



دانشکده فنی و مهندسی عمران

گروه سازه

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی عمران - سازه

عنوان

بررسی ضوابط طراحی تیرهای فولادی لانه زنبوری در روش حالات حدی

استاد راهنما

دکتر یوسف حسین زاده

استاد مشاور

دکتر مسعود حسین زاده اصل

پژوهشگر

محمد عسگری

زمستان ۱۳۹۳

اللَّهُمَّ احْمِزْنِي

تقدیم به:

ارزشهای والای زندگیم، پدر و مادر عزیز و بزرگوارم؛ به پاس همه‌ی تلاش‌های محبت‌آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام

انجام داده‌اند.

محمد عسکری

بهمن ۱۳۹۳

تقدیر و تشکر

در آغاز خداوند بخشنده و مهربان را شاکرم که مراد انجام و به عمر رساندن این پیمان نامه موفق گردانید.

بر خود لازم می دانم از زحمات استاد راهنمای فاضل و ارزشمند خود جناب آقای دکتر یوسف حسین زاده که همواره بنده را مورد

لطف و محبت خود قرار داده اند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. به سرانجام رسانیدن این رساله بدون مساعدت و بهره گیری

از دانش ایشان میسر نبود.

همچنین از جناب آقای دکتر مسعود حسین زاده، استاد مشاور بزرگوارم صمیمانه تشکر می نمایم.

در پایان از پدر و مادر عزیزم مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری اینجانب را فراهم نمودند و مسیر و شرایط تحصیل را برایم هموار

کردند پاسکزاری می نمایم.

محمد عسکری

بهمن ۱۳۹۳

نام خانوادگی دانشجو: عسگری	نام: محمد		
عنوان: بررسی ضوابط طراحی تیرهای فولادی لانه‌زنبوری در روش حالات حدی			
استاد راهنما: دکتر یوسف حسین زاده استاد مشاور: دکتر مسعود حسین زاده اصل			
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی عمران	گرایش: سازه	دانشگاه: تبریز
دانشکده: فنی مهندسی عمران	تاریخ فارغ‌التحصیلی: بهمن ۹۳	تعداد صفحات: ۱۰۱	کلمات کلیدی: تیرهای لانه‌زنبوری، روش حالت حدی، کمانش جانبی - پیچشی، مدل اجزای محدود
<p style="text-align: right;"><b>چکیده:</b></p> <p>در ساخت سازه‌های فولادی، تیرهای لانه‌زنبوری به دلیل داشتن ظرفیت و سختی خمشی بالا، وزن کم و صرفه اقتصادی به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. تبدیل نیمرخ‌های فشرده به تیرهای لانه‌زنبوری غیرفشرده موجب تغییر در مشخصات هندسی مقطع اولیه می‌شود. این تغییرات با افزایش ظرفیت خمشی باعث ایجاد ضعف‌هایی مانند کاهش مقاومت برشی، افزایش احتمال کمانش جانبی پیچشی و کمانش T شکل بال فشاری می‌شود. این پایان‌نامه ضوابط طراحی تیرهای لانه‌زنبوری در روش حالات حدی مورد مطالعه قرار داده است. پس از صحت سنجی مدل تحلیلی، ۵۷ تیر لانه‌زنبوری به کمک نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شد و رفتارشان تحت اثر خمش خالص، لنگر نامتقارن در دو انتهای تیر و بار متمرکز در وسط دهانه مورد بررسی قرار داده شد. با تعیین بار نهایی، نحوه توزیع تنش، مکانیزم‌های خرابی و کمانش اجزا، دقت فرمول‌های موجود طراحی تیرهای لانه‌زنبوری در حالت حدی بررسی شد که در نتیجه آن منجر به تصحیح فرمول‌ها و ضریب گرادیان خمشی موجود گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در حالت خمش خالص، مقدار لنگر نهایی و مرز بین کمانش الاستیک و غیرالاستیک در تیر لانه‌زنبوری کمتر از مقادیر تیر با جان پر می‌باشد؛ همچنین مقدار ضریب یکنواختی لنگر تیرهای لانه‌زنبوری در ناحیه کمانش غیرارتجاعی ثابت نبوده و مقادیر کوچکتری از آنچه که در AISC-LRFD پیشنهاد شده است می‌باشد.</p>			

# فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	فصل اول: کلیاتی در رابطه با تیرهای لانه‌زنبوری	۱
۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	هندسه برش	۴
۱-۲-۱	برش پانیر	۶
۲-۲-۱	برش لیتسکا	۶
۳-۱	انواع برشکاری جان	۷
۱-۳-۱	برش با شعله دستی یا نیمه‌خودکار	۷
۲-۳-۱	روش پانچ	۷
۴-۱	مفاهیم عمومی	۷
۵-۱	انواع گسیختگی در تیرهای لانه‌زنبوری	۱۰
۶-۱	روش تحلیل تنش‌ها در تیرهای لانه‌زنبوری	۱۱
۱-۶-۱	روش‌های تقریبی محاسبات دستی	۱۳
۲-۶-۱	روش قیاس به تیر	۱۳
۱-۲-۶-۱	روش قیاس به خرپای ویرندیل	۱۳
۲-۲-۶-۱	روش قیاس به تیر با جان گسترده معادل	۱۹
۳-۲-۶-۱	روش قیاس به قاب	۲۰
۳-۶-۱	روش‌های تئوری الاستیسیته	۲۱
۱-۳-۶-۱	روش تفاضل‌های محدود	۲۱
۲-۳-۶-۱	روش تحلیل تنش‌ها در جان با قیاس به گوه معادل	۲۲

۲۲	۴-۶-۱	روش‌های اجزاء محدود
۲۲	۱-۴-۶-۱	تحلیل تنش واحدهای نمونه ایزوله شده ای از تیر با شرایط سرحدی مفروض
۲۳	۲-۴-۶-۱	تحلیل مجموعه تیر در یک مدل اجزاء محدود
۲۴	۳-۴-۶-۱	تحلیل به روش پاره سازه‌ها
۲۵	۷-۱	مروری بر تحقیقات انجام شده
۲۵	۱-۷-۱	گزارش Walid Zaarour, Richard redwood
۲۷	۲-۷-۱	گزارش سلطانی و همکاران
۲۹	۳-۷-۱	گزارش Redwood, Demirjian
۳۰	۴-۷-۱	گزارشات دکتر مالک
۳۰	۱-۴-۷-۱	آزمایشات تعیین بارکمانش جانبی و پیچشی تیر لانه‌زنبوری
۳۱	۲-۴-۷-۱	مطالعات اجزاء محدود غیر خطی رفتار حدی (پلاستیسیته گسترده، بروز ترک و گسترش شکست)
۳۱	۳-۴-۷-۱	تحقیقات آزمایشگاهی به منظور مشاهده رفتار و صور مختلف گسیختگی
۳۲	۴-۴-۷-۱	بررسی کمانش جانبی - پیچشی جان
۳۳	۵-۷-۱	گزارش پناهی
۳۳	۶-۷-۱	گزارش ندرکات و کردال
۳۴	۷-۷-۱	گزارش محب خواه
۳۶	۲	فصل دوم: مواد و روشها
۳۶	۱-۲	پیشگفتار
۳۷	۲-۲	روش المان محدود
۳۸	۳-۲	مقدماتی بر نرم‌افزار ABAQUS
۳۹	۴-۲	تشریح المان‌های موجود در ABAQUS
۴۵	۵-۲	تحلیل المان محدود کمانش غیر خطی تیر با نرم‌افزار ABAQUS

۴۶.....	۶-۲	مراحل تحلیل کمانش غیر خطی با نرم افزار ABAQUS
۵۰.....	۷-۲	بررسی صحت مدل سازی.....
۵۱.....	۱-۷-۲	مش بندی مدل و خصوصیات مصالح
۵۲.....	۲-۷-۲	بارگذاری و شرایط تکیه گاهی
۵۳.....	۳-۷-۲	مودهای کمانشی
۵۸.....	۳	ارائه نتایج، جمع بندی و نتیجه گیری
۵۸.....	۱-۳	پیشگفتار
۵۹.....	۱-۱-۳	کمانش پیچشی جانبی
۶۰.....	۱-۱-۱-۳	معادله دیفرانسیل حاکم بر کمانش پیچشی جانبی
۶۱.....	۲-۱-۱-۳	ضریب بکنواختی لنگر
۶۷.....	۲-۳	مدل اجزاء محدود غیر خطی
۶۷.....	۱-۲-۳	مش بندی مدل و خصوصیات مصالح
۶۹.....	۲-۲-۳	بارگذاری و شرایط تکیه گاهی
۶۹.....	۳-۲-۳	هندسه نمونه ها
۷۰.....	۳-۳	تحلیل نمونه ها به کمک روش اجزاء محدود
۷۰.....	۱-۳-۳	حالت خمش خالص
۷۰.....	۱-۱-۳-۳	تیر لانه زنبوری CPE14
۷۴.....	۲-۱-۳-۳	تیر لانه زنبوری CPE18
۷۹.....	۳-۱-۳-۳	تاثیر پرکردن بازشوهای نزدیک تکیه گاه در حالت خمش خالص
۸۲.....	۲-۳-۳	حالت لنگر نامتقارن
۸۶.....	۱-۲-۳-۳	تصحیح ضریب $C_b$ برای حالت لنگر نامتقارن
۸۹.....	۳-۳-۳	حالت بارگذاری متمرکز



۹۲.....	تصحیح ضریب $C_b$ برای حالت بار متمرکز.....	۱-۳-۳-۳
۹۵.....	تأثیر پرکردن بازشوهای نزدیک تکیه گاه در حالت بارگذاری متمرکز.....	۲-۳-۳-۳
۹۷.....	خلاصه نتایج و پیشنهادات.....	۴-۳
۹۷.....	نتایج.....	۱-۴-۳
۹۹.....	پیشنهادات.....	۲-۴-۳
۱۰۰.....	منابع و مراجع:	

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: صرفه‌جویی در وزن و فضای مصرفی با بالا بردن مقاومت خمشی ..... ۱
- شکل ۲-۱: سوراخ‌های جان در تیرهای لانه‌زنبوری محل عبور تأسیسات ..... ۲
- شکل ۳-۱: موارد استفاده تیر لانه‌زنبوری ..... ۳
- شکل ۴-۱: استفاده از تیر لانه‌زنبوری موج‌دار جهت زیبایی ..... ۴
- شکل ۵-۱: مراحل ساخت تیر لانه‌زنبوری ..... ۴
- شکل ۶-۱: هندسه تیر لانه‌زنبوری ..... ۵
- شکل ۷-۱: هندسه برش پانیر ..... ۶
- شکل ۸-۱: هندسه برش لیتسکا ..... ۶
- شکل ۹-۱: ترسیم جسم آزاد نیمه T فوقانی ..... ۸
- شکل ۱۰-۱: توزیع تنش ناشی از لنگر خمشی و لنگر ثانویه در نیمه فوقانی و تحتانی ..... ۹
- شکل ۱۱-۱: ترسیم جسم آزاد گوه تیر لانه‌زنبوری ..... ۱۰
- شکل ۱۲-۱: مبانی قیاس به خرپای ویرندیل ..... ۱۴
- شکل ۱۳-۱: نمودارهای نیروی برش، خمش و نیروی محوری حاصل شده از تحلیل به روش هاردی کراس ..... ۱۶
- شکل ۱۴-۱: روش ساده‌سازی روش قیاس به خرپای ویرندیل ..... ۱۸
- شکل ۱۵-۱: تیر مورد تحلیل الف: کلوسوفسکی ب: اسریمانی و داس ..... ۲۰
- شکل ۱۶-۱: روش قیاس به قاب معادل ..... ۲۰
- شکل ۱۷-۱: روش اجزاء محدود ..... ۲۲
- شکل ۱۸-۱: نمونه مورد آزمایش Walid Zaarour.Richard redwood ..... ۲۶
- شکل ۱۹-۱: هندسه تیر و بازشوی آزمایش Walid Zaarour.Richard redwood ..... ۲۶
- شکل ۲۰-۱: مش بندی و شرایط مرزی و بارگذاری گزارش سلطانی و همکاران ..... ۲۷
- شکل ۲۱-۱: نمونه‌های مورد آزمایش Redwood.Demirjian ..... ۲۹
- شکل ۲۲-۱: مدل المان محدود گزارش Redwood.Demirjian ..... ۳۰
- شکل ۲۳-۱: نمونه مورد آزمایش دکتر مالک ..... ۳۱
- شکل ۲۴-۱: نمونه آنالیز شده پناهی ..... ۳۳
- شکل ۲۵-۱: شرایط بارگذاری و تکیه‌گاه جانبی آزمایش ندرکات و کردال ..... ۳۴
- شکل ۲۶-۱: هندسه بازشوی‌های گزارش محب‌خواه ..... ۳۵
- شکل ۱-۲: انواع المان‌های جامد دوبعدی (سمت راست) و سه‌بعدی (سمت چپ) ..... ۴۰

شکل ۲-۲: المان جامد استوانه‌ای.....	۴۱
شکل ۳-۲: المان تیر .....	۴۲
شکل ۴-۲: المان غشایی.....	۴۲
شکل ۵-۲: المانهای پوسته، مدل پوسته قراردادی و مدل محیط پیوسته .....	۴۳
شکل ۶-۲: المان آجر خطی ۸ گرهی (سمت چپ) غیرخطی ۲۰ گرهی (سمت راست).....	۴۴
شکل ۷-۲: مدل مش‌بندی شده تیر IPE14 برای تحلیل Buckle.....	۴۶
شکل ۸-۲: مود اول کمانش تیر IPE14.....	۴۷
شکل ۹-۲: مود دوم کمانش تیر IPE14 .....	۴۷
شکل ۱۰-۲: مود سوم کمانش تیر IPE14 .....	۴۸
شکل ۱۱-۲: تحلیل Static,General .....	۴۹
شکل ۱۲-۲: تحلیل Static,Riks .....	۴۹
شکل ۱۳-۲: هندسه بازشوهای جان تیر لانه‌زنبوری آزمایش ندرکات و کردال.....	۵۰
شکل ۱۴-۲: شرایط بارگذاری و تکیه‌گاه جانبی آزمایش ندرکات و کردال .....	۵۱
شکل ۱۵-۲: مدل مش‌بندی شده گزارش ندرکات و کردال .....	۵۲
شکل ۱۶-۲: بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی گزارش ندرکات و کردال در ABAQUS.....	۵۲
شکل ۱۷-۲: مود اول کمانش تحلیل Buckle تیر گزارش ندرکات و کردال در ABAQUS .....	۵۴
شکل ۱۸-۲: مود دوم کمانش تحلیل Buckle تیر گزارش ندرکات و کردال در ABAQUS .....	۵۴
شکل ۱۹-۲: مود سوم کمانش تحلیل Buckle تیر گزارش ندرکات و کردال در ABAQUS .....	۵۵
شکل ۲۰-۲: نمودار لنگر-جابجایی جانبی بال فشاری (فوقانی) در وسط تیر.....	۵۶
شکل ۲۱-۲: وضعیت تنش میسر در لحظه کمانش .....	۵۷
شکل ۱-۳: کمانش پیچشی جانبی تیری با مقطع I شکل.....	۵۹
شکل ۲-۳: تیر دوسر مفصل دارای دو مهار جانبی در دو انتها، تحت لنگر یکنواخت در کل طول عضو .....	۶۰
شکل ۳-۳: تعیین علامت نسبت $M_1/M_2$ در رابطه (۳-۵).....	۶۲
شکل ۴-۳: نحوه تعیین مقادیر رابطه (۳-۶) .....	۶۳
شکل ۵-۳: تغییرات مقاومت خمشی اسمی مقطع براساس تغییرات طول مهار نشده $L_b$ برای $C_b=1$ .....	۶۵
شکل ۶-۳: تغییرات مقاومت خمشی اسمی مقطع براساس تغییرات طول مهار نشده $L_b$ برای ضرایب $C_b$ مختلف .....	۶۵
شکل ۷-۳: مش بندی مدل در ABAQUS .....	۶۸
شکل ۸-۳: منحنی تنش-کرنش فولاد مصرفی .....	۶۸
شکل ۹-۳: نحوه اعمال لنگر انتهایی .....	۶۹
شکل ۱۰-۳: هندسه بازشوهای تیر لانه‌زنبوری .....	۷۰

- شکل ۱۱-۳: وضعیت تنش میسر در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE14 تحت خمش خالص با  $N=10$ ..... ۷۱
- شکل ۱۲-۳: وضعیت تنش میسر در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE14 تحت خمش خالص با  $N=20$ ..... ۷۲
- شکل ۱۳-۳: وضعیت تنش تسلیم در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE14 تحت خمش خالص با  $N=12$ ..... ۷۲
- شکل ۱۴-۳: نمودار تغییرات مقاومت خمشی اسمی مقطع CPE14 براساس تغییرات طول مهار نشده تحت خمش خالص ۷۳
- شکل ۱۵-۳: وضعیت تنش میسر در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE18 با  $N=10$ ..... ۷۵
- شکل ۱۶-۳: وضعیت تنش میسر در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE18 با  $N=20$ ..... ۷۶
- شکل ۱۷-۳: وضعیت تنش تسلیم در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE18 تحت خمش خالص با  $N=10$ ..... ۷۶
- شکل ۱۸-۳: نمودار تغییرات مقاومت خمشی اسمی مقطع CPE18 براساس تغییرات طول مهار نشده ..... ۷۷
- شکل ۱۹-۳: نمودار  $M_{cr-L}$  برای CPE14، IPE14 و CPE18 ..... ۷۸
- شکل ۲۰-۳: نمودار  $M_{cr-U_y}$  برای سه نوع تیر CPE14 ..... ۷۹
- شکل ۲۱-۳: مش بندی مدل تیر لانه‌زنبوری CPE14 با سه بازشو پر شده در ABAQUS ..... ۸۰
- شکل ۲۲-۳: نمودار  $M_{cr-L}$  برای تیر لانه‌زنبوری CPE14 با سه بازشو پر شده در تکیه‌گاه ..... ۸۱
- شکل ۲۳-۳: مقایسه نمودار  $M_{cr-L}$  برای تیرهای لانه‌زنبوری با سه بازشو پر شده در تکیه‌گاه و بدون بازشو ..... ۸۲
- شکل ۲۴-۳: تیر لانه‌زنبوری تحت لنگر نامتقارن ..... ۸۳
- شکل ۲۵-۳: نمودار  $M_{cr-L}$  برای تیر لانه‌زنبوری CPE14 تحت لنگر نامتقارن در دو سر تیر ..... ۸۴
- شکل ۲۶-۳: وضعیت تنش میسر در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE14 با  $N=10$  تحت لنگر نامتقارن ..... ۸۴
- شکل ۲۷-۳: وضعیت تنش میسر در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE14 با  $N=18$  تحت لنگر نامتقارن ..... ۸۵
- شکل ۲۸-۳: نمودار  $C_b-L$  برای تیرهای لانه‌زنبوری تحت لنگر نامتقارن در دو سر تیر ..... ۸۵
- شکل ۲۹-۳: نمودار  $R_f \beta$  برای تیر لانه‌زنبوری CPE14 تحت لنگر نامتقارن و منحنی برازش شده بر آن ..... ۸۸
- شکل ۳۰-۳: مقایسه نمودار  $M_{cr-L}$  بین حالت لنگر نامتقارن و حالت خمش خالص تیر لانه‌زنبوری CPE14 ..... ۸۸
- شکل ۳۱-۳: نمودار  $M_{cr}(pl/4)-L$  برای تیر لانه‌زنبوری CPE14 تحت بار متمرکز در وسط دهانه ..... ۹۰
- شکل ۳۲-۳: وضعیت تنش میسر در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE14 با  $N=10$  تحت بار متمرکز ..... ۹۰
- شکل ۳۳-۳: وضعیت تنش میسر در لحظه وقوع کمانش در تیر لانه‌زنبوری CPE14 با  $N=18$  تحت بار متمرکز ..... ۹۱
- شکل ۳۴-۳: نمودار  $C_b-L$  برای تیرهای لانه‌زنبوری تحت بار متمرکز در وسط تیر ..... ۹۱
- شکل ۳۵-۳: نمودار  $R_f \beta$  برای تیر لانه‌زنبوری CPE14 و منحنی برازش شده بر آن ..... ۹۴
- شکل ۳۶-۳: مقایسه نمودار  $M_{cr-L}$  بین حالت بار متمرکز و حالت خمش خالص تیر لانه‌زنبوری CPE14 ..... ۹۴
- شکل ۳۷-۳: مش بندی مدل تیر لانه‌زنبوری CPE14 با سه بازشو پر شده تحت بار متمرکز در ABAQUS ..... ۹۵
- شکل ۳۸-۳: نمودار  $M_{cr-L}$  تیر لانه‌زنبوری CPE14 تحت بار متمرکز با سه بازشوی پر شده در تکیه‌گاه ..... ۹۶
- شکل ۳۹-۳: مقایسه نمودار  $M_{cr-L}$  تیرهای لانه‌زنبوری مختلف ..... ۹۶

## فهرست جداول

صفحه

عنوان

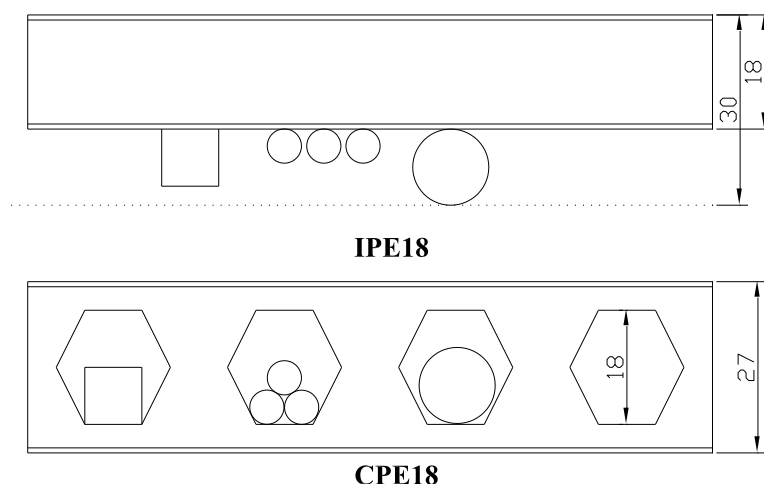
۲۵	جدول ۱-۱: ابعاد تیرهای آزمایش شده Walid Zaarour, Richard redwood
۲۶	جدول ۲-۱: تنش تسلیم و نهایی نمونه‌های آزمایش‌های Walid Zaarour, Richard redwood
۲۸	جدول ۳-۱: مشخصات مصالح و هندسه نمونه‌های گزارش سلطانی و همکاران
۵۰	جدول ۱-۲: جزئیات و نتیجه تیر لانه‌زنبوری M5-1 آزمایش شده در مرجع
۵۶	جدول ۲-۲: تغییرات بار و جابجایی جانبی تیر مدل شده ندرکات و کردال
۶۴	جدول ۱-۳: مقدار $C_b$ برای حالات مختلف تغییرات لنگر خمشی در طول مهار نشده عضو بر اساس روابط (۳-۵) و (۳-۶)
۷۰	جدول ۲-۳: جزئیات تیرهای لانه‌زنبوری مدل شده در ABAQUS
۷۱	جدول ۳-۳: نتایج تحلیل نمونه‌های CPE14
۷۵	جدول ۴-۳: نتایج تحلیل نمونه‌های CPE18
۸۰	جدول ۵-۳: نتایج تحلیل نمونه‌های CPE14 با سه جان پر شده در تکیه‌گاه
۸۳	جدول ۶-۳: محاسبه ضریب $C_b$ برای تیرهای لانه‌زنبوری تحت اثر لنگر نامتقارن در دو سر تیر
۸۹	جدول ۷-۳: محاسبه ضریب $C_b$ برای تیرهای لانه‌زنبوری تحت بار متمرکز
۹۳	جدول ۸-۳: تغییرات ضریب کاهش R برای حالت بارگذاری متمرکز
۹۵	جدول ۹-۳: نتایج تحلیل نمونه‌های CPE14 با سه جان پر شده در تکیه‌گاه تحت بار متمرکز

## فصل اول: کلیاتی در رابطه با تیرهای لانه‌زنبوری

### ۱-۱ مقدمه:

تیر لانه‌زنبوری یکی از انواع مختلف و متداول تیرهای ساختمانی است که در کشور ما مورد استعمال فراوانی در اسکلت‌های فولادی داشته است. فلسفه ساخت تیر لانه‌زنبوری اصولاً برای بالا بردن گشتاور اینرسی و مدول مقطع تیر و در نتیجه بالا بردن ظرفیت تحمل گشتاور در مقایسه با تیر نورد شده اصلی می‌باشد، در زمان‌ها و مکان‌هایی که تیر اصلی موجود نبوده یا صرفه اقتصادی نداشته باشد استفاده از تیر لانه‌زنبوری مطرح می‌شود. مثلاً از یک تیر نمره ۱۶ با برش دادن و ساختن تیر لانه‌زنبوری و اعمال تقویت‌های لازم می‌توان جایگزینی برای تیر نمره ۲۰-۱۸ یا حتی نمره ۲۲ به وجود آورد.

ساخت تیرهای لانه‌زنبوری موجب افزایش ارتفاع نیم‌رخ و در نتیجه افزایش حدود ۵۰٪ ظرفیت خمشی و کاهش حدود ۵۰٪ از خیز تیر می‌شود. از سوراخ‌های حاصله نیز می‌توان برای عبور تأسیسات ساختمانی استفاده کرد. (شکل ۱-۲) همان‌طور که در شکل ۱-۱ دیده می‌شود استفاده از تیر لانه‌زنبوری باعث صرفه‌جویی در وزن به میزان ۶۰ درصد و در فضای مصرفی به میزان ۳۰ میلی‌متر می‌شود.



شکل ۱-۱: صرفه‌جویی در وزن و فضای مصرفی با بالا بردن مقاومت خمشی



شکل ۱-۲: سوراخ‌های جان در تیرهای لانه‌زنبوری محل عبور تأسیسات

تیرها برای خمش طراحی می‌شوند، در خمش تنش در تار خنثی برابر صفر بوده و با پیشروی به سمت تارهای کناری تنش‌های فشاری یا کششی افزایش می‌یابد. در تطابق با این، در تیرهای لانه‌زنبوری مصالح در نزدیکی تارهای کناری متمرکز شده و در اطراف تار خنثی مصالح کمتری موجود می‌باشد. این امر باعث ضعیف شدن جان تیر می‌شود که در محل تکیه‌گاه‌ها و محل اعمال نیروی متمرکز نیاز به تقویت دارد.

در سال ۱۹۱۰ برای اولین بار آقای هورتون از شرکت پل و آهن شیکاگو پیشنهاد کرد که با تقسیم آهن به دو قسمت و جوش دادن آن به یکدیگر می‌توان مقدار اساس مقطع تیر را بدون افزایش وزن آن بالا برد. از آن تاریخ به بعد تیرهای لانه‌زنبوری در سازه ساختمان‌ها، پل‌ها و کشتی‌ها کاربرد دارند. تیرهای لانه‌زنبوری در ساختمان‌ها به‌عنوان تیرهای اصلی و فرعی برای حمل بارهای ثقلی و حتی به‌صورت تیرهای اصلی در قاب‌های خمشی مقاوم در مقابل بارهای جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

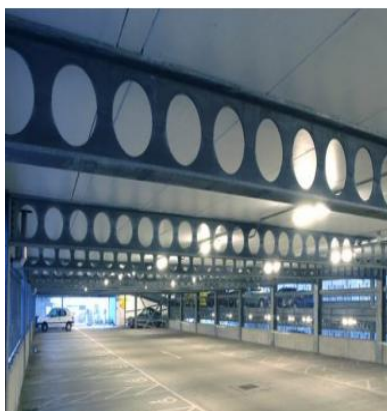
تحقیقات در زمینه تیرهای لانه‌زنبوری از سال ۱۹۴۳ شروع شد. روی صفحات سوراخ‌دار آزمایش‌هایی جهت مشخص کردن رفتار جان سوراخ‌دار انجام شد. در سال ۱۹۵۷ آزمایش‌هایی توسط آقای آلتفیلش و همکاران و آقای گیسون و همکاران روی نمونه‌های واقعی و کامل این تیرها و به‌منظور بررسی وضعیت ساختاری تیر لانه‌زنبوری در محدوده الاستیک و پلاستیک و تعیین مقاومت آن‌ها به عمل آمد [16]. در نتیجه این آزمایش‌ها درک بهتری از رفتار تیر لانه‌زنبوری تحت اثر بارهای استاتیکی و برای دهانه‌های ساده حاصل گردید. علاوه بر این روش‌های تحلیل تقریبی مناسب‌تری که توافق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایش‌ها داشت، دست آورد این بخش از تحقیقات بود. بعد از آن با ادامه بررسی‌ها و تحقیقات

توسط افراد مختلف، تاکنون اطلاعات جامع‌تر و وسیع‌تری در این زمینه به‌دست آمده است.

حضور سوراخ‌ها در جان تیرهای لانه‌زنبری منجر به بروز تنش‌ها و تغییر شکل‌های ثانویه (مرسوم به برشی) می‌گردد که با پیچیدگی‌هایی در تحلیل همراه است و طبعاً وجود این سوراخ‌ها در رفتار تیر لانه‌زنبری تأثیر عمده‌ای دارد. بررسی جنبه‌های مختلف رفتار تیرهای لانه‌زنبری و صور گسیختگی مربوطه، با توجه به ویژگی‌های هندسی تیر، مباحث متنوعی از مسائل تحلیل و طراحی در مقوله سازه‌های فولادی، کمانش صفحات، مکانیک پیشرفته جامدات و نظریه‌های الاستیسیته و پلاستیسیته، مکانیک شکست، اثرات تنش‌های پس‌ماند و پدیده خستگی و لذا کاربرد روش‌های نظری، عددی، تجربی و آزمایشگاهی چندی را دربر می‌گیرد.

هم‌اکنون از تیرهای لانه‌زنبری در کشور ما به‌صورت گسترده‌ای به‌عنوان تیرهای فرعی سقف و نیز تیرهای اصلی که صرفاً وظیفه حمل بارهای ثقلی را دارند استفاده می‌شود. همچنین به‌رغم عدم وجود اطلاعات کافی در زمینه قاب‌های برشگیر ساخته‌شده با تیرهای لانه‌زنبری تعداد قابل‌توجهی از قاب‌های خمشی با استفاده از این تیرها ساخته‌شده یا می‌شوند.

دلیل این استفاده گسترده، اقتصادی بودن تیرهای لانه‌زنبری به‌ویژه در شرایط فعلی کشور است. این بدان معنی است که اضافه‌هزینه ساخت این‌گونه تیرها (هزینه برش، مونتاژ و جوشکاری) کمتر از ارزش فولاد صرفه‌جویی شده در اثر استفاده از تیرهای لانه‌زنبری است.



ج: سقف پارکینگ‌های



ب: سقف سالن ورزشی  
عریض



الف: سقف جایگاه تماشاگران ورزشگاه

شکل ۱-۳: موارد استفاده تیر لانه‌زنبری





شکل ۴-۱: استفاده از تیر لانه زنبوری موج دار جهت زیبایی

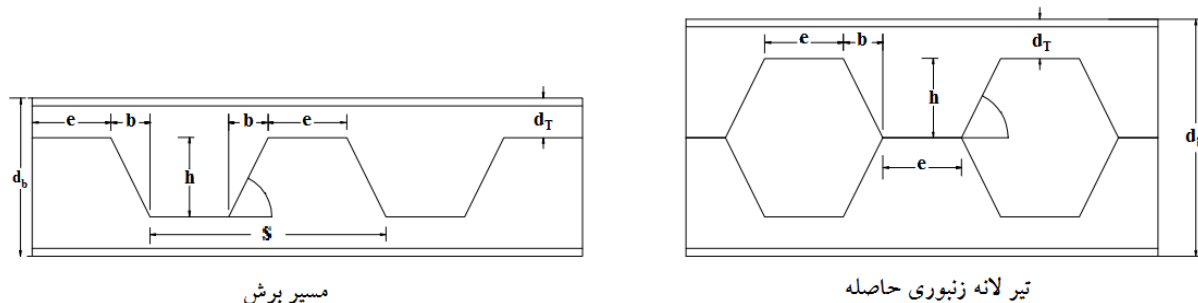
## ۱-۲ هندسه برش:

با برش زیگزاگ جان تیر نورد شده و سپس با انتقال یکی از نیمه‌های بریده شده به اندازه نیم پریود برش بر روی نیمه دیگر، تیر لانه زنبوری حاصل می‌شود. تیر حاصل دارای مقاومت خمشی کلی بالاتر و اساس مقطع بزرگتری نسبت به تیر پایه می‌باشد. (شکل ۵-۱)



شکل ۵-۱: مراحل ساخت تیر لانه زنبوری

هندسه تیرهای لانه‌زنبوری با بال‌های موازی تابع پارامترهای نشان داده‌شده در شکل ۱-۶ می‌باشد.



شکل ۱-۶: هندسه تیر لانه‌زنبوری

$$\tan\theta = h/b$$

$$S = 2(b + e)$$

$$d_T = \frac{d_b - h}{2}$$

$$d_g = d_b + h$$

(۱-۱)

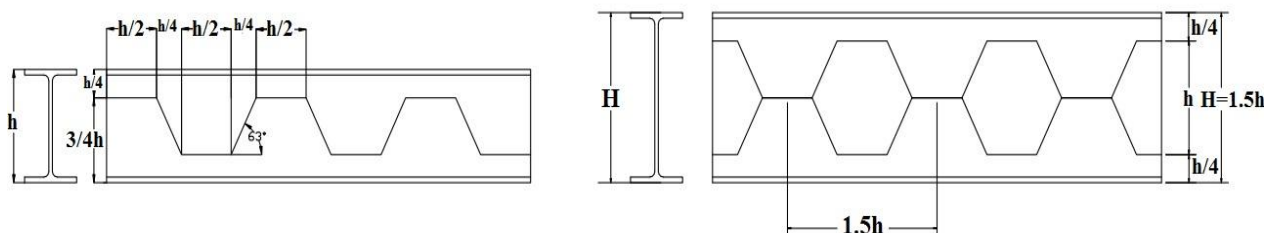
زاویه ( $\theta$ ) عموماً بین ۴۵ تا ۷۰ درجه انتخاب می‌گردد، زاویه ۶۰ درجه مورد استفاده عام داشته و در اقصی نقاط جهان بیشترین استفاده را دارد. مقدار ( $e$ ) بر اساس عملکرد ویرندلی در قسمت (T) شکل و مقدار برش در محور خنثای تیر انتخاب می‌شود. با کوچک کردن ( $e$ ) بر اساس عملکرد ویرندلی در قسمت (T) شکل و مقدار برش در محور خنثای تیر انتخاب می‌شود. با کوچک کردن ( $e$ ) عملکرد ویرندلی در مقطع (T)، کاهش می‌یابد ولی موجب افزایش تنش برشی در جوش جان می‌شود و برعکس با افزایش ( $e$ ) تنش برشی در جوش جان کاهش می‌یابد، اما عملکرد ویرندلی به علت بزرگ شدن بازوی ممان‌گیر نیروی برشی (V) در مقطع، افزایش می‌یابد. مقدار ( $e$ ) بنا به نظر طراح انتخاب می‌شود. مقدار ( $h$ ) بستگی به ارتفاع بازشدگی برای مقاصد طراحی دارد. بقیه پارامترها با استفاده از معادلات (۱-۱) به دست می‌آید.

در عمل دو نوع تیر لانه‌زنبوری متداول است که یکی با برش پانیر (با بازشوی شش ضلعی غیر منتظم) و دیگری با برش لتیسکا به کار گرفته می‌شود.

## ۱-۲-۱ برش پانیر:

در این نوع برش که رایج‌ترین نوع برای تیر لانه‌زنبوری است ارتفاع تیر حاصله  $1/5$  برابر تیر اولیه می‌باشد و زاویه  $\emptyset$  در برش پانیر مقدار ثابتی است. (شکل ۷-۱)

$$\emptyset = \text{Arctan}(2) \cong 63.435^\circ$$

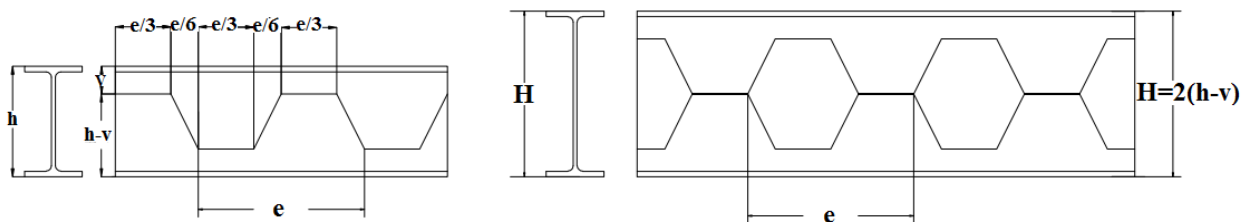


شکل ۷-۱: هندسه برش پانیر

## ۱-۲-۲ برش لیتسکا:

در این برش زاویه  $\emptyset$  مقدار ثابتی ندارد و ارتفاع تیر حاصله بین  $1/3$  تا  $1/7$  برابر تیر اولیه متغیر خواهد بود. (شکل ۸-۱)

لازم به ذکر است در حالتی که در برش لیتسکا  $e=1.5h$  برقرار شود، برش پانیر حاصل می‌شود. در واقع برش پانیر حالت خاصی از برش لیتسکا است که به علت وفور استفاده از آن دارای نام منحصربه‌فرد شده است.



شکل ۸-۱: هندسه برش لیتسکا

## ۱-۳ انواع برشکاری جان:

### ۱-۳-۱ برش با شعله دستی یا نیمه خودکار:

این روش به راحتی در دسترس بوده و در هر کارگاهی می توان از این روش استفاده کرد اما این روش اعوجاج بیشتری نسبت به سایر روش ها ایجاد کرده و لبه گوه ها برای جوش به یکدیگر نیاز به آماده سازی خواهد داشت.

### ۱-۳-۲ روش پانچ:

روش پانچ به دو صورت انجام می شود. در روش اول دو غلطک با دوران بر روی هم جان تیر را به تدریج به صورت قیچی می برد و در روش دوم دو قالب در بالا و پایین در هر مرحله از پانچ به اندازه یک سوراخ از جان بریده می شود که در روش دوم اعوجاج لبه ها بسیار کمتر از روش اول می باشد.

### ۱-۴ مفاهیم عمومی:

چون اکثر بارهای خمشی را بال های تیر تحمل می کنند کاهش سطح جان تأثیر چندانی روی ظرفیت باربری خمشی نخواهد داشت. لیکن نیروی برشی  $V$  به وسیله جان تحمل می گردد و باید مورد توجه قرار گیرد. در بالا و پایین هر سوراخ، دو نیمه  $T$  شکل فوقانی و تحتانی به عنوان قابی عمل می کنند که در مقابل برش قائم مقاومت می کنند.

در وسط دهانه، برش  $V$  حداقل می باشد و اثر کمی در روی مقاومت تیر خواهد داشت. لیکن هر چه به تکیه گاه ها یعنی ناحیه برش زیاد نزدیک می شویم تنش خمشی موضعی ناشی از نیروی برشی در دو نیمه  $T$  شکل فوقانی و تحتانی قابل توجه بوده و باید به تنش های خمشی کل مقطع افزوده شود. نمودار لنگر خمشی موضعی تولید شده در اثر برش در شکل ۱-۹ نشان داده شده است.