$$

$$G = 77/2 \times 10^3 \text{ (بر حسب MPa)}$$

Compressive Strength for Flexural Buckling—AISC

Specification Section E3

For members without slender elements, the nominal compressive strength for flexural buckling is calculated using AISC Specification Section E3,

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (\text{Spec. Eq. E3-1})$$

$$\phi_c = 0.90 \text{ (LRFD)} \quad \Omega_c = 1.67 \text{ (ASD)}$$

where

$$A_g = A_{tee}$$

The critical stress, F_{cr} , is determined as follows:

$$(a) \text{ When } \frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left(\text{or } \frac{F_y}{F_e} \leq 2.25 \right)$$

$$F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y \quad (\text{Spec. Eq. E3-2})$$

$$(b) \text{ When } \frac{L_c}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left(\text{or } \frac{F_y}{F_e} > 2.25 \right)$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (\text{Spec. Eq. E3-3})$$

where

r = minimum of r_x and r_y of the tee section, in.

The elastic buckling stress, F_e , is determined as follows:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r} \right)^2} \quad (\text{Spec. Eq. E3-4})$$

If the tees include slender compression elements, AISC Specification Section E7 is used to calculate F_{cr} .

نکته: مقاومت فشاری (کمانش خمشی) در بخش E.3 در ۱۶ - AISC360 به صورت زیر بیان شده است:

برای اعضای که لاغر نیستند، برای محاسبه‌ی مقاومت فشاری بصورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g \rightarrow \phi_c = 0.9: \text{LRFD}$$



برای حالت ASD: $P_n/\Omega_c = F_{cr}A_g/\Omega_c \rightarrow \Omega_c = 1/67$

در فرمول های فوق: $A_g = A_{tee}$ و F_{cr} نیز، تنش بحرانی می باشد که برای محاسبه ی آن بصورت زیر عمل می کنیم:

(الف) اگر $L_c/r \leq 4/71 \sqrt{E/F_y}$ و یا اینکه $F_y/F_e \leq 2/25$ باشد:

$$F_{cr} = (0/658)^{F_y/F_e} \times F_y$$

(ب) اگر $L_c/r > 4/71 \sqrt{E/F_y}$ و یا اینکه $F_y/F_e > 2/25$ باشد:

$$F_{cr} = 0/877 F_e$$

که در فرمول های (الف) و (ب) مقدار تنش الاستیک بصورت زیر محاسبه می کنیم

$$F_e = \pi^2 E / (L_c/r)^2$$

نکته: برای اعضای که لاغر باشند، برای محاسبه ی مقاومت فشاری باید از ضوابط بخش E.7 در AISC360 – ۱۶ استفاده کنیم.

Compressive Strength for Flexural-Torsional Buckling— AISC Specification Section E4

The nominal compressive strength is determined based on the limit state of flexural-torsional buckling as follows:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (\text{Spec. Eq. E4-1})$$

$$\phi_c = 0.90 \text{ (LRFD)} \quad \Omega_c = 1.67 \text{ (ASD)}$$

The critical stress, F_{cr} , is determined according to Equation E3-2 or E3-3, using the torsional or flexural-torsional elastic buckling stress, F_e , determined from:

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}} \right]$$

(Spec. Eq. E4-3)



where

C_w = warping constant, in.⁶ (mm⁶)

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{r_y}\right)^2} \quad (\text{Spec. Eq. E4-6})$$

$$F_{ez} = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ \right] \frac{1}{A_g \bar{r}_o^2} \quad (\text{Spec. Eq. E4-7})$$

G = shear modulus of elasticity of steel = 11,200 ksi (77 200 MPa)

$$H = 1 - \frac{x_o^2 + y_o^2}{\bar{r}_o^2} \quad (\text{Spec. Eq. E4-8})$$

I_x, I_y = moment of inertia about the principal axes, in.⁴ (mm⁴)

J = torsional constant, in.⁴ (mm⁴)

K_x = effective length factor for flexural buckling about x-axis

K_y = effective length factor for flexural buckling about y-axis

K_z = effective length factor for flexural buckling about the longitudinal axis

L_{cx} = effective length of member for buckling about x-axis, in. (mm)
= $K_x L_x$

L_{cy} = effective length of member for buckling about y-axis, in. (mm)
= $K_y L_y$

L_{cz} = effective length of member for buckling about the longitudinal axis, in. (mm)
= $K_z L_z$

$\bar{r}_o$ = polar radius of gyration about the shear center, in. (mm)

$$\bar{r}_o^2 = x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} \quad (\text{Spec. Eq. E4-9})$$

r_x = radius of gyration about x-axis, in. (mm)

r_y = radius of gyration about y-axis, in. (mm)

x_o, y_o = coordinates of the shear center with respect to the centroid, in. (mm)

نکته: مقاومت فشاری موجود (اسمی) در حالت حدی کمانش خمشی-پیچشی بصورت زیر محاسبه می کنیم:

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g \rightarrow \phi_c = 0.9: \text{LRFD}$$

$$P_n / \Omega_c = F_{cr} A_g / \Omega_c \rightarrow \Omega_c = 1.67: \text{ASD}$$

تنش بحرانی F_{cr} بر اساس تنش کمانش الاستیک پیچشی یا خمشی-پیچشی بصورت زیر محاسبه می کنیم:

$$F_e = \left(F_{ey} + F_{ez} / \sqrt{H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{ey} F_{ez}}{(F_{ey} + F_{ez})^2}} \right]$$

بصورت زیر محاسبه می کنیم: F_{ey} که در فرمول فوق

$$F_{ey} = \pi^2 E / \left(\frac{L_{cy}}{r_y} \right)^2 \text{ و همچنین}$$



$$F_{ez} = \left[\pi^2 E C_w / (L_{cz})^2 \right]^{1/2} / A_g \bar{r}_z^2$$

$$H = 1 - x_c - y_c / \bar{r}_z^2$$

$$\bar{r}_z^2 = x_c^2 + y_c^2 + I_x + I_y / A_g$$

C_w : ثابت تابیدگی مقطع

G : مدول برشی فولاد

I : ثابت پیچشی بر حسب (mm^4)

I_x و I_y : ممان اینرسی حول محوهای اصلی x و y بر حسب (mm^4)

$L_{cz} = K_z L$: طول موثر عضو بر کماتش حول محور طولی (z) بر حسب (mm)

$L_{cy} = K_y L$: طول موثر عضو بر کماتش حول محور (y) بر حسب (mm)

$L_{cx} = K_x L$: طول موثر عضو بر کماتش حول محور (x) بر حسب (mm)

K_z : ضریب طول موثر حول محور z

K_y : ضریب طول موثر حول محور y

K_x : ضریب طول موثر حول محور x

r_{xc} : شعاع ژیراسیون حول محور x بر حسب (mm)

r_{yc} : شعاع ژیراسیون حول محور y بر حسب (mm)

$\bar{r}_z$: شعاع ژیراسیون قطبی بر حسب (mm)

x_c و y_c : مختصات مرکز برش با توجه به مختصات اصلی بر حسب (mm)

Tensile Strength—AISC Specification Section D2

The nominal tensile strength is determined based on the limit state of tensile yielding in the gross section:

$$P_n = F_y A_g \quad (\text{Spec. Eq. D2-1})$$

$$\phi_c = 0.90 \text{ (LRFD)} \quad \Omega_c = 1.67 \text{ (ASD)}$$

نکته: مقاومت کششی موجود (اسمی) در حالت حدی تسلیم کششی در سطح مقطع اصلی بصورت زیر محاسبه می کنیم:

$$\text{برای حالت LRFD: } \phi_t P_n = \phi_t F_y A_g \rightarrow \phi_t = 0.9$$

$$\text{برای حالت ASD: } P_n / \Omega_t = F_y A_g / \Omega_t \rightarrow \Omega_t = 1.67$$



3.2.2.2 Calculation of Nominal Flexural Strength, M_n

The flexural strength of the top and bottom tee sections must be determined and compared to the required flexural strength to support the Vierendeel design moment, with an unbraced length equal to the length of the tee section (reference Figure 3-2).

Design Assumptions

1. $E = 29,000 \text{ ksi} (200\,000 \text{ MPa})$
2. $L_b = e$ for castellated beams
 $= D_o/2$ for cellular beams
3. $G = 11,200 \text{ ksi} (77\,200 \text{ MPa})$

The nominal flexural strength is the lowest value obtained according to the limit states of yielding (plastic moment), lateral-torsional buckling, flange local buckling, and local buckling of tee stems.

نکته: مقاومت خمشی اسمی در سپری‌های بالا و پایین مقاطع لانه‌زنبوری بایستی با لنگر خمشی طراحی ثانویه مقایسه کنیم. فرضیات طراحی به صورت زیر

می‌باشد

$$E = 2 \times 10^5 \text{ بر حسب (MPa)}$$

$$G = 77/2 \times 10^3 \text{ بر حسب (MPa)}$$

$$L_b: \text{ طول بدون مهاربندی جانبی بر حسب (mm)}$$

که در تیرهای لانه‌زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی برابر با e می‌باشد

و در تیرهای لانه‌زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی برابر با $D_o/2$ می‌باشد.

Nominal Flexural Strength for Yielding—AISC Specification Section F9.1

The nominal flexural strength for yielding, M_n , is determined as follows:

$$M_n = M_p \quad (\text{Spec. Eq. F9-1})$$

$$M_p = M_y \quad (\text{Spec. Eq. F9-4})$$

where

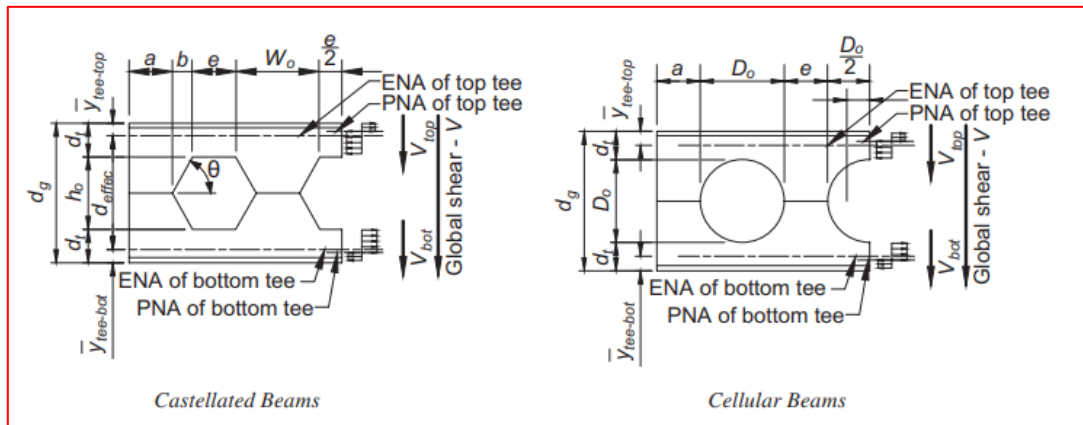
$$M_y = F_y S_{x\text{-tee}} \\ = \text{yield moment about the axis of bending, kip-in. (N-mm)}$$

$$S_{x\text{-tee}} = \text{elastic section modulus of tee about the } x\text{-axis, in.}^3 \text{ (mm}^3\text{)}$$

Note: Because the stem will be in compression, M_p is limited to the minimum section modulus of the tee, $S_{x\text{-tee}}$, multiplied by the yield strength of the steel.

نکته: مقاومت خمشی در حالت تسلیم^۱ بصورت زیر محاسبه می‌کنیم (چون که جان سپری مقطع فشرده می‌باشد، مقدار M_p را محدود می‌کنیم. M_p به

$$S_{x\text{-tee}} \times F_y \text{ محدود می‌شود).}$$



شکل ۱۶- اصطلاحات مورد استفاده برای محاسبه مقاومت خمشی در تیرهای غیر مرکب

برای حالت LRFD: $\phi_b M_n = \phi_b M_p \rightarrow \phi_b = 0.9$

برای حالت ASD: $M_n / \Omega_b = M_p / \Omega_b \rightarrow \Omega_b = 1.67$

حال اگر جان و بال تحت کشش قرار گرفته باشند، بصورت زیر عمل می کنیم

$$M_p = M_y \rightarrow M_p = F_y Z_x \leq 1.6 M_y$$

حال اگر جان و بال تحت فشار قرار گرفته باشند، بصورت زیر عمل می کنیم

$$M_p = M_y \rightarrow M_p = F_y Z_x$$

به طوری که مقدار M_y بصورت $M_y = F_y S_{x-tee}$ می باشد.

M_y : لنگر تسلیم حول محور خمشی بر حسب (N.mm)

S_{x-tee} : مدول الاستیک سپری حول محور (x) بر حسب (mm^3)

F9. TEES AND DOUBLE ANGLES LOADED IN THE PLANE OF SYMMETRY

This section applies to tees and double angles loaded in the plane of symmetry.

The nominal flexural strength, M_n , shall be the lowest value obtained according to the limit states of yielding (plastic moment), lateral-torsional buckling, flange local buckling, and local buckling of tee stems and double angle web legs.

1. Yielding

$$M_n = M_p \quad (F9-1)$$

where

(a) For tee stems and web legs in tension

$$M_p = F_y Z_x \leq 1.6 M_y \quad (F9-2)$$

where

$$M_y = \text{yield moment about the axis of bending, kip-in. (N-mm)} \\ = F_y S_x \quad (F9-3)$$

(b) For tee stems in compression

$$M_p = M_y \quad (F9-4)$$



Lateral-Torsional Buckling—AISC Specification Section F9.2

When $L_b \leq L_p$ the limit state of lateral-torsional buckling does not apply.

When $L_p < L_b \leq L_r$

$$M_n = M_p - (M_p - M_y) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)$$

(Spec. Eq. F9-6)

when $L_b > L_r$

$$M_n = M_c$$

(Spec. Eq. 9-7)

where

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

(Spec. Eq. F9-8)

$$L_r = 1.95 \left(\frac{E}{F_y} \right) \frac{\sqrt{I_y J}}{S_x} \sqrt{2.36 \left(\frac{F_y}{E} \right) \frac{d S_x}{J} + 1}$$

(Spec. Eq. F9-9)

$$M_{cr} = \frac{1.95 E}{L_b} \sqrt{I_y J} (B + \sqrt{1 + B^2})$$

(Spec. Eq. F9-10)

$$B = 2.3 \left(\frac{d}{L_b} \right) \sqrt{\frac{I_y}{J}}$$

(Spec. Eq. F9-11)

d = depth of tee in tension, in. (mm)

For stems in compression anywhere along the unbraced length, M_{cr} is given by Equation F9-10 with

$$B = -2.3 \left(\frac{d}{L_b} \right) \sqrt{\frac{I_y}{J}}$$

(Spec. Eq. F9-12)

where

d = depth of tee in compression, in. (mm)

For tee stems

$$M_n = M_{cr} \leq M_y$$

(Spec. Eq. F9-13)

نکته: برای کنترل کمانش پیچشی-جانبی بصورت زیر عمل می‌کنیم:

(الف) اگر رابطه‌ی $L_b \leq L_p$ برقرار باشد، نیازی به در نظر گرفتن کمانش پیچشی-جانبی نمی‌باشد.

(ب) اگر رابطه‌ی $L_p < L_b \leq L_r$ برقرار باشد، بصورت زیر عمل می‌کنیم:

$$M_n = M_p - (M_p - M_y) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)$$

(پ) اگر رابطه‌ی $L_b > L_r$ برقرار باشد، بصورت زیر عمل می‌کنیم:

$$M_n = M_{cr}$$

$$M_{cr} = \frac{1.95 E}{L_b} \sqrt{I_y J} (B + \sqrt{1 + B^2})$$

$$B = 2.3 \left(\frac{d}{L_b} \right) \sqrt{\frac{I_y}{J}}$$

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow L_r = 1.95 \left(\frac{E}{F_y} \right) \frac{\sqrt{I_y J}}{S_x} \sqrt{2.36 \left(\frac{F_y}{E} \right) \frac{d S_x}{J} + 1}$$



d : عمق سپری (تحت فشار) بر حسب (mm)

برای بال‌های تحت فشار (سپری) نیز بصورت زیر عمل می‌کنیم:

$$M_n = M_{cr} \leq M_y$$

Flange Local Buckling of Tees—AISC Specification Section F9.3

(a) For sections with a compact flange in flexural compression, the limit state of flange local buckling does not apply.

(b) For sections with a noncompact flange in flexural compression

$$M_n = \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_{xc}) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] \leq 1.6M_y$$

(Spec. Eq. F9-14)

(c) For sections with a slender flange in flexural compression

$$M_n = \frac{0.7ES_{xc}}{\left(\frac{b_f}{2t_f} \right)^2}$$

(Spec. Eq. F9-15)

where

S_{xc} = elastic selection modulus referred to the compression flange, in.³ (mm³)

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f}$$

$\lambda_{pf} = \lambda_p$, the limiting slenderness for a compact flange, AISC Specification Table B4.1b

$\lambda_{rf} = \lambda_r$, the limiting slenderness for a noncompact flange, AISC Specification Table B4.1b

نکته: برای کنترل کمانش موضعی بال سپری‌ها بصورت زیر عمل می‌کنیم:

(الف) برای مقاطع با بال فشرده، نیازی به در نظر گرفتن کمانش موضعی بال نمی‌باشد.

(ب) برای مقاطع با بال فشاری غیرفشرده بصورت زیر عمل می‌کنیم:

$$M_n = [M_p - (M_p - 0.7F_y S_{xc}) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right)] \leq 1/6 M_y$$

(پ) برای مقاطع با بال فشاری لاغر بصورت زیر عمل می‌کنیم:

$$M_n = 0.7ES_{xc} / \left(\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \right)$$

S_{xc} : اساس مقطع الاستیک برای بال فشاری بر حسب (mm³)

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f}$$

$\lambda_{pf} = \lambda$: ضریب لاغری برای بال فشرده

$\lambda_{rf} = \lambda_r$: ضریب لاغری برای بال غیرفشرده



Local Buckling of Tee Stems in Flexural Compression— AISC Specification Section F9.4

The nominal flexural strength for local buckling in flexural compression, M_n , is determined as follows:

$$M_n = F_{cr} S_x \quad (\text{Spec. Eq. F9-16})$$

where

S_x = elastic section modulus about the x -axis, in.³ (mm³)

The critical stress, F_{cr} , is determined as follows:

$$(a) \text{ When } \frac{d}{t_w} \leq 0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = F_y \quad (\text{Spec. Eq. F9-17})$$

$$(b) \text{ When } 0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{d}{t_w} \leq 1.52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = \left(1.43 - 0.515 \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) F_y$$

(Spec. Eq. F9-18)

$$(c) \text{ When } \frac{d}{t_w} > 1.52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = \frac{1.52E}{\left(\frac{d}{t_w} \right)^2}$$

(Spec. Eq. F9-19)

where

$$d = d_t$$

نکته: بال‌های سپری‌ها تحت فشار ناشی از خمش، تحت کماتش موضعی قرار می‌گیرند. برای کنترل کماتش موضعی بال‌های سپری، بصورت زیر عمل می‌کنیم:

$$M_n = F_{cr} S_x$$

S_x : مدول الاستیک مقطع حول محور (x) بر حسب (mm³)

برای محاسبه‌ی تنش بحرانی F_{cr} در این حال بصورت زیر عمل می‌کنیم:

(الف) در صورتیکه رابطه‌ی $\frac{d}{t_w} \leq 0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ برقرار باشد،

رابطه‌ی تنش بحرانی بصورت زیر می‌باشد:

$$F_{cr} = F_y$$

(ب) در صورتیکه رابطه‌ی $0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{d}{t_w} \leq 1.52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ برقرار باشد،

رابطه‌ی تنش بحرانی بصورت زیر می‌باشد:

$$F_{cr} = (1.43 - 0.515 \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{F_y}{E}}) F_y$$



(پ) در صورتیکه رابطه‌ی $d/t_w > \sqrt{E/F_y}$ برقرار باشد،
رابطه‌ی تنش بحرانی بصورت زیر می‌باشد:

$$F_{cr} = \frac{1/52E}{(d/t_w)^2}$$

$$d = d_t$$

3.2.3 Check of Top and Bottom Tees Subjected to Combined Flexural and Axial Forces

The interaction of flexure and axial forces in top and bottom tees constrained to bend about a geometric axis (x and/or y) is limited by AISC Specification Equations H1-1a and H1-1b.

For combined flexure and compression:

(a) For $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$$

(Spec. Eq. H1-1a)

(b) For $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$$

(Spec. Eq. H1-1b)

where

P_c = available axial strength, kips (N)
 P_r = required axial strength, kips (N)
 M_c = available flexural strength, kip-in. (N-mm)
 M_r = required flexural strength, kip-in. (N-mm)
 x = subscript relating symbol to major axis bending
 y = subscript relating symbol to minor axis bending

A check for combined flexure and tension can be made using the same equations; however the available compressive strength will always be less than the available tensile strength and therefore the available compressive strength may be used to simplify the calculations. This may not be true in asymmetric sections, in which case the available tensile strength may need to be investigated as well.

نکته: برای اثر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی بر تیرهای سپری بالا و پایین، لازم است که اندرکنش نیروهای محوری و خمشی را کنترل کنیم. برای این منظور بصورت زیر عمل می‌کنیم:

(الف) اگر $P_r/P_c \geq 0.2$ باشد، در آن صورت

$$P_r/P_c + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1$$

(ب) اگر $P_r/P_c < 0.2$ باشد، در آن صورت

$$P_r/2P_c + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1$$



P_r : مقاومت فشاری مورد نیاز بر حسب (N)

$P_c = \phi_c P_n$: مقاومت فشاری طراحی بر حسب (N)

M_r : مقاومت خمشی مورد نیاز بر حسب (N.mm)

M_c : مقاومت خمشی طراحی بر حسب (N.mm)

x: خمش حول محور قوی

y: خمش حول محور ضعیف

نکته: آیین‌نامه‌ی طراحی تیرهای لانه‌زنبوری و سلولی (AISC)، در ارتباط با طراحی تیرهای کامپوزیت (مركب)، ۵ مرحله مشخص کرده است. در ادامه این ۵ مرحله را بررسی می‌کنیم.

1. Calculate the shear strength of the concrete deck—this will be subtracted from the global shear to calculate the net shear, which will be used to compute the Vierendeel moment in the top and bottom tees.
2. Calculate the net shear and moment at each.
3. Calculate the axial forces and Vierendeel moments in the top and bottom tees.
4. Calculate the available axial compressive and flexural strength of the top and bottom tees using Chapters E and F of the AISC Specification.
5. Check the interaction of the available axial compressive and flexural strength using the equations in Chapter H of the AISC Specification.

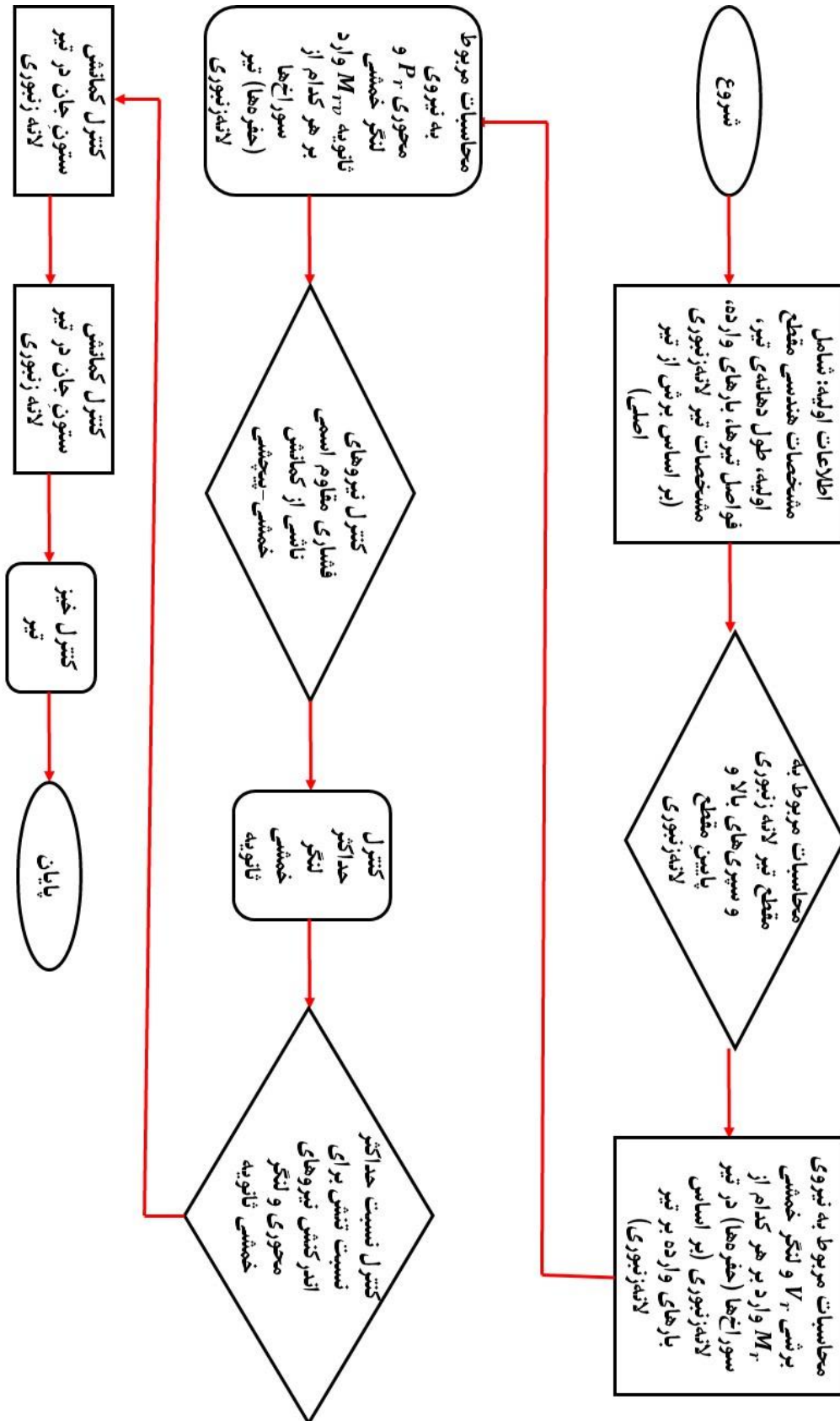


۱۰ طراحی تیر لانه‌زنبوری غیر مرکب (غیر کامپوزیت)

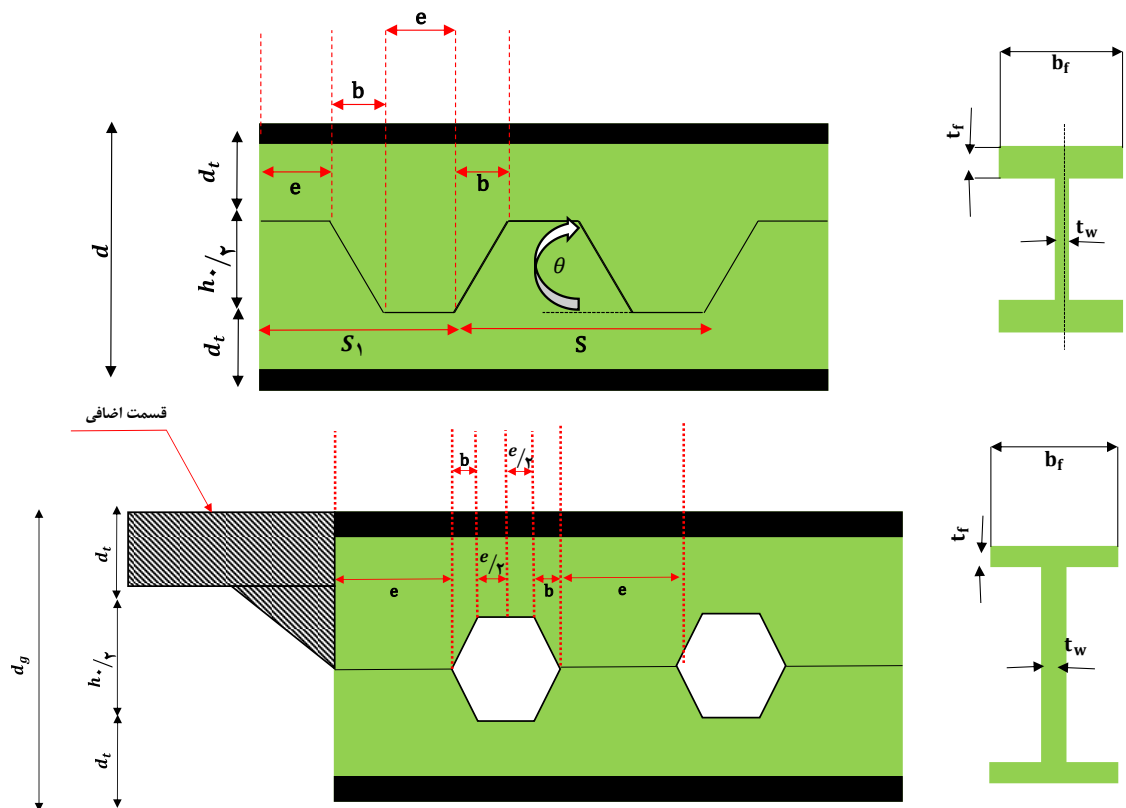
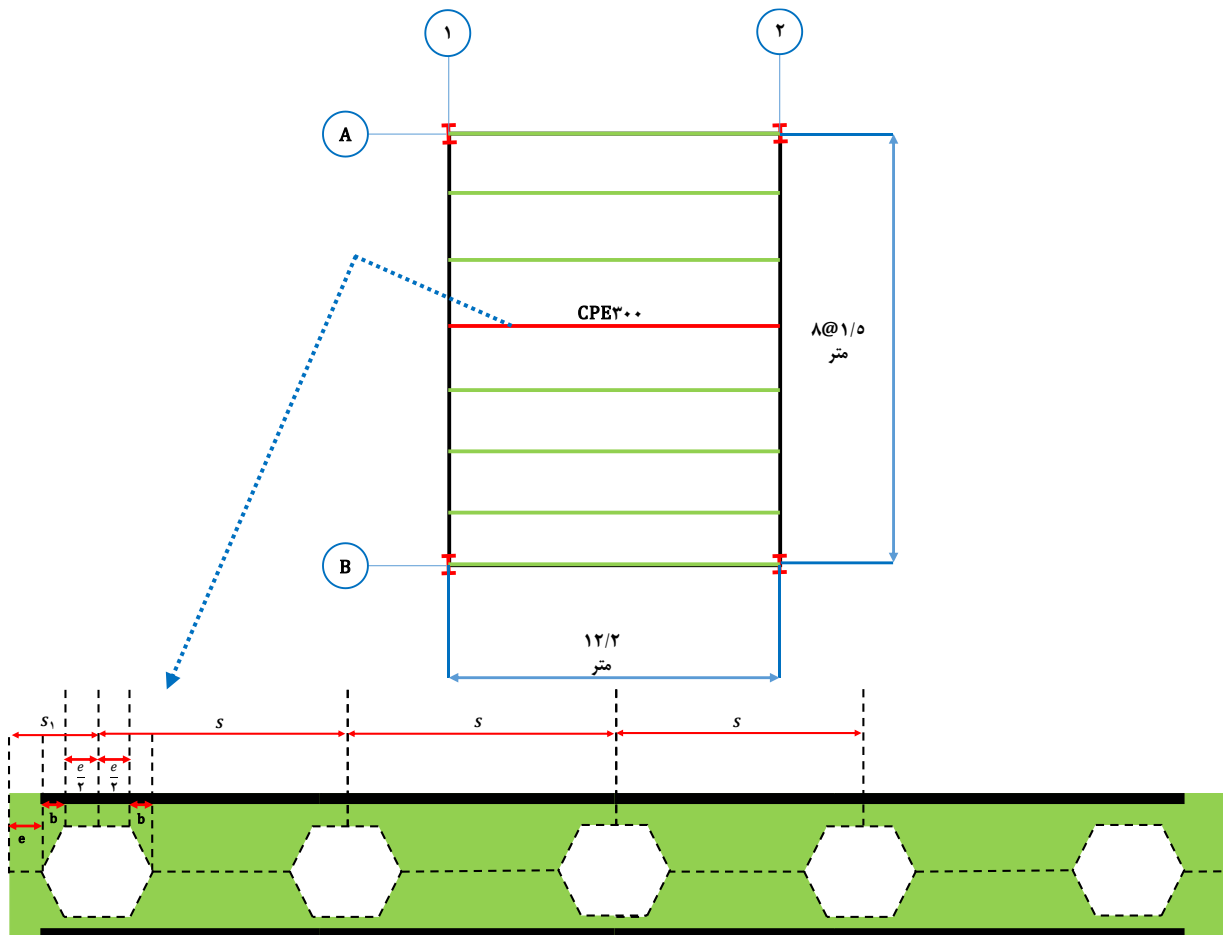
تیر میانی از نوع لانه‌زنبوری به طول ۱۲/۲ متر با تکیه‌گاه‌های ساده داده شده است. تیر مذکور دارای مقطع غیر مرکب لانه‌زنبوری و تحت بارگذاری گسترده قرار دارد. هدف: کنترل مقطع تیر لانه‌زنبوری از IPE۳۰۰ برای بارهای وارده.

فرض: اتصالات در هر دو انتهای تیر وجود دارد و پایداری تیر در حین ساخت فراهم شده است (قبل از اتصال عرشه) و اتصالات به اندازه کافی ثابت و محکم شده‌اند (به گونه‌ای که از کمانش ستون در دو انتها جلوگیری می‌کند).

قبل از حل مساله‌ی مطرح شده، لازم است که مروری بر گام‌های طراحی دستی تیر لانه‌زنبوری داشته باشیم.



شکل ۱۷- مراحل مختلف طراحی دستی تیر لانه‌زنبوری



شکل ۱۸- نمایش پارامترهای تیر لانه زنبوری (با سوراخ های شش ضلعی)



طول دهانه ی تیر	فواصل تیرها	بار مرده (وزن تیر در نظر گرفته نشده است)
$L_n = 12/2 \text{ m}$	۱/۵ متر	$D.L = ۹۶۰ \text{ N/m}^۲$

بار زنده	مهار جانبی (تیر توسط عرشه سقف کاملاً مهاربندی جانبی شده است)	نوع مصالح
$L.L = 768 \text{ N/m}^2$	$L_b = \infty$	$F_y = ۲۴۰ \text{ MPa}$ $F_u = ۳۷۰ \text{ MPa}$

روابطی که برای کنترل خیز تیر لانه زنبوری استفاده می کنیم:

جدول ۱- روابط کنترل خیز تیر لانه زنبوری

کنترل خیز تیر	مقدار خیز نهایی برای بار زنده	مقدار خیز نهایی برای بار مرده به همراه بار زنده
	$\frac{L_n}{۳۴۰}$	$\frac{L_n}{۱۸۰}$

مشخصات مقطع IPE۳۰۰ به صورت جدول زیر می باشد:

جدول ۲- مشخصات مقطع IPE300

Z_x	S_x	I_x	A	t_w	t_f	b_f	d	k: فاصله ی انتهای قسمت گردی یا ماهیچه ای تا بال پایینی و بالایی
$۸۰۴ \times ۱۰^۳ \text{ mm}^۳$	$۵۵۷ \times ۱۰^۳ \text{ mm}^۳$	$۸۳۶ \times ۱۰^۵ \text{ mm}^۴$	$۵۳۸۰ \text{ mm}^۲$	۷.۱ mm	۱۰.۷ mm	۱۵۰ mm	۳۰۰ mm	26 mm

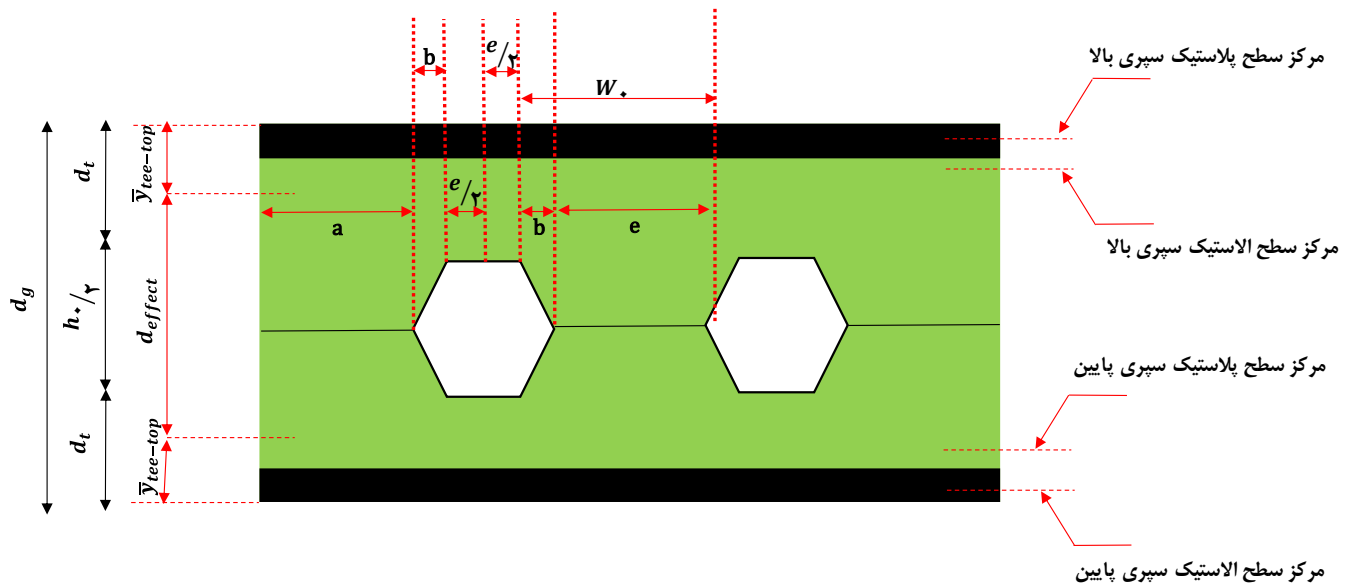
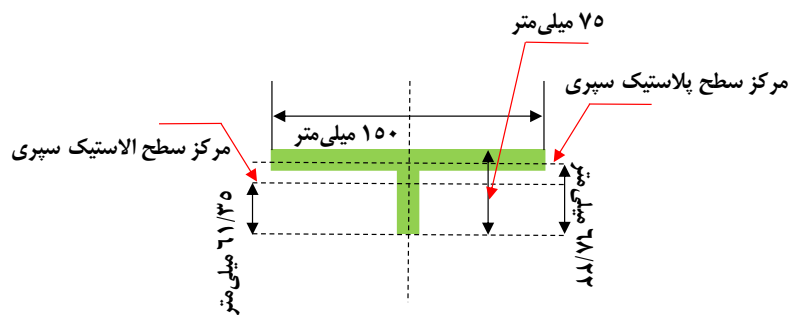
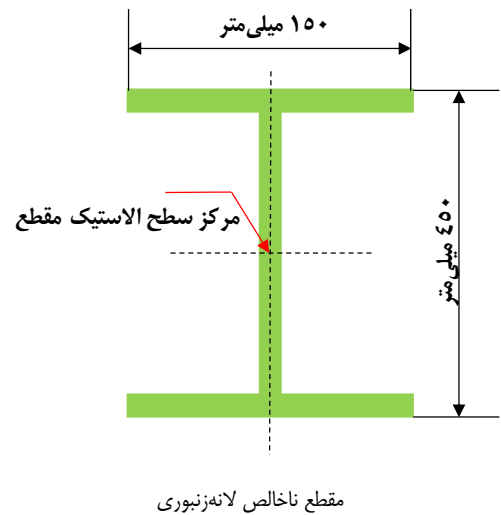
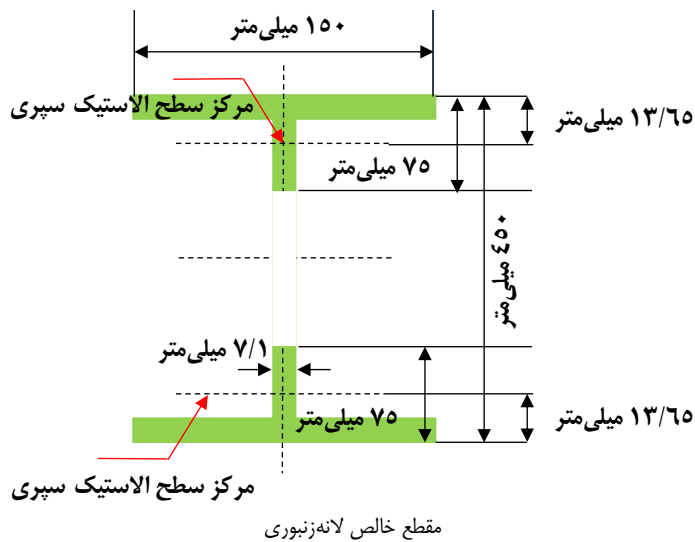
مقادیر e و b و d_t در تیر لانه زنبوری بر اساس برش از تیر اصلی، به صورت جدول زیر در نظر می گیریم:

d_t	b	e
۷۵ mm	۹۰ mm	75 mm

مشخصات مقطع تیر لانه زنبوری طبق جدول زیر محاسبه می کنیم:

جدول ۳- مشخصات مقطع تیر لانه زنبوری

مشخصات مقطع تیر لانه زنبوری	
$h = d - ۲d_t$	$h = 300 - 2 \times 75 = 150 \text{ mm}$
$h_1 = ۲h$	$h_0 = 2 \times 150 = 300 \text{ mm}$
$d_g = h_1 + ۲d_t$	$d_g = 300 + 2 \times 75 = 450 \text{ mm}$
$\theta = \tan^{-1}(\frac{h}{b})$	$\theta = \tan^{-1}(\frac{150}{90}) = \tan^{-1} 1/333 \approx 60^0$
فاصله ی ابتدا و یا انتهای تیر تا مرکز سوراخ تیر لانه زنبوری $S_1 = e + \frac{e}{۲} + b$	$s_1 = 75 + \frac{75}{2} + 90 = 202/5 \text{ mm}$
فاصله مرکز تا مرکز سوراخ تیر لانه زنبوری $S = ۲e + ۲b$	$s = 2 \times 75 + 2 \times 90 = 330 \text{ mm}$



مقطع سپري (T)

شکل ۱۹- نمایش مقطع تیر لانه زنبوری (خالص و ناخالص)، به همراه مقطع سپري (T)

در جدول زیر مشخصات سپري های بالا و پايين تیر لانه زنبوری مذکور ارائه می کنیم:



جدول ۴- مشخصات هندسی سپری های مقطع لانه زنبوری

مشخصات هندسی سپری های بالا و پایین تیر لانه زنبوری			
$A_{net} = 2061/53 \text{ mm}^2$	$I_x = 672430 \text{ mm}^4$	$S_{x-top} = 49246 \text{ mm}^3$	$Z_x = 21066 \text{ mm}^3$
$\bar{y}_{tee} = 13/65 \text{ mm}$	$I_y = 3011293 \text{ mm}^4$	$S_{x-bot} = 10961 \text{ mm}^3$	$J = 69447 \text{ mm}^4$
$X = 68/22 \text{ mm}$	$r_x = 18/06 \text{ mm}$	$r_y = 38/22 \text{ mm}$	$y_0 = 56 \text{ mm}$

مشخصات مقطع خالص سپری ها در جدول زیر محاسبه می کنیم:

جدول ۵- مشخصات مقطع خالص سپری های مقطع لانه زنبوری

مشخصات مقطع خالص سپری های بالا و پایین	
$d_{effect} = d_g - 2\bar{y}_{tee}$	$d_{effect} = 450 - 2 \times 13/65 = 422/7 \text{ mm}$
$A_{net} = 2A_{tee}$	$A_{net} = 2 \times 2061/35 \text{ mm}^2$
$y = \bar{x} = \frac{d_g}{2}$	$y = \bar{x} = \frac{452}{2} = 225 \text{ mm}$
$I_{x-net} = 2I_{tee} + 2A_{tee}(\frac{d_{effect}}{2})^2$	$I_{x-net} = 2 \times 672430 + 2 \times 2061/5 \times (\frac{422/7}{2})^2 = 1855 \times 10^5 \text{ mm}^4$
$S_{x-net} = \frac{I_{x-net}}{(\frac{d_g}{2})}$	$S_{x-net} = \frac{1855 \times 10^5 \text{ mm}^4}{(\frac{450}{2})} = 824444/44 \text{ mm}^3$
$Z_{x-net} = 2A_{tee}(\frac{d_{effect}}{2})$	$Z_{x-net} = 2 \times 2061/35 \times (\frac{422/7}{2}) = 871332/65 \text{ mm}^3$

در جدول زیر مشخصات مقطع کلی سپری ها محاسبه می کنیم:

جدول ۶- مشخصات مقطع ناخالص سپری های مقطع لانه زنبوری

مشخصات مقطع کلی (ناخالص) سپری های بالا و پایین	
$A_g = A_{net} + h \cdot t_w$	$A_g = 2061/35 + 300 \times 7/1 = 4122/7 \text{ mm}^2$
$I_{x-g} = I_{x-net} + (\frac{t_w h^3}{12})$	$I_{x-g} = 1855 \times 10^5 + (\frac{7/1 \times 300^3}{12}) = 20147/5 \times 10^5$
$S_{x-g} = \frac{I_{x-g}}{(\frac{d_g}{2})}$	$S_{x-g} = \frac{20147/5 \times 10^5}{(\frac{450}{2})} = 895444/44 \text{ mm}^3$
$Z_{x-g} = Z_{x-net} + 2t_w h(\frac{h}{2})$	$Z_{x-g} = 871332/65 + 2 \times 7/1 \times 150(\frac{150}{2}) = 1031082/65 \text{ mm}^3$

در مرحله ی بعد، لنگر خمشی (ثانویه)، و لنگر خمشی و برش کل موجود در سپری های بالا و پایین را طبق جدول زیر محاسبه می کنیم (برای محاسبه ی لنگر و نیروی برشی کل در هر سوراخ موجود در تیر لانه زنبوری، باید نیروهای داخلی نظیر نیروی محوری و خمشی در هر سوراخ (حفره) بدست بیاوریم):

بار وارد بر تیر میانی به صورت خطی از حاصل ضرب عرض بارگیر تیر لانه زنبوری (که مقدار آن ۱/۵ متر است) در مقدار بار سطحی (بار گسترده) بدست می آید. بار مرده: $1/5(m) \times 960(N/m^2) = 1440(N/m)$ بار زنده: $1/5(m) \times 768(N/m^2) = 1152(N/m)$	
LRFD	ASD
ترکیب بار شماره ۱ $1/4 D/L = 1/4 \times 1440 = 360 N/m$	$D.L + L.L = 1440 + 1152 = 2592 N/m$
ترکیب بار شماره ۲ $1/2 D.L + 1/6 L.L = 1/2 \times 1440 + 1/6 \times 1152 = 352 N/m$ ترکیب بار ۲ حاکم است.	

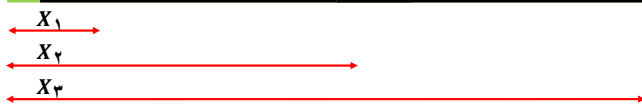
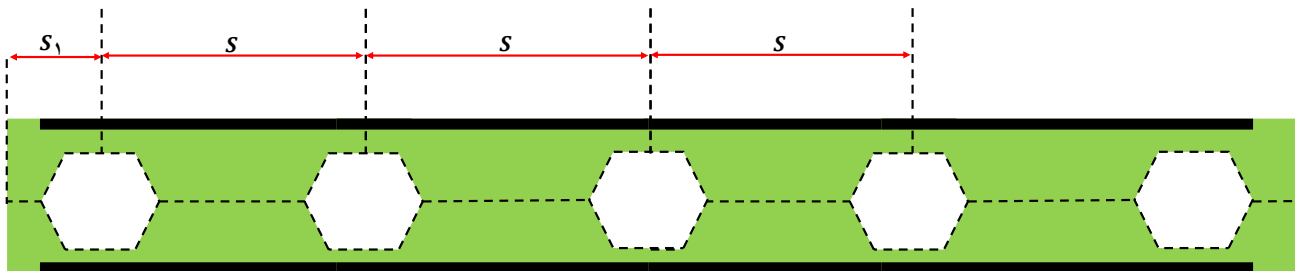
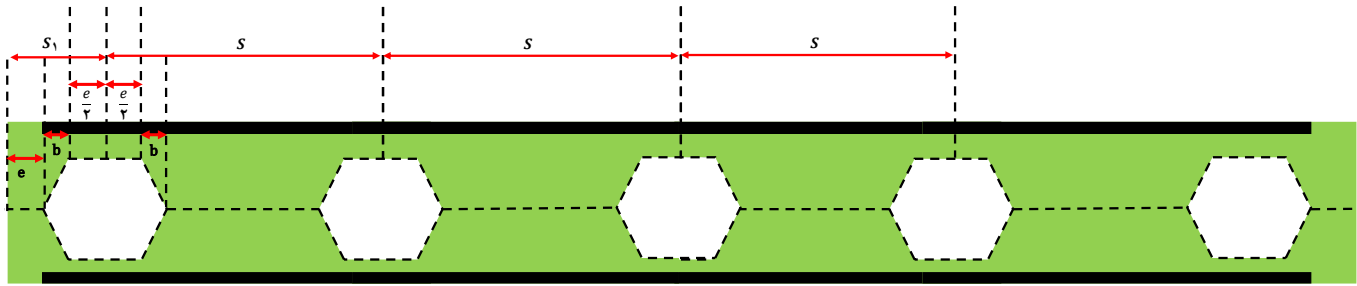


برای محاسبه نیروهای داخلی موجود در حفره‌های تیر لانه‌زنبوری، نیاز به یادآوری مفاهیمی از تحلیل سازه و مقاومت مصالح داریم. یک تیر ساده که تحت اثر بار یکنواخت قرار دارد، می‌دانیم که نیروی برشی و خمشی آن در فاصله‌ی X_i از تکیه‌گاه به صورت زیر بدست می‌آید:

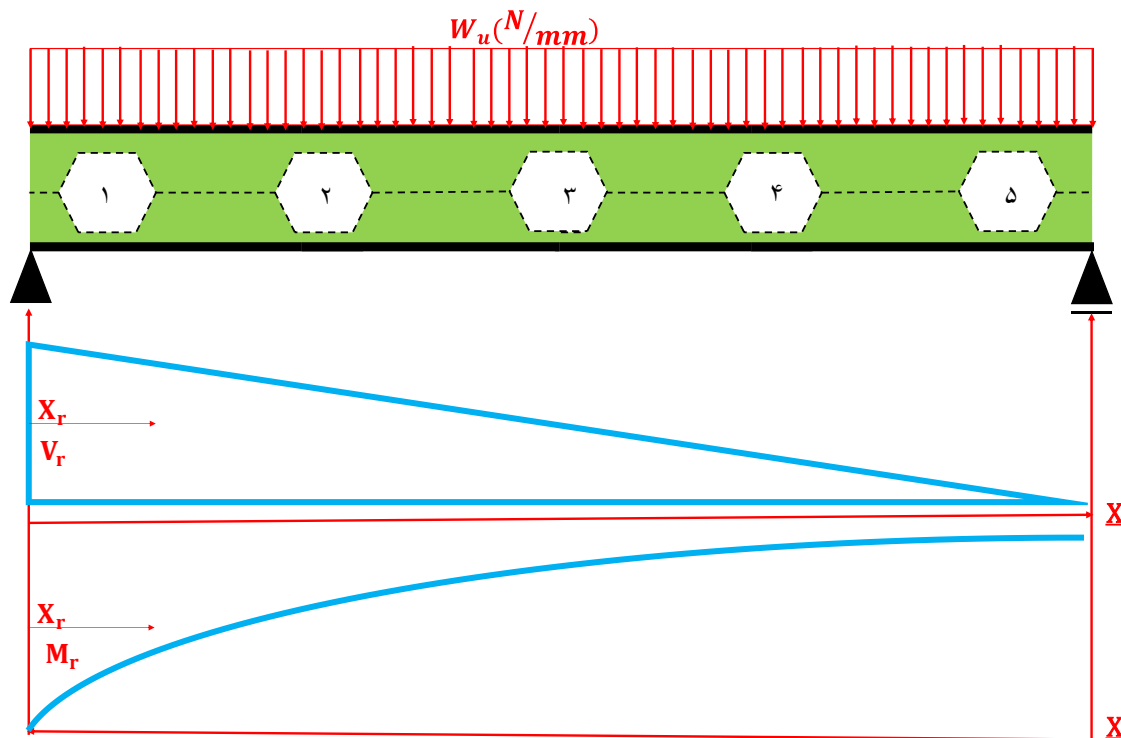
جدول ۷- توضیحات مرتبط با نیروهای داخلی در تیر ساده‌ی (دو سر مفصل) لانه‌زنبوری

نیروهای داخلی تیر ساده‌ی لانه‌زنبوری	
	تیر ساده تحت بار یکنواخت
	نیروهای داخلی در فاصله‌ی X_i از تکیه‌گاه
	$V = R_A - w_u X_i$ $= \frac{w_u L_n}{2} - w_u X_i$
	$M = R_A X_i - w_u X_i \left(\frac{X_i}{2} \right)$ $= \frac{w_u L_n X_i}{2} - \frac{w_u X_i^2}{2}$
<u>نمودار برشی</u> تیر به صورت یک خط مایل می‌باشد (شیب این خط برابر با w_u است). مقادیر ماکزیمم نمودار برش در $X_i = L_n$ و $X_i = 0$ برابر عکس‌العمل تکیه‌گاهی و برابر با $\frac{w_u L_n}{2}$ می‌باشد و مقدار مینیمم نمودار برش تیر در وسط تیر ($\frac{L_n}{2}$) و برابر با صفر می‌باشد. <u>نمودار لنگر خمشی</u> تیر به صورت یک سهمی متقارن نسبت به وسط تیر می‌باشد. مقادیر مینیمم نمودار لنگر در $X_i = L_n$ و $X_i = 0$ برابر صفر می‌باشد و مقدار ماکزیمم نمودار لنگر خمشی تیر در وسط تیر ($\frac{L_n}{2}$) و برابر با $\frac{w_u L^2}{8}$ می‌باشد.	

فاصله‌ی مرکز هر سوراخ تیر لانه‌زنبوری مطابق زیر محاسبه خواهد شد:



اگر i شماره ی سوراخ تیر لانه زنبوری (از ابتدای تیر تا وسط تیر) باشد، خواهیم داشت:						
$X_0 = 0$	$X_1 = S_1$	$X_2 = S_1 + S$	$X_3 = S_1 + 2S$	...	$X_{i-1} = S_1 + (i-2)S$	$X_i = \frac{L_n}{2} - X_{i-1}$



با استفاده از فرمول های $M = R_A X_i - W_u X_i \left(\frac{X_i}{2} \right) = \frac{W_u L_n X_i}{2} - \frac{W_u X_i^2}{2}$ و $V = R_A - W_u X_i = \frac{W_u L_n}{2} - W_u X_i$ خمشی می باشند (بر حسب فاصله از ابتدای تیر)، می توانیم برای هر کدام از بارها طبق روش LRFD و ASD مقادیر برش و لنگر خمشی را در هر سوراخ (حفره) در تیر لانه زنبوری محاسبه کنیم.



$X_0 = 0$ ابتدای تیر	$X_1 = 202/5 \text{ mm}$	$X_2 = 202/5 + 300 = 502/5 \text{ mm}$	...	$X_{21} = 6100 \text{ mm}$ وسط تیر
-------------------------	--------------------------	--	-----	---------------------------------------

محاسبه ی برش در ابتدای تیر برای بار مرده
$V = \frac{W_u L_n}{2} - W_u X_i \quad (W_u = 1440 \text{ N/m})$ $V = \frac{1800 \times 12/2}{2} = 8784 \text{ N} = 8/784 \text{ KN}$
محاسبه ی لنگر خمشی در
LRFD برای حالت $X_2 = 202/5 + 300 = 502/5 \text{ mm}$
$M = R_A X_i - W_u X_i \left(\frac{X_i}{2} \right) = \frac{W_u L_n X_i}{2} - \frac{W_u X_i^2}{2}$ $V = \frac{3571/2 \times 12/2 \times 0/5025}{2} - \frac{3571/2 \times (0/5025)^2}{2} = 10496 \text{ N} = 10/496 \text{ KN}$

مقادیر نیروی برش کل و لنگر خمشی در مرکز هر سوراخ (حفره) در راستای محور طولی تیر لانه زنبوری (با توجه به توضیحات مراحل قبلی) در جدول زیر محاسبه می کنیم:

جدول ۸- نیروی برشی (کل) در حالت های LRFD و ASD

مقدار نیروی برش کل در مرکز هر سوراخ (حفره) تیر لانه‌زنبوری					
$(V_r(KN)) = R_A - W_u X_i = \frac{W_u L_n}{2} - W_u X_i$ مقدار برش کل				X_i (m)	شماره سوراخ در تیر لانه‌زنبوری
V_r		L.L	D.L		
ASD	LRFD				
۱۵/۸۰۸	۲۱/۷۸۴	۷/۰۲۴	۸/۷۸۴	۰	ابتدای تیر
۱۵/۲۸۸	۲۱/۰۶۴	۶/۷۹۲	۸/۴۹۶	۰/۲۰۲۵	۱
۱۴/۵۱۲	۱۹/۹۹۲	۶/۴۴۸	۸/۰۶۴	۰/۵۰۲۵	۲
۱۳/۷۲۸	۱۸/۹۲	۶/۱۰۴	۷/۶۳۲	۰/۸۰۲۵	۳
۱۲/۹۵۲	۱۷/۸۴۸	۵/۷۶	۷/۲	۱/۱۰۲۵	۴
۱۲/۱۷۶	۱۶/۷۷۶	۵/۴۰۸	۶/۷۶۸	۱/۴۰۲۵	۵
۱۱/۴	۱۵/۷۰۴	۵/۰۶۸	۶/۳۳۶	۱/۷۰۲۵	۶
۱۰/۶۲۴	۱۴/۶۳۲	۴/۷۲	۵/۹۰۴	۲/۰۰۲۵	۷
۹/۸۴	۱۳/۵۶	۴/۳۷۶	۵/۴۷۲	۲/۳۰۲۵	۸
۹/۰۶۴	۱۲/۴۸۸	۴/۰۳۲	۵/۰۴	۲/۶۰۲۵	۹
۸/۲۸۸	۱۱/۴۱۶	۳/۶۸	۴/۶۰۸	۲/۹۰۲۵	۱۰
۷/۵۱۲	۱۰/۳۴۴	۳/۳۳۶	۴/۱۷۶	۳/۲۰۲۵	۱۱
۶/۷۳۶	۹/۲۸	۲/۹۹۲	۳/۷۴۴	۳/۵۰۲۵	۱۲
۵/۹۵۲	۸/۲۰۸	۲/۶۴۸	۳/۳۱۲	۳/۸۰۲۵	۱۳
۵/۱۷۶	۷/۱۳۶	۲/۳۰۴	۲/۸۸	۴/۱۰۲۵	۱۴
۴/۴	۶/۰۶۴	۱/۹۵۲	۲/۴۴۸	۴/۴۰۲۵	۱۵
۳/۶۲۴	۴/۹۹۲	۱/۶۰۸	۲/۰۱۶	۴/۷۰۲۵	۱۶
۲/۸۴۸	۳/۹۲	۱/۲۶۴	۱/۵۸۴	۵/۰۰۲۵	۱۷
۲/۰۶۴	۲/۸۴۸	۰/۹۲	۱/۱۵۲	۵/۳۰۲۵	۱۸
۱/۲۸۸	۱/۷۷۶	۰/۵۷۶	۰/۷۲	۵/۶۰۲۵	۱۹
۰/۵۱۲	۰/۷۰۴	۰/۲۲۴	۰/۲۸۸	۵/۹۰۲۵	۲۰
۰	۰	۰	۰	۶/۱۰۰	۲۱ (وسط تیر)
مقدار لنگر خمشی کل در مرکز هر حفره‌ی تیر لانه‌زنبوری					
$(M_r(KN.m)) = R_A X_i - W_u X_i (\frac{X_i}{2}) = \frac{W_u L_n X_i}{2} - \frac{W_u X_i^2}{2}$ مقدار لنگر خمشی کل				X_i (m)	شماره سوراخ در تیر لانه‌زنبوری
M_r		L.L	D.L		
ASD	LRFD				

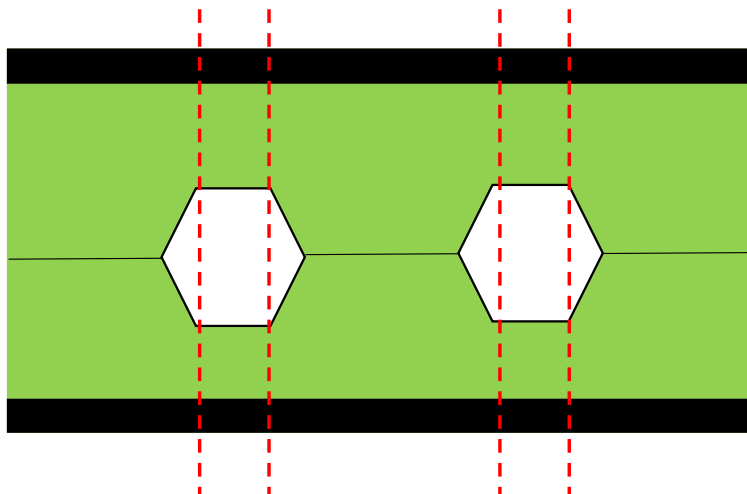


ابتدای تیر	•	•	•	•	•
۱	۰/۲۰۲۵	۱/۷۵۲	۱/۴	۴/۳۳۶	۳/۱۵۲
۲	۰/۵۰۲۵	۴/۲۳۲	۳/۳۸۴	۱۰/۴۹۶	۷/۶۱۶
۳	۰/۸۰۲۵	۶/۵۸۴	۵/۲۷۲	۱۶/۳۲۸	۱۱/۸۵۶
۴	۱/۱۰۲۵	۸/۸۰۸	۷/۰۴۸	۲۱/۸۴۸	۱۵/۸۵۶
۵	۱/۴۰۲۵	۱۰/۹۰۴	۸/۷۲	۲۷/۰۴	۱۹/۶۲۴
۶	۱/۷۰۲۵	۱۲/۸۶۴	۱۰/۲۹۶	۳۱/۹۱۲	۲۳/۱۶
۷	۲/۰۰۲۵	۱۴/۷۰۴	۱۱/۷۶	۳۶/۴۶۴	۲۶/۴۶۴
۸	۲/۳۰۲۵	۱۶/۴۰۸	۱۳/۱۲۸	۴۰/۶۹۶	۲۹/۵۳۶
۹	۲/۶۰۲۵	۱۷/۹۸۴	۱۴/۳۸۴	۴۴/۶	۳۲/۳۶۸
۱۰	۲/۹۰۲۵	۱۹/۴۳۲	۱۵/۵۴۴	۴۸/۱۸۴	۳۴/۹۷۶
۱۱	۳/۲۰۲۵	۲۰/۷۴۴	۱۶/۶	۵۱/۴۴۸	۳۷/۳۴۴
۱۲	۳/۵۰۲۵	۲۱/۹۳۶	۱۷/۵۴۴	۵۴/۳۹۲	۳۹/۴۸
۱۳	۳/۸۰۲۵	۲۲/۹۹۲	۱۸/۳۹۲	۵۷/۰۱۶	۴۱/۳۸۴
۱۴	۴/۱۰۲۵	۲۳/۹۲	۱۹/۱۳۶	۵۹/۳۲	۴۳/۰۵۶
۱۵	۴/۴۰۲۵	۲۴/۷۲	۱۹/۷۷۶	۶۱/۲۹۶	۴۴/۴۸۸
۱۶	۴/۷۰۲۵	۲۵/۳۸۴	۲۰/۳۱۲	۶۲/۹۵۲	۴۵/۶۹۶
۱۷	۵/۰۰۲۵	۲۵/۹۲	۲۰/۷۳۶	۶۴/۲۸۸	۴۶/۶۶۴
۱۸	۵/۳۰۲۵	۲۶/۳۳۶	۲۱/۰۶۴	۶۵/۳۰۴	۴۷/۴
۱۹	۵/۶۰۲۵	۲۶/۶۱۶	۲۱/۲۸۸	۶۶	۴۷/۹۰۴
۲۰	۵/۹۰۲۵	۲۶/۷۶	۲۱/۴۰۸	۶۶/۳۷۶	۴۸/۱۷۶
۲۱ (وسط تیر)	۶/۱۰۰	۲۶/۷۹۲	۲۱/۴۳۲	۶۶/۴۴	۴۸/۲۲۴

بعد از محاسبه‌ی برش کل و لنگر خمشی کل مطابق جدول فوق، با استفاده از فرمول‌های زیر مقدار نیروی محوری و مقدار لنگر خمشی (ثانویه) (با توجه به توضیحات مراحل قبلی) در مرکز هر سوراخ مطابق جدول زیر محاسبه می‌کنیم:

این نواحی از تیر لانه‌زنبوری، باعث ایجاد

لنگر خمشی ثانویه ($M_{rv} = \frac{V_r}{\gamma} (\frac{e}{\gamma})$) می‌شوند.



فرمول‌های مربوط به نیروی محوری و لنگر خمشی ثانویه	
$P_r = \frac{M_r}{d_{effect}}$	نیروی محوری
$M_{rv} = \frac{V_r}{\gamma} (\frac{e}{\gamma})$	لنگر خمشی (ثانویه)
$d_{effect} = 422/7 \text{ mm} = 0/4227 \text{ m}$	
$e = 75 \text{ mm} = 0/075 \text{ m}$	



پس از محاسبات مربوط به مراحل قبل مقادیر نیروی محوری کل بر اساس لنگر خمشی کل و نیروی برشی کل بر اساس لنگر خمشی (ثانویه) در مرکز هر سوراخ (حفره) در راستای محور طولی تیر لانه زنبوری (با توجه به توضیحات مراحل قبلی) در جدول زیر محاسبه می کنیم:

جدول ۹- نیروی محوری (کل) بر اساس لنگر خمشی (کل) در حالت های LRFD و ASD

مقدار نیروی محوری کل بر اساس لنگر خمشی کل در مرکز هر سوراخ (حفره) تیر لانه‌زنبوری					
مقدار نیروی محوری کل و لنگر خمشی کل				X_i (m)	شماره سوراخ در تیر لانه‌زنبوری
$P_r = \frac{M_r}{d_{effect}}$		M_r			
ASD	LRFD	ASD	LRFD		
*	*	*	*	*	ابتدای تیر
۷/۴۵۶۸۲۵	۱۰/۲۵۷۸۶	۳/۱۵۲	۴/۳۳۶	۰/۲۰۲۵	۱
۱۸/۰۱۷۵	۲۴/۸۳۰۸۵	۷/۶۱۶	۱۰/۴۹۶	۰/۵۰۲۵	۲
۲۸/۰۴۸۲۶	۳۸/۶۲۷۸۷	۱۱/۸۵۶	۱۶/۳۲۸	۰/۸۰۲۵	۳
۳۷/۵۱۱۲۴	۵۱/۶۸۶۷۸	۱۵/۸۵۶	۲۱/۸۴۸	۱/۱۰۲۵	۴
۴۶/۴۲۵۳۶	۶۳/۹۶۹۷۲	۱۹/۶۲۴	۲۷/۰۴	۱/۴۰۲۵	۵
۵۴/۷۹۰۶۳	۷۵/۴۹۵۶۲	۲۳/۱۶	۳۱/۹۱۲	۱/۷۰۲۵	۶
۶۲/۶۰۷۰۵	۸۶/۲۶۴۴۸	۲۶/۴۶۴	۳۶/۴۶۴	۲/۰۰۲۵	۷
۶۹/۸۷۴۶۲	۹۶/۲۷۶۳۲	۲۹/۵۳۶	۴۰/۶۹۶	۲/۳۰۲۵	۸
۷۶/۵۷۴۴	۱۰۵/۵۱۲۲	۳۲/۳۶۸	۴۴/۶	۲/۶۰۲۵	۹
۸۲/۷۴۴۲۴	۱۱۳/۹۹۱	۳۴/۹۷۶	۴۸/۱۸۴	۲/۹۰۲۵	۱۰
۸۸/۳۴۶۳۲	۱۲۱/۷۱۲۸	۳۷/۳۴۴	۵۱/۴۴۸	۳/۲۰۲۵	۱۱
۹۳/۳۹۹۶	۱۲۸/۶۷۷۵	۳۹/۴۸	۵۴/۳۹۲	۳/۵۰۲۵	۱۲
۹۷/۹۰۳۹۲	۱۳۴/۸۸۵۳	۴۱/۳۸۴	۵۷/۰۱۶	۳/۸۰۲۵	۱۳
۱۰۱/۸۵۹۴	۱۴۰/۳۳۵۹	۴۳/۰۵۶	۵۹/۳۲	۴/۱۰۲۵	۱۴
۱۰۵/۲۴۷۲	۱۴۵/۰۱۰۶	۴۴/۴۸۸	۶۱/۲۹۶	۴/۴۰۲۵	۱۵
۱۰۸/۱۰۵	۱۴۸/۹۲۸۳	۴۵/۶۹۶	۶۲/۹۵۲	۴/۷۰۲۵	۱۶
۱۱۰/۳۹۵	۱۵۲/۰۸۹	۴۶/۶۶۴	۶۴/۲۸۸	۵/۰۰۲۵	۱۷
۱۱۲/۱۳۶۲	۱۵۴/۴۹۲۶	۴۷/۴	۶۵/۳۰۴	۵/۳۰۲۵	۱۸
۱۱۳/۳۲۸۶	۱۵۶/۱۳۹۱	۴۷/۹۰۴	۶۶	۵/۶۰۲۵	۱۹
۱۱۳/۹۷۲۱	۱۵۷/۰۲۸۶	۴۸/۱۷۶	۶۶/۳۷۶	۵/۹۰۲۵	۲۰
۱۱۴/۰۸۵۶	۱۵۷/۱۸	۴۸/۲۲۴	۶۶/۴۴	۶/۱۰۰	۲۱ (وسط تیر)
مقدار لنگر خمشی (ثانویه) و نیروی برش کل در مرکز هر حفره ی تیر لانه‌زنبوری					
مقدار لنگر خمشی (ثانویه) و نیروی برش کل				X_i (m)	شماره سوراخ در تیر لانه‌زنبوری
$M_{rv}(KN.m) = \frac{V_r}{\gamma} \left(\frac{e}{\gamma} \right)$		V_r			
ASD	LRFD	ASD	LRFD		
۰/۲۹۶۴	۰/۴۰۸۴۵	۱۵/۸۰۸	۲۱/۷۸۴	*	ابتدای تیر
۰/۲۸۶۶۵	۰/۳۹۴۹۵	۱۵/۲۸۸	۲۱/۰۶۴	۰/۲۰۲۵	۱
۰/۲۷۳۱	۰/۳۷۴۸۵	۱۴/۵۱۲	۱۹/۹۹۲	۰/۵۰۲۵	۲
۰/۲۵۷۴	۰/۳۵۴۷۵	۱۳/۷۲۸	۱۸/۹۲	۰/۸۰۲۵	۳
۰/۲۴۲۸۵	۰/۳۳۴۶۵	۱۲/۹۵۲	۱۷/۸۴۸	۱/۱۰۲۵	۴
۰/۲۲۸۳	۰/۳۱۴۵۵	۱۲/۱۷۶	۱۶/۷۷۶	۱/۴۰۲۵	۵
۰/۲۱۳۷۵	۰/۲۹۴۴۵	۱۱/۴	۱۵/۷۰۴	۱/۷۰۲۵	۶
۰/۱۹۹۲	۰/۲۷۴۳۵	۱۰/۶۲۴	۱۴/۶۳۲	۲/۰۰۲۵	۷
۰/۱۸۴۵	۰/۲۵۴۲۵	۹/۸۴	۱۳/۵۶	۲/۳۰۲۵	۸
۰/۱۶۹۹۵	۰/۲۳۴۱۵	۹/۰۶۴	۱۲/۴۸۸	۲/۶۰۲۵	۹
۰/۱۵۵۴	۰/۲۱۴۰۵	۸/۲۸۸	۱۱/۴۱۶	۲/۹۰۲۵	۱۰
۰/۱۴۰۸۵	۰/۱۹۳۹۵	۷/۵۱۲	۱۰/۳۴۴	۳/۲۰۲۵	۱۱



۰/۱۲۶۳	۰/۱۷۴	۶/۷۳۶	۹/۲۸	۳/۵۰۲۵	۱۲
۰/۱۱۱۶	۰/۱۵۳۹	۵/۹۵۲	۸/۲۰۸	۳/۸۰۲۵	۱۳
۰/۰۹۷۰۵	۰/۱۳۳۸	۵/۱۷۶	۷/۱۳۶	۴/۱۰۲۵	۱۴
۰/۰۸۲۵	۰/۱۱۳۷	۴/۴	۶/۰۶۴	۴/۴۰۲۵	۱۵
۰/۰۶۷۹۵	۰/۰۹۳۶	۳/۶۲۴	۴/۹۹۲	۴/۷۰۲۵	۱۶
۰/۰۵۳۴	۰/۰۷۳۵	۲/۸۴۸	۳/۹۲	۵/۰۰۲۵	۱۷
۰/۰۳۸۷	۰/۰۵۳۴	۲/۰۶۴	۲/۸۴۸	۵/۳۰۲۵	۱۸
۰/۰۲۴۱۵	۰/۰۳۳۳	۱/۲۸۸	۱/۷۷۶	۵/۶۰۲۵	۱۹
۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۳۲	۰/۵۱۲	۰/۷۰۴	۵/۹۰۲۵	۲۰
۰	۰	۰	۰	۶/۱۰۰	۲۱ (وسط تیر)

بعد از محاسبات انجام گرفته در ارتباط با نیروی محوری کل، نیروی برش کل، لنگر خمشی کل و لنگر خمشی (ثانویه)، در این مرحله بایستی نسبت عرض به بال سپری را مطابق جدول زیر کنترل می‌کنیم:

جدول ۱۰- کنترل فشردگی بال

کنترل نسبت عرض به بال سپری
$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} < \lambda_p = 0/38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{150}{2 \times 10/7} = 7 < \lambda_p = 0/38 \sqrt{\frac{2 \times 10^5}{240}} = 11$ OK
چون $\lambda < \lambda_p$ می‌باشد، نیازی به کنترل کمانش موضعی بال سپری در هنگام محاسبه‌ی لنگر خمشی طراحی نیست (چون $\lambda < \lambda_p$ می‌باشد، بال فشرده محسوب می‌شود).

پس از کنترل نسبت عرض به ضخامت بال سپری در مرحله‌ی قبل، در این مرحله بایستی نسبت عرض به ضخامت ساق سپری را مطابق جدول زیر کنترل می‌کنیم:

جدول ۱۱- کنترل لاغری مقطع

کنترل نسبت عرض به ضخامت ساق سپری
$\lambda = \frac{d}{t} = \frac{d_t}{t_w} < \lambda_r = 0/75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
$\lambda = \frac{d_t}{t_w} = \frac{75}{7/10} = 10/56 < \lambda_r = 0/75 \sqrt{\frac{2 \times 10^5}{240}} = 21/6$ OK
چون $\lambda < \lambda_r$ می‌باشد، نیازی به کنترل الزامات مربوط به محاسبه‌ی مقاومت فشاری طراحی نیست (چون $\lambda < \lambda_r$ می‌باشد، مقطع لاغر محسوب نمی‌شود).

پس از کنترل نسبت عرض به ضخامت بال سپری و نیز کنترل نسبت عرض به ضخامت سپری در مراحل قبل، در گام بعدی مقاومت محوری (فشاری) طراحی در سپری‌ها در اثر کمانش خمشی را مطابق جدول زیر محاسبه می‌کنیم:



جدول ۱۲- مقاومت فشاری طراحی

محاسبه‌ی مقاومت فشاری طراحی در سپری‌ها
محاسبه‌ی ضریب لاغری کمانش
$\frac{L_c}{r} = \frac{K_x e}{r_x} = \frac{0/65 \times 75}{18/06} = 2/7$
$\frac{L_c}{r} = \frac{K_y e}{r_y} = \frac{1 \times 75}{38/22} = 1/96$
بیشترین مقدار ضریب لاغری کمانش برابر با ۲.۷ می‌باشد.
محاسبه‌ی تنش کمانش الاستیک
$F_e = \frac{\pi^2 E}{(\frac{L_c}{r})^2} = \frac{\pi^2 \times 2 \times 10^5}{(2/7)^2} = 2/71 \times 10^5 \text{ MPa}$
مقاومت فشاری اسمی برای کمانش خمشی (برای اعضای فاقد المان‌های لاغر)
$4/71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4/71 \sqrt{\frac{2 \times 10^5}{240}} = 135/97$
چون $\frac{L_c}{r} = 2/7 \leq 4/71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 135/97$ بنابراین مقاومت فشاری طراحی ناشی از کمانش خمشی در سپری به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:
$P_n = F_{cr} A_{tee}$
تنش بحرانی
$F_{cr} = \left(0/658 \left(\frac{F_y}{F_e}\right)\right) F_y = \left(0/658 \left(\frac{240}{2/71 \times 10^5}\right)\right) \times 240 \cong 240 \text{ MPa}$
$P_n = 240 \times 2061/53 = 494767/2 \text{ N} = 494/77 \text{ kN}$

اکنون مقاومت محوری (فشاری) اسمی ناشی از کمانش خمشی-پیچشی طبق جدول زیر محاسبه می‌کنیم:

جدول ۱۳ - مقاومت فشاری اسمی

مقاومت محوری (فشاری) اسمی ناشی از کمانش خمشی-پیچشی
$P_n = F_{cr} A_{tee}$
$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H}\right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}}\right)$
$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(\frac{L_{cy}}{r})^2} = \frac{\pi^2 \times 2 \times 10^5}{(1/96)^2} = 5/14 \times 10^5 \text{ MPa}$
اگر که $x_0 = 0$ باشد در آن صورت مقدار C_w برابر با یک خواهد بود.
$\bar{r}_o^2 = x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x + I_y}{A_{tee}} = 0 + (56)^2 + \frac{672430 + 3011293}{2061/53} = 4922/89 \text{ mm}^2$
$F_{ez} = \left(\frac{\pi^2 E C_w}{L_{cz}^2} + GJ\right) \frac{1}{A_{tee} \bar{r}_o^2}$
$F_{ez} = \left(\frac{\pi^2 \times 2 \times 10^5}{75^2} + 77/2 \times 10^3\right) \frac{1}{2061/53 \times 4922/89} = 528/32 \text{ MPa}$
$H = 1 - \frac{x_o + y_o}{\bar{r}_o^2} = 1 - \frac{0 + (56)^2}{4922/89} = 0/363$
$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H}\right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}}\right)$



$F_e = \left(\frac{5/14 \times 10^5 + 528/32}{2 \times 0/363} \right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times (5/14 \times 10^5) \times (528/32) \times 0/363}{((5/14 \times 10^5) + (528/32))^2}} \right) = 527/97 \text{ MPa}$
$F_{cr,z} = \left(0/658^{\left(\frac{F_y}{F_{ez}} \right)} \right) F_y$
$F_{cr} = \left(0/658^{\left(\frac{240}{527/97} \right)} \right) \times 240 \cong 198/42 \text{ MPa}$
$P_n = F_{cr,z} A_{tee}$
$P_n = 198/42 \times 2061/53 = 409048/78 \text{ N} = 409/05 \text{ kN}$
نیروی فشاری طراحی باید از حداکثر نیروی فشاری مقاوم اسمی مقطع کمتر باشد.

حداکثر نیروی فشاری مقاوم اسمی در حالت های LRFD و ASD مطابق جدول زیر محاسبه می کنیم:

جدول ۱۴- نیروی فشاری مقاوم اسمی

حداکثر نیروی فشاری مقاوم اسمی در حالت های LRFD و ASD	
LRFD	ASD
$P_u = \phi_c P_n \geq P_{r,LRFD}$	$P_u = \frac{P_n}{\phi_c} \geq P_{r,ASD}$
$P_u = 0/9 \times 409/05 = 368/14 \text{ kN}$	$P_u = \frac{409/05}{1/67} = 244/94 \text{ kN}$
$368/14 \text{ kN} \geq 157/18 \text{ kN}$	$244/94 \text{ kN} \geq 114/0856 \text{ kN}$
Ok	Ok

در صورتی که جان مقطع تحت فشار باشد (طبق مشخصات هندسی سپری پائین)، در گام بعدی به محاسبه ی خمشی مورد نیاز طراحی در سپری ها بر اساس حالت حدی تسلیم کششی مطابق جدول زیر می پردازیم:

جدول ۱۵- مقاومت خمشی در حالت حدی تسلیم (Yielding)

محاسبه ی خمشی مورد نیاز طراحی در سپری ها بر اساس حالت حدی تسلیم کششی
$M_p = M_y$
$M_y = F_y S_{x, tee, bot}$
$M_p = F_y S_{x, tee, bot}$
$M_p = 240 \times 10961 = 2630640 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 2/63 \text{ kN.m}$

نکته: چون طول مهاري صفر است و تیر دارای مهار جانبی کافی است، لذا در حالت حدی کمانش پیچشی-جانبی نیاز به کنترل نداریم.

نکته: در مقاطع با بال فشرده ناشی از خمش، در حالت حدی کمانش موضعی بال نیاز به کنترل نداریم.

در گام بعدی، مطابق جدول زیر کمانش موضعی بال سپری ها تحت فشار ناشی از خمش محاسبه می کنیم:



جدول ۱۶ - کنترل کمانش موضعی بال سپری ها

کمانش موضعی بال سپری ها تحت فشار ناشی از خمش
$M_n = F_{cr} S_x$
$F_{cr} = F_y$
$\frac{d_t}{t_w} \leq 0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
$\frac{75}{7/10} = 10/56 \leq 0.84 \sqrt{\frac{2 \times 10^5}{240}} = 24/25$
$10/56 \leq 24/25$ ok
$F_{cr} = F_y = 240 \text{ MPa}$
$M_n = F_{cr} S_x$
$M_n = 240 \times 10961 = 2630640 \text{ N.mm} = 2/63 \text{ KN.m}$
مقاومت خمشی طراحی باید از حداکثر لنگر خمشی (ثانویه) مقطع سپری کمتر باشد.

در جدول زیر حداکثر لنگر خمشی (ثانویه) مقطع در اولین سوراخ (یا به عبارت دیگر در فاصله $X_1 = 525 \text{ mm}$) در حالت های LRFD و ASD محاسبه می کنیم:

جدول ۱۷ - لنگر خمشی (ثانویه) مقطع تیر لانه زنبوری در اولین سوراخ

حداکثر نیروی لنگر خمشی (ثانویه) در حالت های LRFD و ASD	
ASD	LRFD
$M_u = \frac{M_n}{\phi_c} \geq M_{rv, ASD}$	$M_u = \phi_c M_n \geq M_{rv, LRFD}$
$M_u = \frac{2/63}{1/67} = 1/57 \text{ KN.m}$	$M_u = 0.9 \times 2/63 = 2/37 \text{ KN.m}$
$1/57 \text{ KN.m} \geq 0.7221 \text{ KN.m}$	$2/37 \text{ KN.m} \geq 0/37485 \text{ KN.m}$
Ok	Ok

در گام بعدی سپری های بالا و پایین تیر را برای ترکیب لنگر خمشی و نیروهای محوری کنترل می کنیم.

جدول ۱۸ - روابط مربوط به کنترل اندرکنش نیروهای محوری و لنگرهای خمشی

الف) برای $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$
$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$
در اینجا خمش حول محور نداریم لذا $M_{rx} = 0$ می باشد. و مقادیر P_c ، M_{ry} و M_{cy} در روش طراحی LRFD به ترتیب برابر با P_u ، M_r و M_u می باشد.
الف) برای $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$
$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$
در اینجا خمش حول محور نداریم لذا $M_{ry} = 0$ می باشد. و مقادیر P_c ، M_{rx} و M_{cx} در روش طراحی LRFD به ترتیب برابر با P_u ، M_r و M_u می باشد.
P_r : مقاومت فشاری مورد نیاز بر حسب نیوتون
$P_c = \phi P_n$: مقاومت فشاری طراحی بر حسب نیوتون
M_r : مقاومت خمشی مورد نیاز بر حسب نیوتون
$M_c = \phi M_n$: مقاومت خمشی طراحی بر حسب نیوتون



X: خمشی حول محور قوی مقطع	
Y: خمشی حول محور قوی مقطع	
ASD	LRFD
$P_c = \frac{P_n}{\Omega_c}$	$P_c = \phi_c P_n$
$P_c = \frac{409/05}{1/67} = 244/94 \text{ KN}$	$P_c = 0/9 \times 409/05 = 368/145 \text{ KN}$

در گام بعدی به بررسی اندرکنش نیروهای محوری و لنگر خمشی (ثانویه) در روش LRFD و ASD مطابق جدول زیر می‌پردازیم:

جدول ۱۹- کنترل اندرکنش نیروهای محوری و لنگرهای خمشی

کنترل اثر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی در روش LRFD							
اثر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی				نیروی محوری و لنگر خمشی		X_i (m)	شماره سوراخ در تیر لانته‌زنبوری
حداکثر نسبت تنش بر اساس دو ستون زرد رنگ	نسبت تنش بر اساس فرمول $\frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right) \leq 1/0$ اگر $\frac{P_r}{P_c} < 0/2$	نسبت تنش بر اساس فرمول $\frac{P_r}{P_c} + \frac{1}{4} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right) \leq 1/0$ اگر $\frac{P_r}{P_c} \geq 0/2$	$\frac{P_r}{P_c}$	$M_{rv} (KN.m)$	$P_r (KN)$		
ابتدای تیر	۰/۱۷۲۵۵۷	-	۰	۰/۴۰۸۴۵	۰	۰	
۱	۰/۱۶۶۸۹۲	-	۰/۰۲۷۸۶۴	۰/۳۹۴۹۵	۱۰/۲۵۷۸۶	۰/۲۰۲۵	
۲	۰/۱۵۸۴۵۴	-	۰/۰۶۷۴۴۹	۰/۳۷۴۸۵	۲۴/۸۳۰۸۵	۰/۵۰۲۵	
۳	۰/۱۵۰۰۱۳	-	۰/۰۴۹۲۶	۰/۳۵۴۷۵	۳۸/۶۳۷۸۷	۰/۸۰۲۵	
۴	۰/۱۴۱۵۷	-	۰/۱۴۰۳۹۸	۰/۳۳۴۶۵	۵۱/۶۸۶۷۸	۱/۱۰۲۵	
۵	۰/۱۳۳۱۲۳	-	۰/۱۷۳۷۶۲	۰/۳۱۴۵۵	۶۳/۹۶۹۷۲	۱/۴۰۲۵	
۶	۰/۳۱۵۶۴۴	-	۰/۲۰۵۰۷	۰/۲۹۴۴۵	۷۵/۴۹۵۶۲	۱/۷۰۲۵	
۷	۰/۳۳۷۳۴۸	-	۰/۲۳۴۳۲۲	۰/۲۷۴۳۵	۸۶/۲۶۴۴۸	۲/۰۰۲۵	
۸	۰/۳۵۶۹۹۵	-	۰/۲۶۱۵۱۷	۰/۲۵۴۲۵	۹۶/۲۷۶۳۲	۲/۳۰۲۵	
۹	۰/۳۷۴۵۳۵	-	۰/۲۸۶۶۰۵	۰/۲۳۴۱۵	۱۰۵/۵۱۳۲	۲/۶۰۲۵	
۱۰	۰/۳۹۰۰۱۸	-	۰/۳۰۹۶۳۶	۰/۲۱۴۰۵	۱۱۳/۹۹۱	۲/۹۰۲۵	
۱۱	۰/۴۰۳۴۴۵	-	۰/۳۳۰۶۱۱	۰/۱۹۳۹۵	۱۲۱/۷۱۲۸	۳/۲۰۲۵	
۱۲	۰/۴۱۴۸۷۱	-	۰/۳۴۹۵۲۹	۰/۱۷۴	۱۲۸/۶۷۷۵	۳/۵۰۲۵	
۱۳	۰/۴۲۴۱۸۵	-	۰/۳۶۶۳۹۲	۰/۱۵۳۹	۱۳۴/۸۸۵۳	۳/۸۰۲۵	
۱۴	۰/۴۳۱۴۴۳	-	۰/۳۸۱۱۹۷	۰/۱۳۳۸	۱۴۰/۳۳۵۹	۴/۱۰۲۵	
۱۵	۰/۴۳۶۵۹۳	-	۰/۳۹۳۸۹۵	۰/۱۱۳۷	۱۴۵/۰۱۰۶	۴/۴۰۲۵	
۱۶	۰/۴۳۹۶۸۶	-	۰/۴۰۴۵۳۷	۰/۰۹۳۶	۱۴۸/۹۲۸۳	۴/۷۰۲۵	
۱۷	۰/۴۴۰۷۲۴	-	۰/۴۱۳۱۲۲	۰/۰۷۳۵	۱۵۲/۰۸۹	۵/۰۰۲۵	
۱۸	۰/۴۳۹۷۰۵	-	۰/۴۱۹۶۵۱	۰/۰۵۳۴	۱۵۴/۴۹۲۶	۵/۳۰۲۵	
۱۹	۰/۴۳۶۶۲۹	-	۰/۴۲۴۱۲۴	۰/۰۳۳۳	۱۵۶/۱۳۹۱	۵/۶۰۲۵	
۲۰	۰/۴۳۱۴۹۷	-	۰/۴۲۶۵۴	۰/۰۱۳۲	۱۵۷/۰۲۸۶	۵/۹۰۲۵	
۲۱ (وسط تیر)	۰/۴۲۶۹۵۱	-	۰/۴۲۶۹۵۱	۰	۱۵۷/۱۸	۶/۱۰۰	
کنترل اثر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی در روش ASD							
اثر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی				نیروی محوری و لنگر خمشی		X_i (m)	شماره سوراخ در تیر لانته‌زنبوری
حداکثر نسبت تنش بر اساس دو ستون زرد رنگ	نسبت تنش بر اساس فرمول $\frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right) \leq 1/0$ اگر $\frac{P_r}{P_c} < 0/2$	نسبت تنش بر اساس فرمول $\frac{P_r}{P_c} + \frac{1}{4} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right) \leq 1/0$ اگر $\frac{P_r}{P_c} \geq 0/2$	$\frac{P_r}{P_c}$	$M_{rv} (KN.m)$	$P_r (KN)$		
ابتدای تیر	۰/۲۱۶۶۲۱	-	۰	۰/۲۹۶۴	۰	۰	



۰/۲۱۶۶۶۱	-	۰/۲۱۶۶۶۱	۰/۰۳۰۴۴۳	۰/۲۸۶۶۵	۷/۴۵۶۸۲۵	۰/۲۰۲۵	۱
۰/۲۵۰۳۲۵	-	۰/۲۵۰۳۲۵	۰/۰۷۳۵۵۹	۰/۲۷۲۱	۱۸/۰۱۷۵	۰/۵۰۲۵	۲
۰/۲۸۱۷۳۷	-	۰/۲۸۱۷۳۷	۰/۱۱۴۵۱۱	۰/۲۵۷۴	۲۸/۰۴۸۲۶	۰/۸۰۲۵	۳
۰/۳۱۰۹۰۹	-	۰/۳۱۰۹۰۹	۰/۱۵۳۱۴۵	۰/۲۴۲۸۵	۳۷/۵۱۱۲۴	۱/۱۰۲۵	۴
۰/۳۳۷۸۵	-	۰/۳۳۷۸۵	۰/۱۸۹۵۳۸	۰/۲۲۸۳	۴۶/۴۲۵۳۶	۱/۴۰۲۵	۵
۰/۳۶۲۵۴۹	-	۰/۳۶۲۵۴۹	۰/۲۲۳۶۹	۰/۲۱۳۷۵	۵۴/۷۹۰۶۳	۱/۷۰۲۵	۶
۰/۳۸۵۰۰۹	-	۰/۳۸۵۰۰۹	۰/۲۵۵۶۰۲	۰/۱۹۹۲	۶۲/۶۰۷۰۵	۲/۰۰۲۵	۷
۰/۴۰۵۱۳	-	۰/۴۰۵۱۳	۰/۲۸۵۲۷۲	۰/۱۸۴۵	۶۹/۸۷۴۶۲	۲/۳۰۲۵	۸
۰/۴۲۳۰۳	-	۰/۴۲۳۰۳	۰/۳۱۲۶۲۵	۰/۱۶۹۹۵	۷۶/۵۷۴۴۴	۲/۶۰۲۵	۹
۰/۴۳۸۷۶۷	-	۰/۴۳۸۷۶۷	۰/۳۳۷۸۱۴	۰/۱۵۵۴	۸۲/۷۴۴۲۴	۲/۹۰۲۵	۱۰
۰/۴۵۲۱۸۷	-	۰/۴۵۲۱۸۷	۰/۳۶۰۶۸۶	۰/۱۴۰۸۵	۸۸/۳۴۶۳۲	۳/۲۰۲۵	۱۱
۰/۴۶۳۳۶۵	-	۰/۴۶۳۳۶۵	۰/۳۸۱۳۱۶	۰/۱۲۶۳	۹۳/۳۹۹۶	۳/۵۰۲۵	۱۲
۰/۴۷۲۲۰۵	-	۰/۴۷۲۲۰۵	۰/۳۹۹۷۰۶	۰/۱۱۱۶	۹۷/۹۰۳۹۲	۳/۸۰۲۵	۱۳
۰/۴۷۸۹۰۲	-	۰/۴۷۸۹۰۲	۰/۴۱۵۸۵۵	۰/۰۹۷۰۵	۱۰۱/۸۵۹۴	۴/۱۰۲۵	۱۴
۰/۴۸۳۲۸۱	-	۰/۴۸۳۲۸۱	۰/۴۲۹۶۸۶	۰/۰۸۲۵	۱۰۵/۲۴۷۲	۴/۴۰۲۵	۱۵
۰/۴۸۵۴۹۶	-	۰/۴۸۵۴۹۶	۰/۴۴۱۳۵۳	۰/۰۶۷۹۵	۱۰۸/۱۰۵	۴/۷۰۲۵	۱۶
۰/۴۸۵۳۹۳	-	۰/۴۸۵۳۹۳	۰/۴۵۰۷۰۲	۰/۰۵۳۴	۱۱۰/۳۹۵	۵/۰۰۲۵	۱۷
۰/۴۸۲۹۵۲	-	۰/۴۸۲۹۵۲	۰/۴۵۷۸۱۱	۰/۰۳۸۷	۱۱۲/۱۳۶۲	۵/۳۰۲۵	۱۸
۰/۴۷۸۳۶۸	-	۰/۴۷۸۳۶۸	۰/۴۶۲۶۷۹	۰/۰۲۴۱۵	۱۱۳/۳۲۸۶	۵/۶۰۲۵	۱۹
۰/۴۷۱۵۴۲	-	۰/۴۷۱۵۴۲	۰/۴۶۵۳۰۶	۰/۰۰۹۶	۱۱۳/۹۷۲۱	۵/۹۰۲۵	۲۰
۰/۴۶۵۷۷	-	۰/۴۶۵۷۷	۰/۴۶۵۷۷	۰	۱۱۴/۰۸۵۶	۶/۱۰۰	۲۱ (وسط تیر)

پس از کنترل اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی (ثانویه)، در گام بعدی کماتش ستون جان را مطابق روابط زیر محاسبه می‌کنیم:

کنترل کماتش ستون جان
$V_{rh} = \left \frac{M_{r(i+1)} - M_{r(i)}}{d_{effect}} \right = T_{r(i)} - T_{r(i+1)} $
اگر $i = 1$ باشد، مقدار نیروی برشی در بین سوراخ شماره ۱ و ۲ در تیر لانه‌زنبوری به صورت زیر محاسبه می‌شود
$i = 1: d_{effect} = 0/4227m$
$V_{rh,1} = \left \frac{M_{r(2)} - M_{r(1)}}{d_{effect}} \right = \left \frac{10/496 - 4/336}{0/4227} \right = 14/5992 \text{ KN}$
$V_{rh,1} = 14/5992 \text{ KN}$

با توجه به فرمول جدول فوق، در جدول زیر به محاسبه نیروی برشی افقی در مقطع کلی (V_h) با توجه به لنگر خمشی کل در هر کدام از حالات LRFD و ASD می‌پردازیم:

جدول ۲۰- محاسبات مربوط به نیروی برشی افقی

محاسبه نیروی برشی افقی جهت کنترل کماتش ستون جان با استفاده از لنگر خمشی						
ASD			LRFD			X_i (m)
$V_{h,ASD}$	$M_{r(i+1)}$	$M_{r(i)}$	$V_{h,LRFD}$	$M_{r(i+1)}$	$M_{r(i)}$	
-	۳/۱۵۲	۰	-	۴/۳۳۶	۰	۰
۱۰/۵۷۹۶۸	۷/۶۱۶	۳/۱۵۲	۱۴/۵۹۹۲	۱۰/۴۹۶	۴/۳۳۶	۰/۲۰۲۵
۱۰/۰۴۸۸	۱۱/۸۵۶	۷/۶۱۶	۱۳/۸۲۱۸۴	۱۶/۳۲۸	۱۰/۴۹۶	۰/۵۰۲۵
۹/۴۸	۱۵/۸۵۶	۱۱/۸۵۶	۱۳/۰۸۲۴	۲۱/۸۴۸	۱۶/۳۲۸	۰/۸۰۲۵



۸/۹۳۰۱۶	۱۹/۶۲۴	۱۵/۸۵۶	۱۲/۳۰۵۰۴	۲۷/۰۴	۲۱/۸۴۸	۱/۱۰۲۵	۴
۸/۳۸۰۳۲	۲۳/۱۶	۱۹/۶۲۴	۱۱/۵۴۶۶۴	۳۱/۹۱۲	۲۷/۰۴	۱/۴۰۲۵	۵
۷/۸۳۰۴۸	۲۶/۴۶۴	۲۳/۱۶	۱۰/۷۸۸۲۴	۳۶/۴۶۴	۳۱/۹۱۲	۱/۷۰۲۵	۶
۷/۲۸۰۶۴	۲۹/۵۳۶	۲۶/۴۶۴	۱۰/۰۲۹۸۴	۴۰/۶۹۶	۳۶/۴۶۴	۲/۰۰۲۵	۷
۶/۷۱۱۸۴	۳۲/۳۶۸	۲۹/۵۳۶	۹/۲۵۲۴۸	۴۴/۶	۴۰/۶۹۶	۲/۳۰۲۵	۸
۶/۱۸۰۹۶	۳۴/۹۷۶	۳۲/۳۶۸	۸/۴۹۴۰۸	۴۸/۱۸۴	۴۴/۶	۲/۶۰۲۵	۹
۵/۶۱۲۱۶	۳۷/۳۴۴	۳۴/۹۷۶	۷/۷۳۵۶۸	۵۱/۴۴۸	۴۸/۱۸۴	۲/۹۰۲۵	۱۰
۵/۰۶۲۳۲	۳۹/۴۸	۳۷/۳۴۴	۶/۹۷۷۲۸	۵۴/۳۹۲	۵۱/۴۴۸	۳/۲۰۲۵	۱۱
۴/۵۱۲۴۸	۴۱/۳۸۴	۳۹/۴۸	۶/۲۱۸۸۸	۵۷/۰۱۶	۵۴/۳۹۲	۳/۵۰۲۵	۱۲
۳/۹۶۲۶۴	۴۳/۰۵۶	۴۱/۳۸۴	۵/۴۶۰۴۸	۵۹/۳۲	۵۷/۰۱۶	۳/۸۰۲۵	۱۳
۳/۲۹۳۸۴	۴۴/۴۸۸	۴۳/۰۵۶	۴/۶۸۳۱۲	۶۱/۲۹۶	۵۹/۳۲	۴/۱۰۲۵	۱۴
۲/۸۶۲۹۶	۴۵/۶۹۶	۴۴/۴۸۸	۳/۹۲۴۷۲	۶۲/۹۵۲	۶۱/۲۹۶	۴/۴۰۲۵	۱۵
۲/۲۹۴۱۶	۴۶/۶۶۴	۴۵/۶۹۶	۳/۱۶۶۳۲	۶۴/۲۸۸	۶۲/۹۵۲	۴/۷۰۲۵	۱۶
۱/۷۴۴۳۲	۴۷/۴	۴۶/۶۶۴	۲/۴۰۷۹۲	۶۵/۳۰۴	۶۴/۲۸۸	۵/۰۰۲۵	۱۷
۱/۱۹۴۴۸	۴۷/۹۰۴	۴۷/۴	۱/۶۴۹۵۲	۶۶	۶۵/۳۰۴	۵/۳۰۲۵	۱۸
۰/۶۴۴۶۴	۴۸/۱۷۶	۴۷/۹۰۴	۰/۸۹۱۱۲	۶۶/۳۷۶	۶۶	۵/۶۰۲۵	۱۹
۰/۱۱۳۷۶	۴۸/۲۲۴	۴۸/۱۷۶	۰/۱۵۱۶۸	۶۶/۴۴	۶۶/۳۷۶	۵/۹۰۲۵	۲۰
-	-	۴۸/۲۲۴	-	-	۶۶/۴۴	۶/۱۰۰	۲۱ (وسط تیر)
MAX $V_{h,ASD} = ۱۰/۵۸$ KN			MAX $V_{h,LRFD} = ۱۴/۶۰$ KN			MAX $V_{h,LRFD}$ MAX $V_{h,ASD}$	

پس از کنترل کمانش ستون جان و محاسبات مربوط به محاسبه نیروی برشی افقی (V_h) در مقطع کلی، در گام بعدی به محاسبه نیروی لنگر خمشی مورد نیاز ناشی از کمانش ستون جان در سپری بالا و پایین ($M_{h(top)}$ و $M_{h(bot)}$) مطابق جدول زیر در هر کدام از حالات LRFD و ASD می‌پردازیم:

جدول ۲۱- لنگر خمشی ناشی از کمانش در اثر برش افقی

محاسبه نیروی لنگر خمشی مورد نیاز ناشی از کمانش ستون جان در سپری بالا و پایین در حالت‌های LRFD و ASD	
ASD	LRFD
$M_{h,ASD(top)} = V_{h,ASD} \times h_{top} \cdots M_{h,ASD(bot)} = V_{h,ASD} \times h_{bot} \cdots$	$M_{h,LRFD(top)} = V_{h,LRFD} \times h_{top} \cdots M_{h,LRFD(bot)} = V_{h,LRFD} \times h_{bot}$
$h_{top} = h_{bot} = \frac{h_0}{2} = \frac{0/3 \text{ m}}{2} = 0/15 \text{ m}$	
$M_{h,ASD(top)} = M_{h,ASD(bot)} = V_{h,ASD} \times h_{top} = V_{h,ASD} \times h_{bot}$	$M_{h,LRFD(top)} = M_{h,LRFD(bot)} = V_{h,LRFD} \times h_{top} = V_{h,LRFD} \times h_{bot}$
$M_{h,ASD(top)} = M_{h,ASD(bot)} = ۱۰/۵۸ \text{ (KN)} \times ۰/۱۵ \text{ (m)} = ۱/۵۸۷ \text{ (KN.m)}$	$M_{h,LRFD(top)} = M_{h,LRFD(bot)} = 14/60 \text{ (KN)} \times 0/15 \text{ (m)} = 2/19 \text{ (KN.m)}$
$M_{h,ASD(top)} = M_{h,ASD(bot)} = ۱/۵۸۷ \text{ (KN.m)}$	$M_{h,LRFD(top)} = M_{h,LRFD(bot)} = 2/19 \text{ (KN.m)}$

پس از محاسبات مربوط به لنگر خمشی مورد نیاز ناشی از کمانش ستون جان در سپری بالا و پایین، در گام بعدی مطابق روند جدول زیر مقاومت خمشی طراحی ستون جان محاسبه می‌کنیم:

محاسبه نیروی لنگر خمشی طراحی ستون جان
$M_p = 0/25 t_w (e + 2b)^2 F_y$
$M_p = 0/25 \times 7/10 \times (75 + 2 \times 90)^2 \times 240 = 27/70 \text{ (KN/m)}$
$M_p = 27/70 \text{ (KN/m)}$
چون که مقدار $\frac{e}{t_w} = \frac{75}{7/10} = 10/564$ می‌باشد، برای محاسبه لنگر بصورت زیر عمل می‌کنیم:
طبق روابط موجود، برای نسبت $\frac{e}{t_w} = 10$ و زاویه $\phi = 60^\circ$ خواهیم داشت:
$\frac{M_{ocr}}{M_p} = 0/587 (0/917)^{\frac{2h}{e}} \leq 0/493$



$\frac{M_{ocr}}{M_p} = 0/587(0/917)^{\frac{2 \times 150}{75}} = 0/415 \leq 0/493$ $\frac{M_{ocr}}{M_p} = 0/415 \leq 0/493$ Ok
طبق روابط موجود، برای نسبت $\frac{e}{t_w} = 20$ و زاویه $\theta = 60^\circ$ خواهیم داشت: $\frac{M_{ocr}}{M_p} = 1/96(0/699)^{\frac{2h}{e}}$ $\frac{M_{ocr}}{M_p} = 1/96(0/699)^{\frac{2 \times 150}{75}} = 0/468 > 0/415$ $\frac{M_{ocr}}{M_p} = 0/468 > 0/415$ Ok
با درونیابی خطی برای مقدار $\frac{e}{t_w} = \frac{75}{10} = 10/564$ خواهیم داشت: $\frac{M_{ocr}}{M_p} = 0/4173$

با توجه به مقدار و مقادیر ضرایب مقاومت در حالت LRFD و ASD، مقدار لنگر خمشی طراحی را مطابق جدول زیر محاسبه می‌کنیم:

جدول ۲۲- لنگر خمشی طراحی ناشی از برش افقی

محاسبه‌ی لنگر خمشی طراحی در حالت‌های LRFD و ASD	
LRFD	ASD
$\phi_b M_n = \phi_b \left(\frac{M_{ocr}}{M_p} \right) M_p \geq M_{h,ASD}$	$\frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{M_p}{\Omega_b} \left(\frac{M_{ocr}}{M_p} \right) \geq M_{h,LRFD}$
$\phi_b M_n = 0/9 \times (0/4173)(27/70) = 10/40 \text{ (KN.m)} \geq 2/73 \text{ (KN.m)}$	$M_n = \frac{27/70}{1/67} \times (0/4173) = 6/92 \text{ (KN.m)} \geq 2/73 \text{ (KN.m)}$
$\phi_b M_n = 10/40 \text{ (KN.m)} \geq 2/73 \text{ (KN.m)}$	$\frac{M_n}{\Omega_b} = 6/92 \text{ (KN.m)} \geq 1/587 \text{ (KN.m)}$
$M_{h,ASD} / \phi_b M_n = \frac{2/73}{10/40} = 0/23 < 1$	$\Omega_b M_{h,ASD} / M_n = \frac{1/587}{6/92} = 0/23 < 1$
Ok	Ok

پس از کنترل‌های مربوط به لنگر خمشی، در مراحل بعدی به کنترل برش‌های مربوطه در تیر لانه‌زنبوری خواهیم پرداخت. پس از کنترل مقدار لنگر خمشی در ستون جان، در گام بعدی به سراغ کنترل برش افقی خواهیم رفت. برای این منظور به ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

جدول ۲۳- کنترل برش افقی

کنترل برشی افقی در ستون جان	
$V_n = 0/6F_y(A_w = e t_w)$	
LRFD	ASD
$\phi_v V_{n-horiz} \geq \text{MAX } V_{h,LRFD} / V_n = 0/6F_y(A_w = e t_w)$	$\frac{V_{n-horiz}}{\Omega_v} \geq \text{MAX } V_{h,ASD} / V_n = 0/6F_y(A_w = e t_w)$
$\phi_v V_{n-horiz} = 0/6F_y(A_w = e t_w) \geq \text{MAX } V_{h,LRFD}$	$\frac{V_{n-horiz}}{\Omega_v} = 0/6F_y(A_w = e t_w) \geq \text{MAX } V_{h,ASD}$
$\phi_v V_{n-horiz} = 1 \times 0/6 \times 240 \times 75 \times 7/10 = 76/68 \text{ (KN)}$ $\geq 18/21 \text{ (KN)}$	$\frac{V_{n-horiz}}{\Omega_v} = \frac{0/6 \times 240 \times 75 \times 7/10}{1/5} = 51/12 \text{ (KN)}$ $\geq 13/12 \text{ (KN)}$
$\phi_v V_{n-horiz} = 76/68 \text{ (KN)} \geq 18/21 \text{ (KN)}$	$\frac{V_{n-horiz}}{\Omega_v} = 51/12 \text{ (KN)} \geq 13/12 \text{ (KN)}$
Ok	Ok



پس از کنترل برش افقی ، در گام بعدی به سراغ کنترل برش عمودی در مقطع خالص می‌رویم. برای این منظور به ترتیب زیر عمل می‌کنیم (مطابق جدول زیر):

جدول ۲۴- روابط مربوط به محاسبه‌ی برش عمودی در سطح مقطع خالص سپری‌ها

مقاومت برش عمودی اسمی در مقطع خالص
برای مقطع سپری، مقدار $k_v = 1/20$ می‌باشد.
کنترل مقدار $\frac{h}{t_w}$
$\frac{h}{t_w} = \frac{d_t}{t_w} = \frac{75}{7/10} = 10/56 \leq 1/10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 1/10 \sqrt{\frac{1/20 \times 2 \times 10^5}{240}} = 34/78$ $\frac{h}{t_w} = \frac{d_t}{t_w} = 10/56 \leq 1/10 \sqrt{\frac{1/20 \times 2 \times 10^5}{240}} = 34/78$ $10/56 \leq 34/78$
اگر
$\frac{h}{t_w} \leq 1/10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$ باشد، آنگاه $C_{v2} = 1/0$ می‌باشد.
برای محاسبه‌ی ضریب مقاومت برشی در سطح مقطع خالص، اگر
$\frac{h}{t_w} \leq 2/24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 64/65$ باشد، آنگاه $\Omega_v = 1/5$ و $\phi_v = 1/0$ می‌باشد.
مقاومت برشی اسمی در مقطع خالص سپری بالا (در مقطع خالص) تیر لانه‌زنبوری بصورت زیر محاسبه می‌شود:
$V_n = 0/6 F_y (d_{t-top} + d_{t-bot}) t_w C_{v2} / d_{t-top} = d_{t-bot} = d_t = 0/075m$ $V_n = 0/6 \times 240 \times (75 + 75) \times 7/10 \times 1$

پس از محاسبات مربوط به مقاومت برشی عمودی اسمی (مقطع خالص)، مطابق جدول زیر مقدار مقاومت برشی عمودی طراحی در حالت‌های LRFD و ASD را محاسبه می‌کنیم:

جدول ۲۵- کنترل برش عمودی در مقطع خالص سپری‌ها

کنترل برش عمودی در مقطع خالص
$V_n = 0/6 F_y (A_w = e t_w)$
V_{r1} : برش وارد بر سوراخ شماره‌ی ۱ در تیر لانه‌زنبوری (مقطع خالص)
LRFD
$\phi_v V_{n.net} \geq V_{r1} / V_n = \phi_v F_y (A_w = e t_w) / V_n$ $= \phi_v F_y (d_{t-top} + d_{t-bot}) t_w C_{v2} / d_{t-top}$ $= d_{t-bot} = d_t$
$\phi_v V_n = 1 \times 0/6 \times 240 \times (75 + 75) \times 7/10 \times 1 = 153/36 \text{ (KN)}$ $\geq 26/33 \text{ (KN)}$
$\phi_v V_n = 153/36 \text{ (KN)} \geq 26/33$
Ok
ASD
$\frac{V_{n.net}}{\Omega_v} \geq V_{r1} / V_n = 0/6 F_y (A_w = e t_w) / V_n$ $= 0/6 F_y (d_{t-top} + d_{t-bot}) t_w C_{v2} / d_{t-top} = d_{t-bot} = d_t$
$\frac{V_{n.net}}{\Omega_v} = \frac{0/6 \times 240 \times (75 + 75) \times 7/10 \times 1}{1/5} = 102/24 \text{ (KN)}$ $\geq 19/11 \text{ (KN)}$
$\frac{V_{n.net}}{\Omega_v} = 102/24 \text{ (KN)} \geq 19/11$
Ok

پس از کنترل برش عمودی در مقطع خالص در مرحله‌ی قبل، در گام بعدی سراغ کنترل برش عمودی در مقطع ناخالص خواهیم رفت. برای این منظور به ترتیب روند جدول زیر عمل می‌کنیم:

جدول ۲۶- روابط مربوط به محاسبه‌ی برش عمودی در سطح مقطع ناخالص سپری‌ها

برش عمودی اسمی در مقطع ناخالص
برای مقطع IPE300، مقدار $k_v = 5/34$ می‌باشد.



برای مقطع IPE300، مقدار $k_{top} = k_{bot} = k$ برابر با ۲۶ میلی متر می باشد. $k_{top} = k_{bot} = k$: فاصله ی انتهای قسمت گردی یا ماهیچه ای تا بال پایینی و پایینی
کنترل مقدار $\frac{h}{t_w}$ $\frac{h}{t_w} = \frac{d_g - k_{top} - k_{bot}}{t_w} = \frac{450 - 26 - 26}{7/10} = \frac{398}{7/10} = 56/06 \leq 1/10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 1/10 \sqrt{\frac{5/34 \times 2 \times 10^5}{240}} = 73/38$ $\frac{h}{t_w} = 56/06 \leq 1/10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 73/38$ $56/06 \leq 73/38$
اگر $C_{v1} = 1/0 \text{ باشد، آنگاه } \frac{h}{t_w} \leq 1/10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$
برای محاسبه ی ضریب مقاومت برشی در سطح مقطع ناخالص، اگر $\frac{h}{t_w} \leq 2/24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 64/65 \text{ باشد، آنگاه } \Omega_v = 1/5 \text{ و } \phi_v = 1/0 \text{ می باشد.}$
مقاومت برشی اسمی در مقطع ناخالص سپری بالا (در مقطع خالص) تیر لانه زنبوری بصورت زیر محاسبه می شود: $V_n = 0/6 F_y (d_g) t_w C_{v1} / d_g = 0/450 m$ $V_n = 0/6 \times 240 \times (450) \times 7/10 \times 1$

پس از مقاومت برشی عمودی اسمی (مقطع ناخالص)، مقدار مقاومت برشی عمودی طراحی در حالت های LRFD و ASD را محاسبه می کنیم (جدول زیر):

جدول ۲۷- کنترل برشی عمودی در مقطع ناخالص سپری ها

کنترل برش عمودی در مقطع ناخالص	
$V_n = 0.6 F_y (A_w = e t_w)$ V_{r1} : برش وارد بر سوراخ شماره ی ۱ در تیر لانه زنبوری (مقطع ناخالص)	
LRFD	ASD
$\phi_v V_{n,net} \geq V_{r1} \cdot V_n = \phi_v F_y (A_w = e t_w) / V_n = \phi_v F_y (d_g) t_w C_{v1} / d_g$ $= \phi_v / 450 m$	$\frac{V_{n,net}}{\Omega_v} \geq V_{r1} \cdot V_n = 0/6 F_y (A_w = e t_w) / V_n = 0/6 F_y (d_g) t_w C_{v1} / d_g$ $= 0/450 m$
$\phi_v V_n = 1 \times \phi_v / 6 \times 240 \times (450) \times 7/10 \times 1 = 460 / 0.8 (KN)$ $\geq 27/23 (KN)$	$\frac{V_{n,net}}{\Omega_v} = \frac{0/6 \times 240 \times (450) \times 7/10 \times 1}{1/5} = 306/72 (KN)$ $\geq 19/76 (KN)$
$\phi_v V_n = 460 / 0.8 (KN) \geq 27/23 (KN)$	$\frac{V_{n,net}}{\Omega_v} = 306/72 (KN) \geq 15/288 (KN)$
Ok	Ok

پس از کنترل برش افقی و عمودی (مقطع خالص و مقطع ناخالص)، نتایج بدست آمده را در جدول زیر خلاصه می کنیم:

جدول ۲۸- جمع بندی کنترل همه ی حالات مربوط به نیروی برشی

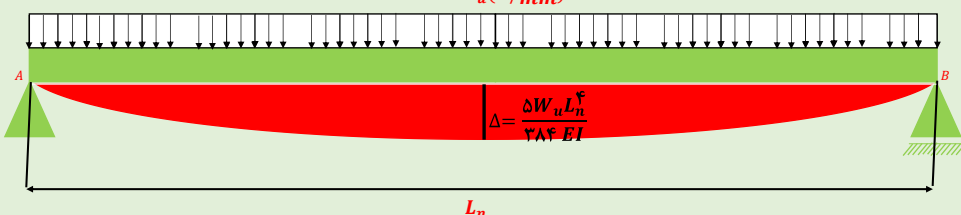
کنترل مقاومت برش عمودی طراحی در مقطع خالص، کنترل مقاومت برش عمودی طراحی در مقطع ناخالص و کنترل مقاومت برش افقی طراحی	
LRFD	ASD
برش افقی	
$\frac{MAX V_{h,LRFD}}{\phi_v V_{n-horiz}} = \phi_v / 19 < 1 \rightarrow ok$	$\frac{\Omega_v \times MAX V_{h,ASD}}{V_{n-horiz}} = 0/2069 < 1 \rightarrow ok$
برش عمودی در مقطع خالص	



$\frac{V_u}{\phi_v V_{n-net}} = 0.137 < 1 \rightarrow \text{ok}$	$\frac{\Omega_v \times V_u}{V_{n-net}} = 0/15 < 1 \rightarrow \text{ok}$
برش عمودی در مقطع ناخالص	
$\frac{V_u}{\phi_v V_{n-g}} = 0.45 < 1 \rightarrow \text{ok}$	$\frac{\Omega_v \times V_u}{V_{n-g}} = 0/050 < 1 \rightarrow \text{ok}$

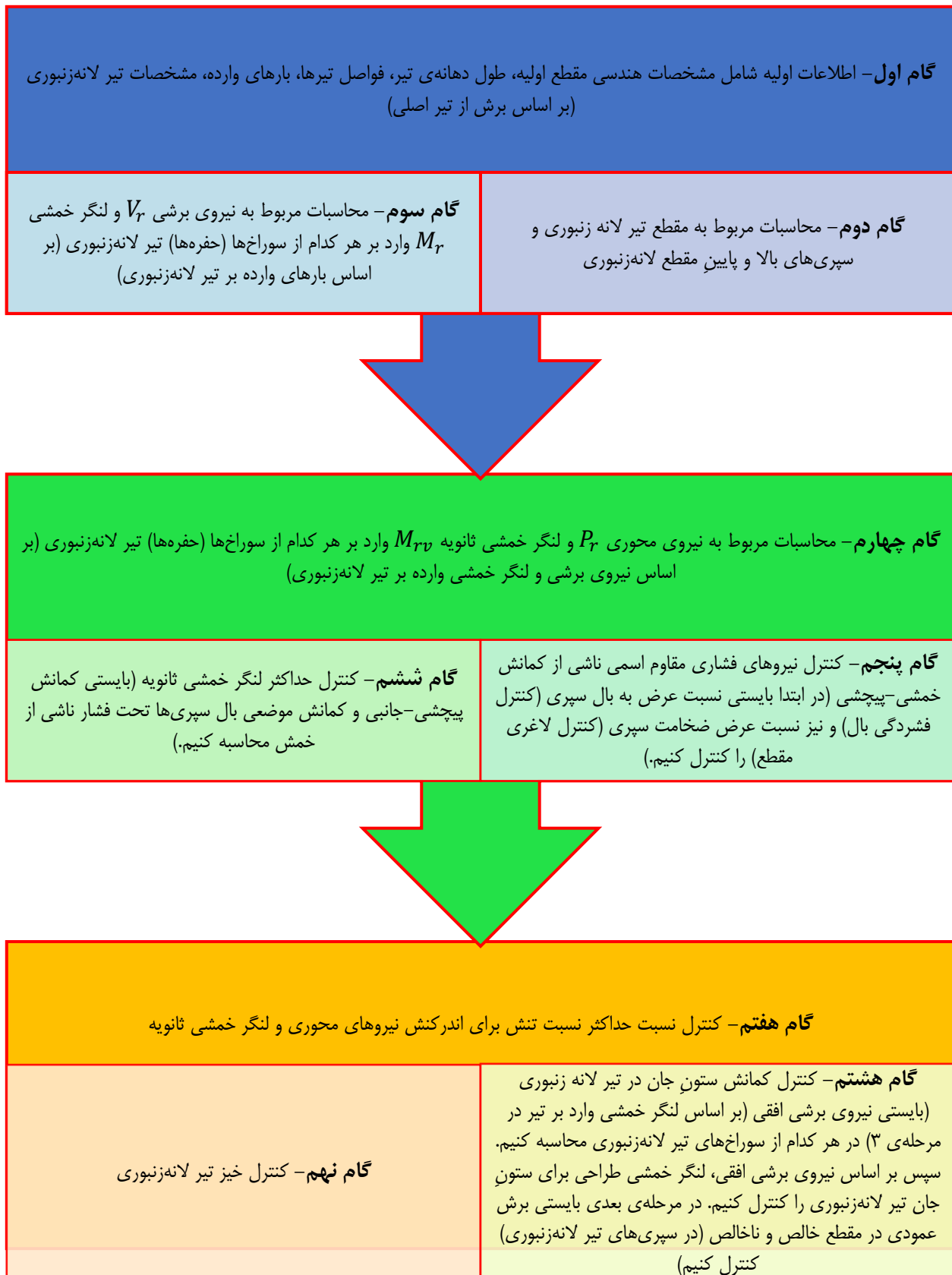
و در گام نهایی، تغییرمکان (خیز) تیر لانه زنبوری برای بار زنده و برای مجموع بار مرده و زنده مطابق جدول زیر محاسبه می کنیم:

جدول ۲۹- کنترل خیز مربوط به تیر لانه زنبوری

کنترل تغییرمکان (خیز) تیر لانه زنبوری برای بار زنده، بار مرده و مجموع بار مرده و زنده) تغییر شکل تیر دو سر ساده در وسط دهانه تحت بار W_u بصورت $\frac{5W_u L_n^4}{384 EI}$ می باشد.  همچنین ممان اینرسی جهت محاسبه ی تغییر شکل تیر، برابر با ۹۰ درصد ممان اینرسی مقطع کل تیر لانه زنبوری است (در پیوست میحث ۱۰ نیز به این مورد اشاره شده است).
کنترل خیز بار زنده $\Delta_{LL} = \frac{5W_u L_n^4}{384 EI_{x-net}} < \frac{L_n}{240}$ $I_{x-net} = 0.9 I_{x-g} = 0.9 \times (2.015 \times 10^8) = 1.814 \times 10^8 (\text{mm}^4)$ $W_u = W_{u-LL} = 1152 (\text{N/m}), L_n = 12/2 \text{ m}, E = 2 \times 10^5 (\text{MPa})$ $\Delta_{LL} = \frac{5 \times 1152 (\text{N/mm}) \times (12200)^4}{384 \times 2 \times 10^5 (\text{MPa}) \times 1.814 \times 10^8 (\text{mm}^4)} \approx 9/6 \text{ mm} < \frac{L_n}{240} = \frac{12200}{240} = 50/83 \text{ mm}$ $\Delta_{LL} \approx 9/6 \text{ mm} < \frac{L_n}{240} = 50/83 \text{ mm} \rightarrow \text{Ok}$
خیز بار مرده $\Delta_{DL} = \frac{5W_u L_n^4}{384 EI_{x-net}}$ $I_{x-net} = 0.9 I_{x-g} = 0.9 \times (2.015 \times 10^8) = 1.814 \times 10^8 (\text{mm}^4)$ $W_u = W_{u-DL} = 1440 (\text{N/m}), L_n = \frac{12}{2} \text{ m}, E = 2 \times 10^5 (\text{MPa})$ $\Delta_{DL} = \frac{5 \times 1440 (\text{N/mm}) \times (12200)^4}{384 \times 2 \times 10^5 (\text{MPa}) \times 1.814 \times 10^8 (\text{mm}^4)} \approx 12 \text{ mm}$ چون خیز تحت بار مرده زیاد می باشد، قبل از ساخت به میزان حداقل ۳۰ میلی متر پیش خیز در نظر گرفته می شود.
کنترل خیز مجموع بار مرده و زنده $\Delta_{total} = \Delta_{DL} + \Delta_{LL} < \frac{L_n}{180}$ $\Delta_{total} = 9/6 + 12 = 21/6 \text{ mm} < \frac{L_n}{180} = \frac{12200}{180} = 67/78 \text{ mm} \rightarrow \text{Ok}$ چنانچه مقطع تیر لانه زنبوری مورد بحث در این مثال، جوابگوی خیزهای محاسبه شده نبود؛ می بایست مقطع تیر لانه زنبوری را تغییر بدهیم (در آن صورت باید تمامی مراحل از ابتدا تکرار شوند).



مراحل مختلف طی شده در این مثال، بصورت خلاصه در ادامه توضیح داده شده است.





۱۱ نحوه ساخت و استفاده از مقطع لانه زنبوری در نرم افزار ایتبس

- پیش از اینکه به نحوه مدل سازی تیرهای لانه زنبوری در نرم افزار ETABS بپردازیم، لازم است نکاتی را در مورد این تیرهای لانه زنبوری یادآوری کنیم:
- ۱- تیرهای لانه زنبوری از نظر مشخصات هندسی مقطع کاملاً مشابه تیرهای I شکل پایه‌ی (اولیه) خود هستند و فقط اندازه ارتفاع مقطع تیر لانه زنبوری ۱/۵ برابر تیر اولیه می‌باشد. به عنوان مثال ابعاد هندسی مقطع تیر لانه زنبوری CPE ۱۸۰ همان ابعاد تیر پایه خود (یعنی IPE ۱۸۰) را دارد و فقط ارتفاع آن ۱/۵ برابر (معادل ۲۷۰ mm) تیر اولیه می‌باشد.
 - ۲- مبحث دهم مقررات ملی ساختمان استفاده از تیرهای لانه زنبوری که در قاب‌های خمشی و دهانه‌های مهاربندی شده را ممنوع اعلام کرده است.
 - ۳- مهندسین طراح برای استفاده حداکثری از پتانسیل تیرهای لانه زنبوری (ظرفیت خمشی بالاتر نسبت به تیر I شکل اولیه)، از این تیرها به عنوان تیرهای فرعی در اتصالات تیر به تیر، تیرچه در سقف‌های کامپوزیت معمولی و عرشه فولادی، گاه‌ها به عنوان شمشیری پله و ... استفاده می‌کنند (به عنوان تیرهایی استفاده می‌شود که آن تیرها دارای اتصال دو سر مفصل بوده و صرفاً تحت بار ثقلی قرار دارند).
 - ۴- نرم افزار ETABS برای تیرهای لانه زنبوری تعریف شده در این نرم افزار، فقط قادر به طراحی اولیه آن‌هاست و سایر مراحل طراحی (مانند تعیین ابعاد ورق پرکننده سوراخ‌ها) و کنترل‌های سازه‌ای دیگر (نظیر کنترل برش افقی مقطع، خیز و کماتش موضعی تیر) بایستی توسط مهندس محاسب و به صورت دستی انجام گیرد.
 - ۵- استفاده از مقاطع لانه زنبوری به صورت دابل یا سوبل با توجه به نکات اجرایی و ضوابط طراحی حاکم بر این تیرها، منطقی به نظر نمی‌رسد.
- مسئله مدل سازی تیرهای لانه زنبوری در نرم افزار ETABS محل اختلاف بسیاری از مهندسین محاسب می‌باشد. هر یک از مهندسین بنا به دلایل علمی و اجرایی، روش مدل سازی خود را بر سایر روش‌ها ارجح می‌دانند. با لحاظ کردن استدلال‌های مختلف ارائه شده توسط آن‌ها، می‌توان مدل سازی تیرهای لانه زنبوری در نرم افزار ETABS را به سه روش کلی دسته‌بندی کرد:
- ۱- مدل سازی تیر لانه زنبوری به صورت یک تیرورق I شکل با جان پر
 - ۲- مدل سازی تیر لانه زنبوری به صورت دو مقطع سپری متقارن در محیط Section Designer (SD)
 - ۳- مدل سازی تیر لانه زنبوری با استفاده از گزینه‌ی تعریف مقاطع غیر منشوری (Nonprismatic)
- از ظاهر این روش‌ها این چنین بر می‌آید که روش اول نسبت به روش‌های دیگر بسیار آسان و سریع‌تر است و روش سوم با صرف وقت نسبتاً زیاد، مدل بسیار دقیق‌تری از تیر لانه زنبوری را ارائه خواهد کرد.
- برای پروژه‌های رایج ساختمانی، استفاده از کدام روش از نظر صرفه جویی در زمان مدل سازی، اقتصاد و ایمنی بیشترین صرفه‌ی اقتصادی را دارد؟ برای یافتن پاسخ این پرسش، شما را با نحوه استفاده از هر یک از روش‌ها را تشریح و به بیان معایب و مزایای آن‌ها در مقایسه با یکدیگر خواهیم پرداخت. در نهایت در قالب یک جمع‌بندی کوتاه بهترین روش ممکن برای مدل سازی تیر لانه زنبوری در نرم افزار را معرفی خواهیم نمود.

۱- مدل سازی تیر لانه زنبوری به صورت یک تیرورق I شکل با جان پر

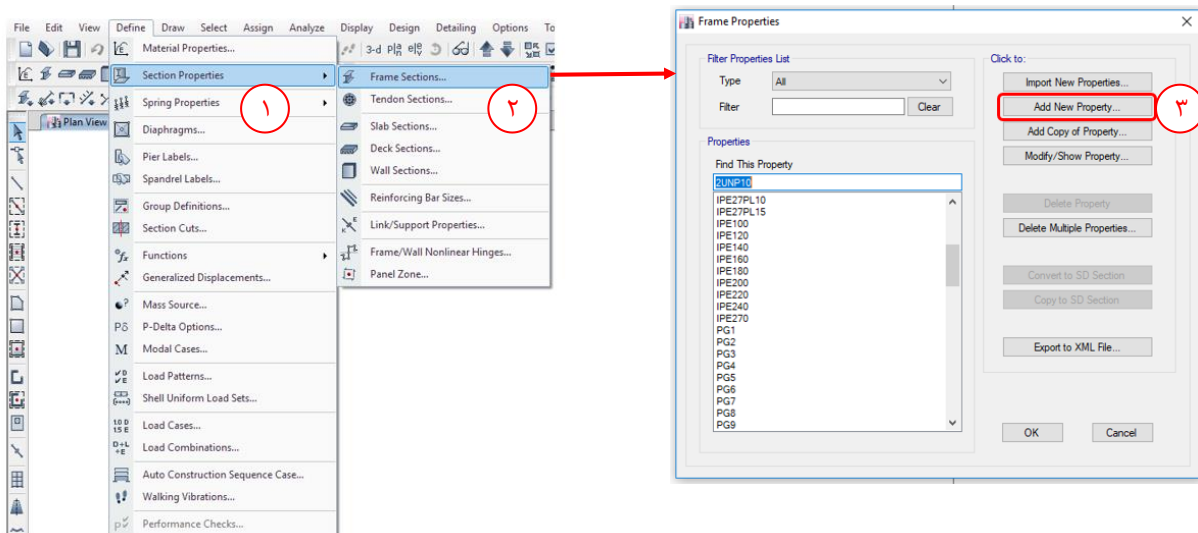
۲- مدل سازی تیر لانه زنبوری به صورت دو مقطع سپری متقارن در محیط Section Designer (SD)

۳- مدل سازی تیر لانه زنبوری با استفاده از گزینه‌ی تعریف مقاطع غیر منشوری (Nonprismatic)



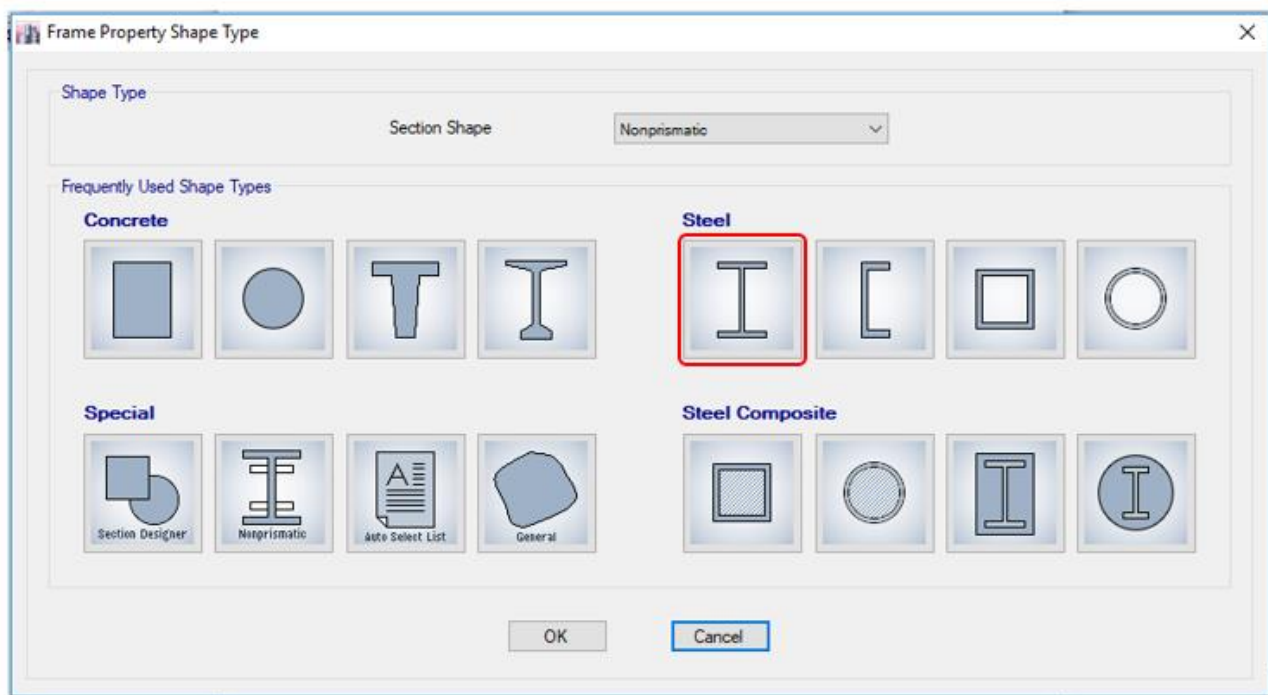
۱.۱۱ روش اول

مهندسانی که از این روش برای مدل سازی تیر لانه زنبوری استفاده می کنند، با این استدلال که نرم افزار ETABS قادر به انجام طراحی و کنترل هایی همچون تعیین ابعاد ورق پرکننده سوراخ ها (برای تقویت تیرهای لانه زنبوری)، کنترل برش افقی و ... برای تیرهای لانه زنبوری نمی باشد، و از طرفی به دلیل دو سر مفصل بودن اتصال این تیرها به سازه، در باربری لرزه ای سازه دخالتی ندارند (صرفاً تحت بارهای ثقلی اند، و به همین دلیل در قاب های خمشی و دهانه های مهاربندی شده کاربرد ندارند)؛ لذا عملکرد این تیرها را مانند یک تیورق I شکل با جان پر (همان تیر پایه با ارتفاع ۱/۵ برابر شده) در نظر می گیرند. به عنوان مثال فرض کنید برای تیرچه های یک پانل از سقف کامپوزیت قرار است از CPE ۱۸۰ که ارتفاع مقطع آن برابر ۲۷۰ mm می باشد، استفاده شود. برای مدل سازی مقطع CPE ۱۸۰ در نرم افزار ETABS بایستی مسیر زیر را پیمود:



شکل ۲۰- اضافه کردن مقطع جدید به ایتبس

با کلیک بر روی گزینه مشخص شده، پنجره ای به صورت زیر ظاهر می شود:



شکل ۲۱- انتخاب مقطع پایه برای زنبوری

در پنجره ظاهر شده با انتخاب مقطع I شکل، وارد صفحه تعریف مشخصات هندسی مقطع می‌شویم و برای تعریف مقطع CPE180 می‌توانیم به صورت زیر عمل کنیم:

شکل ۲۲- وارد کردن ارتفاع و مشخصات مقطع لانه‌زنبوری به جای مقطع I شکل

همانطور که در تصویر بالا نیز مشاهده می‌کنیم، تیر CPE180 همانند یک تیروورق I شکل با جان پر که ارتفاع آن ۲۷۰ میلی‌متر و سایر مشخصات ابعادی مقطع مانند تیر IPE180 که از جدول اشتال برداشت می‌کنیم، در نرم‌افزار وارد می‌کنیم.

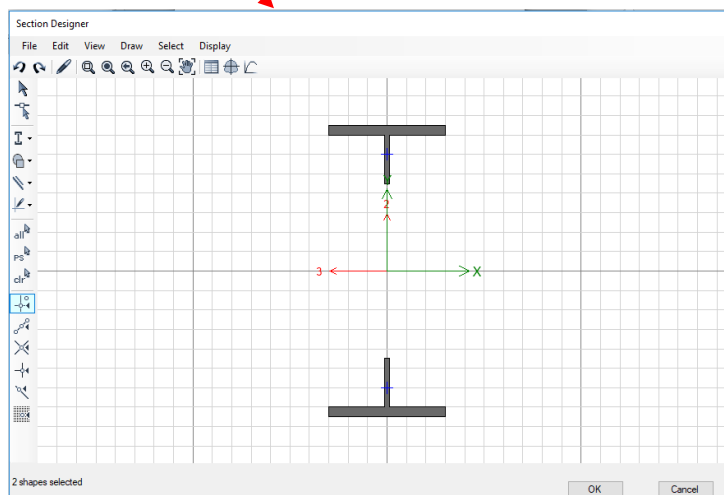
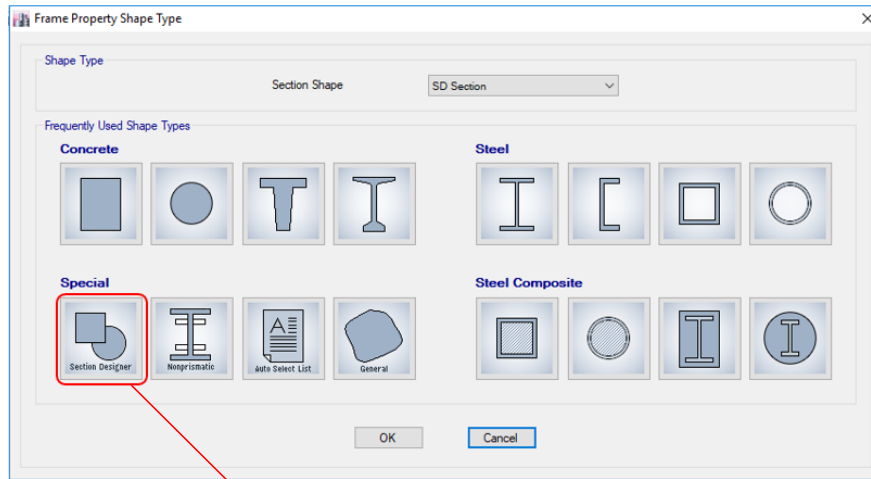
پس از تعریف همه مقاطع لانه‌زنبوری مورد نیاز پروژه در نرم‌افزار ETABS، این مقاطع به المان‌های مورد نظر اختصاص می‌دهیم (سربرگ Assign) و سپس آنالیز و طراحی سازه طبق روال معمول خود انجام می‌دهیم. پس از اینکه مقاطع تیرهای لانه‌زنبوری اختصاص داده شده به المان‌ها نهایی کردیم، نوبت به طراحی‌های ثانویه اعم از تعیین ابعاد ورق پرکننده سوراخ‌ها تحت برش قائم در مجاورت تکیه‌گاه‌ها، کنترل برش ثانویه در سوراخ‌ها و ... می‌رسد که تمام این محاسبات و کنترل‌ها توسط مهندس محاسب و به صورت دستی (مانند مثال ارائه شده در این مقاله) انجام می‌دهیم.

۲.۱۱ روش دوم

بیشتر مراحل این روش مشابه مراحل طی شده در روش اول می‌باشد. با این تفاوت که برای ساخت مقطع به صورت جفت سپری متقارن، به جای انتخاب مقطع I شکل در پنجره‌ی زیر، باید به محیط Section Designer وارد بشویم و مقطع مورد نظر را طبق اندازه‌های محاسبه شده، می‌سازیم.



پیش از آن که به ساخت مقطع جفت سپری متقارن در محیط SD بپردازیم، بایستی ابعاد سپری و فاصله آن‌ها از یکدیگر را از طریق جدول اشتال (CPE) و براساس مشخصات مقطع تیری (تیر لانه‌زنبوری) که قصد مدل‌سازی آن را داریم، تعیین می‌کنیم. پس از پیمودن این مراحل و تعیین مشخصات سپری‌ها، در محیط SD اقدام به ساختن مقطع مورد نظر می‌کنیم که نمونه‌ای از آن را در تصویر زیر مشاهده می‌کنیم.



شکل ۲۳- ساخت مقطع لانه‌زنبوری با دو سپری با مشخصات ابعادی مشابه مقطع لانه‌زنبوری در SD

با استفاده از این روش، در واقع یک تیر I شکل با جان سراسر باز مدل می‌کنیم، که مسلماً از واقعیت فاصله دارد و طراحی را دست‌بالا^۱ می‌کند. با توجه به وقتگیر بودن محاسبات ابعاد و فاصله سپری‌ها و نیز با علم بر اینکه وجود یا عدم وجود جان در مقطع تعریف شده برای تیر لانه‌زنبوری، خطای بسیار ناچیزی (در حدود ۴ درصد) در محاسبات ممان اینرسی مقطع حول قوی و ضعیف ایجاد می‌کند، استفاده از روش اول برای مدل‌سازی تیر لانه‌زنبوری در ETABS معقول‌تر است.

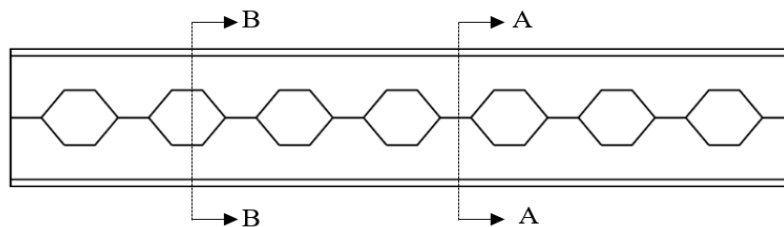
^۱ Over Design

۳.۱۱ روش سوم

شاید با دیدن کلمه «مقاطع غیرمنشوری» ذهنتان به سمت قاب‌های مورد استفاده در سوله‌ها که دارای مقطع متغیر در طول خود هستند، معطوف شود. ولی باید یادآوری کرد که علاوه بر تعریف المان‌های با مقطع متغیر در طول، می‌توانیم از گزینه Nonprismatic در نرم‌افزار ETABS برای تعریف مقاطعی که دارای خواص و ابعاد مختلف (مانند وجود سوراخ) در طول المان هستند، بهره ببریم.

این روش مدل‌سازی تیر لانه‌زنبوری را می‌توانیم ترکیبی از دو روش قبل دانست؛ به این صورت که برای مدل‌سازی تیر لانه‌زنبوری در این روش، لازم است دو مقطع مختلف (یکی با جان پر و دیگری با جان باز) برای تیر لانه‌زنبوری تعریف کنیم.

مقطع نوع اول مربوط به طولی از تیر لانه‌زنبوری که دارای جان پر است (Section A-A در شکل زیر) و برای تعریف این مقطع از روش اول (تعریف یک تیرورق I شکل با جان پر) و مقطع دوم شامل طولی از تیر لانه‌زنبوری که دارای سوراخ (فاقد جان) است (Section B-B)، از روش دوم (ساخت مقطع جفت سپری متقارن در محیط SD) استفاده می‌کنیم.



شکل ۲۴- دو مقطع از تیر لانه‌زنبوری با و بدون سوراخ

استفاده از این روش بیشترین نزدیکی را به واقعیت و دقت بسیار خوبی را داراست ولی بنا به چند دلیل، استفاده از این روش در بین مهندسين محاسب چندان رایج نشده است:

الف- همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد محاسبه ابعاد سپری و فاصله آن‌ها از یکدیگر بر اساس جدول اشتال، در صورتی که چند نوع مقطع مختلف لانه‌زنبوری برای یک پروژه تعریف شده باشد، کار خسته کننده‌ای بوده و امکان خطا در محاسبات را افزایش می‌دهد.

ب- ساخت مقاطع در محیط SD، به خصوص در صورت کثرت تعداد آن‌ها کاری وقت‌گیر بوده و علاوه بر آن مقاطع ترسیم شده در محیط SD در ورژن‌های جدید نرم‌افزار ETABS گاهی دچار مشکلاتی در محاسبه مشخصات هندسی مقطع می‌شود که حل آن نیز اندکی زمانبر است.

پ- مهم‌ترین دلیلی که استفاده از روش سوم را چندان باب میل مهندسين طراح نمی‌کند این است که مدل‌سازی دقیق تیر لانه‌زنبوری (مطابق روش سوم) اختلاف بسیار ناچیزی در مقایسه با روش اول (استفاده از تیرورق I شکل معادل) در حین آنالیز و طراحی در نرم‌افزار ETABS ایجاد می‌کند که به صرف وقت و انرژی مضاعف نمی‌ارزد.

از توضیحات فوق اینگونه برمی‌آید که ساخت تیر لانه‌زنبوری به روش مقطع غیرمنشوری (روش سوم)، با توجه به اینکه مراحل طراحی و کنترل این قبیل تیرها را طراح سازه به صورت دستی انجام می‌دهد، چندان معقول نیست.



۱۲ نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله در ارتباط با اصول اولیه‌ی مربوط به تیرهای با مقاطع لانه‌زنبوری بحث کردیم. در همین ارتباط، سعی کردیم در ابتدا تاریخچه‌ای از نحوه‌ی تولید مقاطع لانه‌زنبوری و هدف از تولید این مقاطع را بیان کنیم.

همان‌طور که توضیح دادیم، مقاطع لانه‌زنبوری در واقع همان مقاطع اولیه‌ای (مثلاً مقطع IPE) هستند که جان آن‌ها را به طریقه‌های مختلف و بر اساس طرح‌های هندسی مختلف (شش ضلعی، دایره‌ای و ...) برش داده‌ایم و ارتفاع مقطع‌شان افزایش داده‌ایم. افزایش ارتفاع موجود در مقاطع لانه‌زنبوری باعث افزایش مقاومت خمشی این تیرها در مقایسه با تیرهای اولیه‌شان می‌شود. همچنین ایجاد سوراخ (حفره) باعث ایجاد مشکلاتی در این مقاطع، بخاطر کمبود مقاومت برشی می‌شود (تیرهای با مقطع لانه‌زنبوری، مستعد انواع کماتش‌ها هستند).

به همین خاطر در آیین‌نامه‌هایی همچون مبحث دهم و آیین‌نامه‌ی طراحی تیرهای لانه‌زنبوری (AISC)، استفاده از این نوع تیرها را در سیستم‌های مختلف سازه‌ای ممنوع کرده‌اند. علیرغم این ممنوعیت‌ها توسط آیین‌نامه‌های مختلف، بنابه دلایل زیادی هنوز هم استفاده از تیرهای با مقطع لانه‌زنبوری رواج دارد.

به همین علت در این مقاله، یک مثال جامع از طراحی دستی یک تیر لانه‌زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی ارائه کردیم که مراحل مختلف طراحی این نوع تیرهای را با جزئیات بررسی کردیم. همچنین در ارتباط با انواع روش‌های مختلف مدل‌سازی این نوع تیرها در نرم‌افزار EATABS مطالب مهمی را ارائه کردیم.

پرسش و پاسخ

۱- نحوه‌ی تولید مقاطع لانه‌زنبوری از طریق برش در جان مقاطع اولیه، باعث چه می‌شود؟

پاسخ: مقاطع لانه‌زنبوری از طریق برش در جان مقاطع اصلی (مثل مقطع IPE) باعث افزایش ارتفاع مقاطع لانه‌زنبوری نسبت به مقاطع اولیه می‌شود. این افزایش ارتفاع، باعث افزایش ممان اینرسی مقاطع لانه‌زنبوری و افزایش مقاومت خمشی آن‌ها نسبت به مقاطع اصلی‌شان می‌شود. البته مقاطع لانه‌زنبوری به علت وجود سوراخ (حفره) در جان مقاطع‌شان، در برابر برش ضعف دارند.

۲- آیا طبق ضوابط آیین‌نامه‌ای، استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری در سیستم‌های سازه‌ای مختلف ممکن می‌باشد؟

پاسخ: خیر. استفاده از تیرهای با مقطع لانه‌زنبوری در سیستم‌های سازه‌ای نظیر قاب‌های خمشی و دهانه‌های مهاربندی شده ممنوع می‌باشد. البته با در نظر گرفتن تمهیداتی، می‌توانیم از مقاطع لانه‌زنبوری استفاده کنیم.

۳- طبق ضوابط آیین‌نامه‌ای برای طراحی مقاطع لانه‌زنبوری چه مواردی را بایستی کنترل کنیم؟

پاسخ: بایستی موارد زیر را در هنگام طراحی تیرهای با مقطع لانه‌زنبوری کنترل نماییم:
فشردگی و کماتش موضعی، مقاومت خمشی کلی تیر، خمش ثانویه در قسمت سپری، کماتش قسمت بدون بازشو در جان تیر لانه‌زنبوری، فشار یا کشش محوری، برش افقی، برش عمودی و کماتش جانبی-پیچشی.

منابع

۱. معرفی جامع تیر آهن لانه زنبوری آهن ملل
۲. راهنمای جامع طراحی ساختمان (۲) طراحی تیرهای لانه زنبوری و سلولی به روش LRFD و ASD، سبحانی، بهمن؛ اسماعیل‌زاده شهری، عفت
۳. [مبحث دهم مقررات ملی ساختمان](#)
۴. [استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم](#)
۵. «تعمیم اصول طراحی تیرهای با جان سوراخ‌دار به حالت لانه‌زنبوری»؛ عظیمی، حسن؛ حسین‌زاده، یوسف؛ دانشگاه تبریز
۶. «بررسی عددی رفتار تیرهای لانه‌زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی و دایره‌ای ساخته‌شده از تیر ورق»؛ یثربی، سید فرزاد؛ ولادی، هدایت؛ دانشگاه تبریز
۷. «سختی‌های موثر الاستیک سازه‌ای در تیرهای لانه زنبوری»؛ کهنه پوش، امید؛ شوکتی، حسین؛ دانشگاه ارومیه
۸. AISC Design Guide ۳۱: Castellated and Cellular Beam Design
۹. [AISC ۳۶۰.۲۲](#)



کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر برای شرکت مهندسی سبز سازه محفوظ می باشد و هرگونه کپی برداری، تقلید یا باز نشر غیرقانونی بوده و تحت پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

