

بررسی عددی رفتار تیرهای لانه زنبوری ساخته شده از تیورق

هدایت ولادی*^۱، مهرداد شادفران^۲ و سیدفرزاد یثربی^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

^۳ کارشناسی ارشد سازه، پردیس بین‌المللی ارس، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۴/۹/۱۴، پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۵، نشر آنلاین: ۹۵/۱۲/۲۶)

چکیده

با توجه به کمبود منابع انرژی و مواد خام در جهان بایستی در مسائل مربوط به مهندسی، سازه‌های با وزن و هزینه کمتر را جستجو نمود. از آن جایی که تیرهای لانه زنبوری منجر به افزایش مقاومت خمشی و سختی سازه‌ها بدون افزایش وزن سازه می‌گردند، لذا در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در برخی سازه‌ها مانند پل‌ها نیاز به تیرها با ابعاد و ارتفاع بزرگ‌تر به منظور افزایش سختی، مقاومت و تحمل نیروهای بیشتر ضرورت داشته و امکان استفاده از تیرهای لانه زنبوری از مقاطع نورد شده گرم عملاً ناممکن است. در نتیجه برای حل این مشکل تیرهای لانه زنبوری ساخته شده از تیورق می‌تواند به صورت مطلوب‌تری اهداف طراحی را تأمین نمایند. در مقاله حاضر با بررسی‌های لازم مشخص گردید که تیرهای لانه زنبوری ساخته شده از تیورق برای پوشش دهانه‌های بزرگ‌تر و تحمل بار بیشتر راهکار مناسبی بوده و تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای نسبت به شش ضلعی دارای رفتار بهتری است. از سوی دیگر با ایجاد چنین تیرهایی می‌توان دهانه‌های بزرگ‌تر را با هزینه کمتر پوشش داد.

کلیدواژه‌ها: تیرهای لانه زنبوری، تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای، تیورق، روش المان محدود.

۱- مقدمه

Dermidjian (۱۹۵۷)، انجام گرفته است که نشان می‌دهد مد شکستگی ویژه‌ای در تیرهای لانه زنبوری رخ می‌دهد که نشان دهنده متفاوت بودن مد شکست در مقایسه با تیرهای با جان توپر می‌باشد. از آن زمان تا کنون مطالعات گسترده‌ای در مورد رفتار تیرهای لانه زنبوری صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

Loannidis و Raftoyiannis (۲۰۰۶)، تغییر شکل تیرهای لانه زنبوری تحت بارهای قائم را مورد بررسی قرار دادند. Soltani و همکاران (۲۰۱۲)، در مقاله خود یک مدل عددی برای پیش‌بینی رفتار تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی ایجاد کردند و توانستند بار نهایی و مد شکست تیرهای لانه زنبوری را پیش‌بینی کرده و رفتار بار نهایی تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی را هنگامی که در معرض برش و خمش قرار گرفته‌اند به دست آورند. Showkati و همکاران (۲۰۱۲)، در مقاله خود بر روی کمانش پیچشی- جانبی تیرهای لانه زنبوری با مهار الاستیکی، آزمایشاتی به منظور ارزیابی رفتار و تأثیر مهار الاستیک بر روی پایداری کمانش تیرهای لانه زنبوری انجام دادند. Durif (۲۰۱۲)، مطالعات آزمایشگاهی بر روی تیرهای سلولی با

تیرهای با جان باز به صورت تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی اولین بار در حدود ۶۰ سال پیش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله مزایای این تیرها، افزایش ارتفاع تیرها و در نهایت مقاومت خمشی بالاتر آن‌ها است، بدون آن که وزن تیر افزایش یابد. تیرهای لانه زنبوری می‌توانند با سوراخ‌های گوناگون از جمله شش ضلعی و دایره‌ای بریده شده و مورد استفاده قرار گیرند. وجود سوراخ در جان تیر شرایط پیوستگی و یکپارچگی تیر را مخدوش نموده و بر مقاومت خمشی و برشی تیرها تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر وجود سوراخ در جان تیر موجب کاهش سختی خمشی تیر و در نتیجه افزایش تغییر شکل کلی تیر می‌شود. معیار طراحی تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای و شش ضلعی نیازمند تعیین مقاومت سرویس‌دهی آن‌ها می‌باشد. محاسبه مقاومت یک تیر با بازشوه‌های مختلف در جان، با در نظرگیری اثر توأم خمش و برش در بازشوها تعیین می‌گردد. ایده استفاده از تیرهای لانه زنبوری به عنوان یک راهکار مناسب برای پوشش دهانه‌های وسیع در دهه پنجاه میلادی مطرح گردیده است. اولین مطالعات آزمایشگاهی روی تیرهای لانه زنبوری توسط

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۳۸۲

۲-۲- تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای

برای ایجاد تیرهایی با سوراخ‌های دایره‌ای بدین صورت عمل می‌گردد که تیر فولادی ابتدا با الگوی برش نیم دایره‌ای در طول خط مرکزی آن بریده شده و سپس دو نیمه از مقطع اولیه با انتقال بر روی هم قرار گرفته و با جوش به یکدیگر متصل می‌گردند. به این ترتیب تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای ایجاد می‌شود (شکل (۲)).

۳- معیارهای حاکم بر طراحی تیرهای لانه زنبوری

طراحی تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای و شش ضلعی نیازمند تعیین مقاومت و سرویس‌دهی آن‌ها می‌باشد. محاسبه مقاومت یک تیر با بازشوهای مختلف در جان، با در نظرگیری اثر توأم خمش و برش در بازشوها تعیین می‌شود. قیودی که در طراحی یک تیر لانه زنبوری بایستی اعمال گردند عبارتند از ظرفیت خمشی مقطع، ظرفیت برشی مقطع و کمانش موضعی اعضای T شکل و تغییر شکل تیرها و همچنین قطر و فاصله مابین سوراخ‌ها نیز به دلیل محدودیت‌های عملی بایستی مورد توجه قرار گیرند. در این مقاله در روند طراحی این تیرها از آیین‌نامه (AISC) به روش تنش مجاز استفاده شده است.

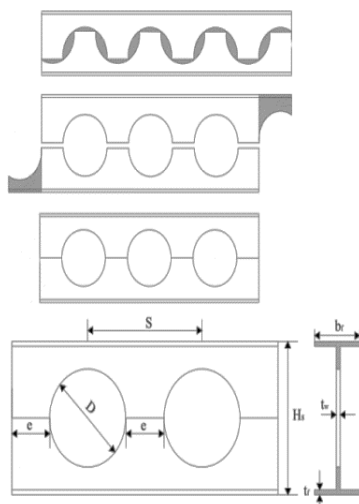
۳-۱- معیار هندسی

قطر سوراخ‌ها و فاصله ما بین آنها می‌تواند متغیر باشد ولی محدودیت‌هایی برای این منظور در نظر گرفته شده است که بایستی مورد توجه قرار گیرند (Showkati و همکاران، ۲۰۱۲).

$$1.08 \leq S/D \leq 1.6 \quad (1)$$

$$1.25 \leq H_s/D \leq 1.75 \quad (2)$$

که S گام سوراخ، D قطر سوراخ و H_s ارتفاع ثانویه تیر می‌باشد.



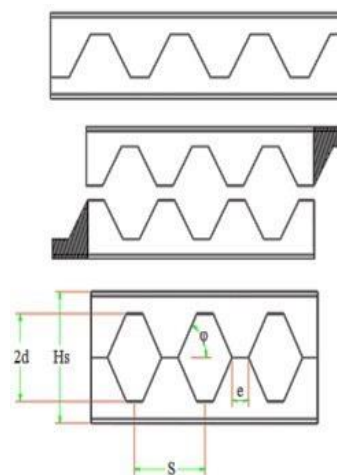
شکل ۲- نحوه ساخت تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای (۲)

سوراخ‌های سینوسی انجام داده و از آنالیز نتایج آزمایشگاهی، دو مد شکستگی برای این تیرها به دست آورد. در این تحقیق یک مد شکست، جدید بوده و در آئین‌نامه‌ها بدان اشاره نشده است، زیرا مربوط به یک شکل سوراخ جدید می‌باشد که به نام تیر آنجلینا نام‌گذاری شده است. Erdal و همکاران (۲۰۱۳)، در مقاله خود مقاومت نهایی تیرهای لانه زنبوری را هم به صورت عددی و هم به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده و بر روی شکست غیر خطی تیرهای سلولی مانند کمانش جان و خمش ویرندل تحقیقاتی انجام داده‌اند. به دلیل این که در برخی سازه‌ها مانند پل‌ها نیاز به تیرها با ابعاد و ارتفاع بزرگ‌تر به منظور افزایش سختی، مقاومت و تحمل نیروهای وارد بوده و امکان استفاده از تیرهای لانه زنبوری از مقاطع نورد شده گرم عملاً ناممکن می‌باشد، در نتیجه برای حل این مشکل تیرهای لانه زنبوری ساخته شده از تیر ورق ممکن است گزینه بهتری باشد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته بررسی رفتار تیرهای لانه زنبوری ساخته شده از تیروورق‌ها تحت بارهای وارده بر آن‌ها ضروری می‌باشد. هدف این مطالعه بررسی عددی رفتار تیرهای لانه زنبوری ساخته شده از تیر ورق تحت بار وارد بر آن‌ها می‌باشد.

۲- معرفی انواع تیرها

۲-۱- تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی

برای ایجاد تیرها با جان باز به صورت شش ضلعی بدین ترتیب عمل می‌گردد که برش طولی در جان تیر اصلی به صورت خطوط شکسته زیگزاگ ایجاد گردیده و قسمت بریده شده فوقانی با یک پله انتقال روی قسمت بریده شده تحتانی حرکت کرده و دو قسمت به یکدیگر جوش می‌شوند و ایجاد یک تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های متوالی در جان میسر گردیده و ارتفاع تیر در آن به اندازه ارتفاع برش زیگزاگ (d) افزایش می‌یابد. بدیهی است این امر بدون استفاده از مصالح اضافی ممکن می‌شود (شکل (۱)).



شکل ۱- نحوه ساخت تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی

که q جریان برش افقی در محل محور خمشی تیر می‌باشد و با توجه به این که توزیع تنش برشی در جان تیر در فاصله مابین سوراخ‌ها توزیع سهمی گون دارد، لذا حداکثر آن برابر است با:

$$(f_{vh})_{max} = 1.5 \frac{v_h}{e.t_w} \leq F_h \quad (10)$$

به طور کلی اگر مقادیر تنش برشی (قائم یا افقی) از مقادیر مجاز آیین نامه‌ای تجاوز کند می‌توان با پرکردن ناحیه مابین سوراخ‌ها این نقیصه را برطرف نمود.

۳-۴- معیار کمانش موضعی اجزای مقطع سپری شکل

با توجه به این که مقاطع سپری شکل تحت اثر تنش‌های فشاری ناشی از خمش اصلی و ثانویه قرار می‌گیرند لذا این مقاطع بایستی دارای سختی و مقاومت کافی برای جلوگیری از کمانش موضعی خود باشند. به این ترتیب:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{795}{\sqrt{F_y}} \quad (11)$$

$$\frac{d_T}{t_w} \leq \frac{1065}{\sqrt{F_y}} \quad (12)$$

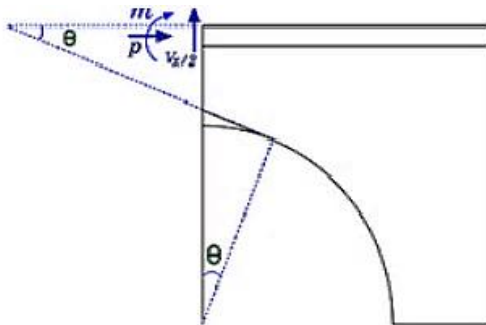
که b_f عرض بال و t_f ضخامت بال، مقطع سپری شکل و t_w ضخامت جان مقطع تیر می‌باشند و F_y تنش تسلیم فولاد مقطع است.

۳-۵- معیار تنش فشار مستقیم در جان

چنانچه نیروهای وارده بر روی تیر سلولی اعم از نیروهای گسترده و نیروهای متمرکز روی بال فوقانی تیر وارد گردند، نصف آنها در ناحیه سوراخ‌دار جان باید از مقطع جان بگذرند. در این حالت جان تیر در ارتفاع D مانند یک ستون فشاری عمل می‌کند. لذا تنش‌های فشاری ستون برابر است با:

$$f(a) = \frac{w s/2 + P/2}{e.t_w} \leq F(a) \quad (13)$$

که در آن $F(a)$ تنش مجازی فشاری ستون می‌باشد که بر حسب لاغری ستون تعیین می‌گردد.



شکل ۳- نحوه اثر خمش‌های اصلی و ثانویه در تیرهای سلولی

و در تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی:

$$0.08 \leq e/(2d \cot \phi + e) \leq 0.6 \quad (3)$$

$$2.5 \leq H_s/d \leq 3.5 \quad (4)$$

$$45^\circ \leq \phi \leq 64^\circ \quad (5)$$

۳-۲- معیار خمش

یکی از معیارهای اصلی در تحلیل و طراحی تیرهای لانه زنبوری معیار خمش است. تنش‌های خمشی ایجاد شده در این تیرها شامل دو قسمت است:

(۱) تنش‌های محوری ناشی از خمش اصلی M_x که دارای توزیع خطی در عمق H_s می‌باشد.

(۲) تنش‌های محوری ناشی از خمش ثانویه که دارای توزیع خطی در عمق d_T می‌باشند.

لذا می‌توان گفت که مجموع تنش‌های ناشی از خمش اصلی در تارهای انتهایی و تار نظیر بالای سوراخ مقطع تیر سلولی و تنش‌های محوری ناشی از خمش ثانویه در تارهای انتهایی مقطع T شکل در ناحیه بحرانی تیر سلولی که بر اساس زاویه θ متغیر است، بایستی از مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای کمتر باشد.

$$f_1 = \left| \frac{M_x}{S_1} \right| + \left| \frac{m_x}{s_t} \right| \quad (6)$$

$$f_2 = \left| \frac{M_x}{S_2} \right| + \left| \frac{m_x}{s_b} \right| \quad (7)$$

که M_x خمش اصلی و m_x خمش ثانویه در مقطع می‌باشد.

۳-۳- معیار برش

۳-۳-۱- معیار برش قائم

در محل سوراخ‌ها، برش موجود در مقطع سپری شکل تنش برشی قائم ایجاد می‌کند که توزیع این تنش برشی به صورت سهمی بوده و مقدار آن برابر است با:

$$(f_{vv})_{max} = \frac{V_x \times \bar{Q}}{I_t \cdot t_w} \leq F_v \quad (8)$$

که \bar{Q} لنگر مساحت حداکثر و I_t ممان اینرسی مقطع سپری شکل بوده و f_v حداکثر تنش مجاز آیین‌نامه است.

۳-۳-۲- معیار برش افقی

اگر یک گام سوراخ را در نظر بگیریم می‌توان دریافت که به دلیل تغییر در نیروهای محوری، نیروی برشی در فاصله مابین سوراخ‌ها ایجاد می‌گردد که مقدار آن برابر است با:

$$v_h = q.s \quad (9)$$

۳-۶- معیار تغییر شکل

تغییر شکل تیرهای سلولی در حالت کلی از دو قسمت تشکیل شده است.
 (۱) تغییر شکل ناشی از خمش خالص که با فرض تئوری خمشی ساده به دست می‌آید.
 (۲) تغییر شکل ناشی از برش، که این تغییر شکل اضافی، رفتار تیر را شبیه یک تیر ویراندیل می‌کند.
 لذا طبق مطالعات انجام شده می‌توان نوشت:

$$Y = C_1 L^3 + C_2 L \quad (14)$$

که جمله اول ($C_1 L^3$) نشان دهنده تغییر شکل‌های ناشی از خمش بوده و جمله دوم ($C_2 L$) تغییر شکل ناشی از برش را ارائه می‌کند. ضرایب C_1 و C_2 با استفاده از روش‌های تناسب منحنی بر اساس نوع بار و شرایط تکیه گاهی به دست می‌آیند. مطالعات انجام شده اخیر و اصلاح آنها تغییر شکل تیر لانه زنبوری تحت بار گسترده را از رابطه زیر مشخص خواهد نمود:

$$Y_{max} = \frac{5wL^4}{384E_{eff}I} \left(1 + \frac{48E_{eff}a_s}{5GAL^2} \right) \quad (15)$$

که در رابطه فوق Y_{max} تغییر شکل ماکزیمم تیر و E_{eff} سختی مؤثر تیر، که می‌تواند از مقدار متوسط مقادیر محاسبه شده در جان مقطع توپر و بازشو به دست آید، می‌باشد و G مدول برشی است. مطابق دیگر روابط L طول دهانه تیر و a_s ضریب برش است که از رابطه زیرین حاصل می‌شود.

$$a_s = \frac{A_{eff}}{A_{wmin}} \quad (16)$$

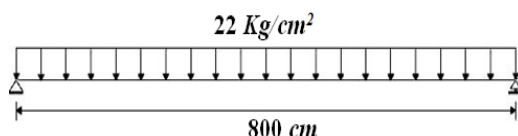
که A_{wmin} برابر حداقل مساحت جان مقطع تیر لانه زنبوری است.

۴- تحلیل و آنالیز عددی با نرم‌افزار Abaqus

در این بخش مثال‌های طراحی با استفاده از نرم‌افزار Abaqus که یک ابزار مناسب مهندسی به منظور بررسی و تحلیل به روش اجزای محدود می‌باشد، مورد تحلیل قرار می‌گیرند تا رفتار حاکم بر تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای و شش ضلعی ارزیابی گردد.

۴-۱- تیر لانه زنبوری ساخته شده از تیرورق با سوراخ‌های شش ضلعی و دایره‌ای

تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی و دایره‌ای با تکیه گاه‌های مفصلی و غلتکی در دو انتها و به طول ۸ متر، تحت اثر بار گسترده‌ای به بزرگی $(۸/۵، ۱۲/۷۵ و ۲۲)$ Kg/cm^2 قرار گرفته است. روند طراحی و آنالیز و اعمال محدودیت‌ها طبق آیین‌نامه AISCS به روش تنش مجاز صورت گرفته و مدول الاستیسیته فولاد برابر



شکل ۴- نمونه تیر لانه زنبوری تحت اثر بار گسترده

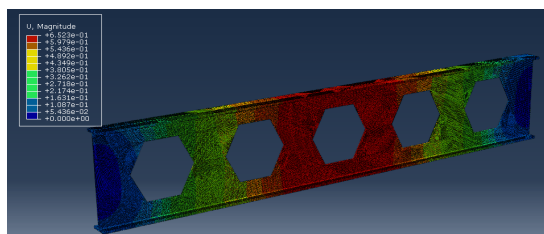
جدول ۱- نتایج حاصل از Abaqus در تیر ساخته شده از تیرورق

با سوراخ‌های شش ضلعی با دهانه ۸ متر		
بار وارده	حداکثر تغییر شکل مقطع	حداکثر تنش موجود در مقطع
۸/۵	۰/۶۵۲	۲۴۰۰
۱۲/۷۵	۱/۰۷	۲۴۰۰
۲۲	۳/۲۲	۲۴۰۰

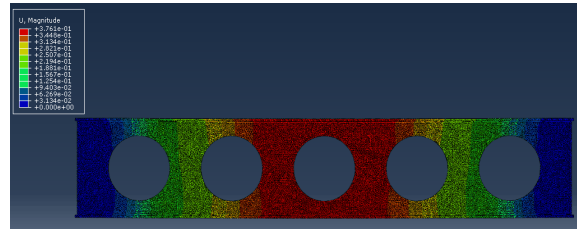
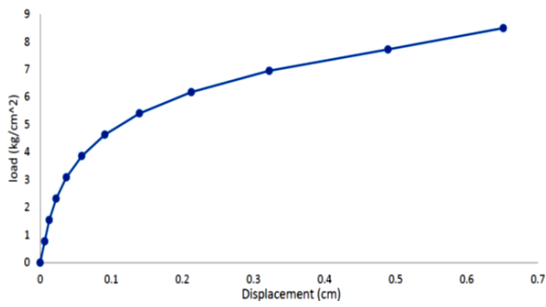
جدول ۲- نتایج حاصل از Abaqus در تیر ساخته شده از تیرورق

با سوراخ‌های دایره‌ای شکل با دهانه ۸ متر		
بار وارده	حداکثر تغییر شکل مقطع	حداکثر تنش موجود در مقطع
۸/۵	۰/۳۷۶	۲۴۰۰
۱۲/۷۵	۰/۷۸۶	۲۴۰۰
۲۲	۲/۹۴	۲۴۰۰

نمونه‌هایی از کانتور تغییر شکل و تنش مقطع در تیرهای لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی و دایره‌ای تحت اثر بارهای گسترده:

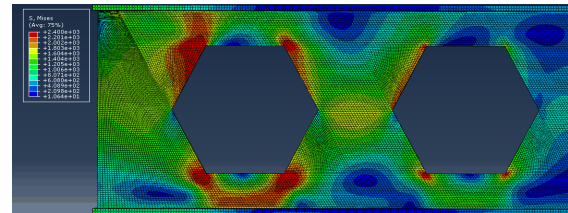
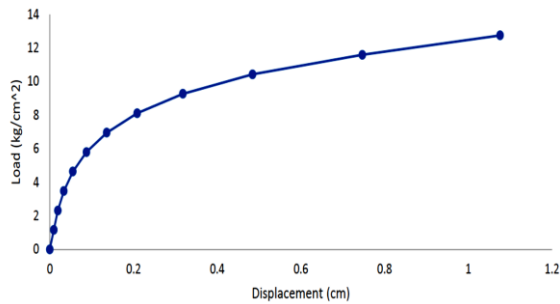


شکل ۵- تغییر شکل تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی تحت اثر بار ۸/۵



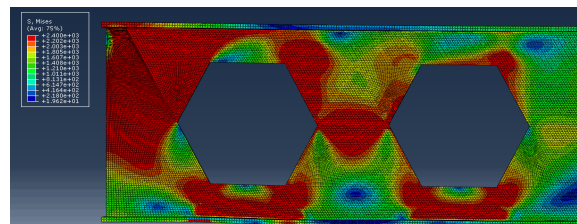
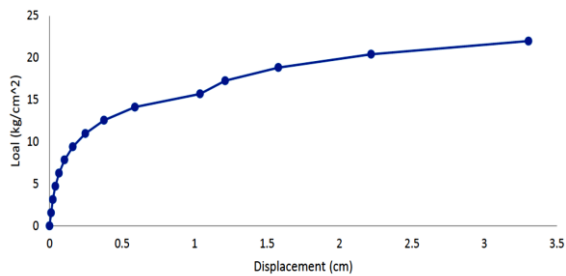
شکل ۶- تغییر شکل تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای
شکل تحت اثر بار ۸/۵

شکل ۱۱- نمودار بار- تغییر مکان تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های
شش ضلعی تحت اثر بار ۸/۵



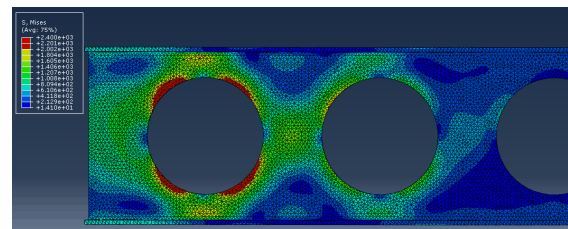
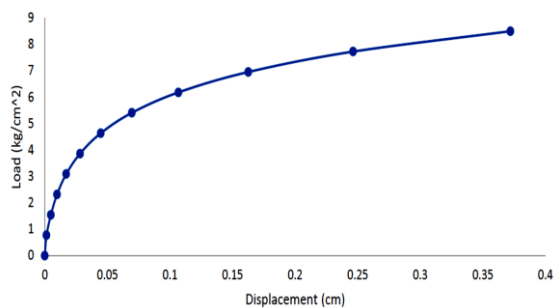
شکل ۷- تنش موجود در تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های شش-
ضلعی تحت اثر بار ۱۲/۷۵

شکل ۱۲- نمودار بار- تغییر مکان تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های
شش ضلعی تحت اثر بار ۱۲/۷۵



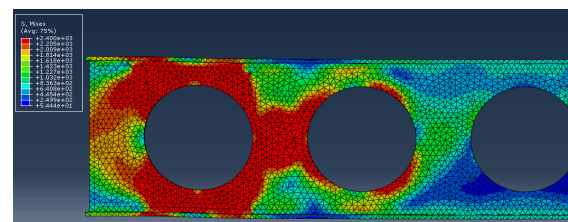
شکل ۸- تنش موجود در تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های شش-
ضلعی تحت اثر بار ۲۲

شکل ۱۳- نمودار بار- تغییر مکان تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های
شش ضلعی تحت اثر بار ۲۲



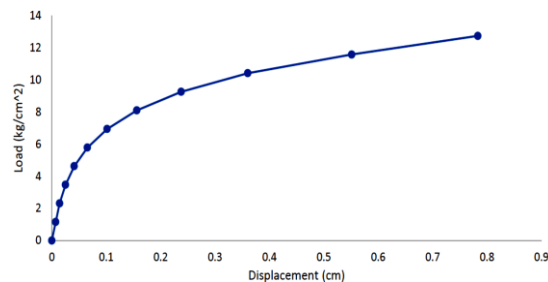
شکل ۹- تنش موجود در تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای
شکل تحت اثر بار ۸/۵

شکل ۱۴- نمودار بار- تغییر مکان تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های
دایره‌ای تحت اثر بار ۸/۵

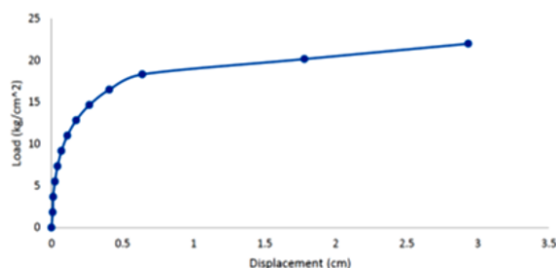


شکل ۱۰- تنش موجود در تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای
شکل تحت اثر بار ۲۲

- Erdal F, Saka MP, "Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams", Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80 355-368.
- Raftoyiannis I, Loannidis G, "Deflection of Castellated I-Beams under Transverse Loading", Journal of Steel Structures, 2006.
- Sevak D, "Stabilty of Castellated beam webs", PhD Thesis for master degree of engineering, 1999.
- Soltani MR, Bouchair A, Mimoune M, "NonlinearFE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams", Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70 101-114.
- Showkati H, Ghanbari Ghazijahani T, Noori A, Zirakian T, "Experiments on elastically braced castellated beams", Journal of Constructional Steel Research 2012, 77, 163-172.
- Ward JK, "Design of composite and non-composite cellular beams", The Steel Construction Institute Publication, 1990.



شکل ۱۵- نمودار بار- تغییر مکان تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای تحت اثر بار ۱۲/۷۵



شکل ۱۶- نمودار بار- تغییر مکان تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های دایره‌ای تحت اثر بار ۲۲

۵- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج تحلیل این نوع تیر تحت اثر بارهای گسترده مشاهده می‌شود که حداکثر تغییر شکل در قسمت میانی تیر به وقوع پیوسته است و همچنین در تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی نقاط مستعد شکست، نواحی تیز گوشه در سوراخ‌های نزدیک تکیه‌گاه‌ها می‌باشند. در گوشه‌های سوراخ‌ها تمرکز تنش و تسلیم شده‌گی به وفور مشاهده می‌شود. از سوی دیگر با بررسی نتایج ملاحظه می‌گردد که در بار بزرگ‌تر در تیر لانه زنبوری با سوراخ‌های شش ضلعی به دلیل وجود سوراخ یک جهش در مقادیر تغییر شکل ایجاد گردیده که دلیل آن را می‌توان کاهش ممان اینرسی در مقطع دانست. همچنین مقطع در قسمت اتصال مانند دو بخش جدا از هم عمل می‌کند. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که در تیر لانه زنبوری دایره‌ای شکل مقادیر تغییر شکل نسبت به تیر لانه زنبوری شش ضلعی کمتر بوده و با بررسی کانتور تنش به دلیل شکل مقطع مناسب‌تر می‌توان نتیجه گرفت که قسمت کمتری از مقاطع نسبت به تیر لانه زنبوری شش ضلعی به تنش تسلیم رسیده‌اند.

۶- مراجع

- Durif S, Bouchair A, "Behavior of cellular beams with sinusoidal openings", Steel Structures and Bridges 2012.

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Investigation on the Behavior of Castellated Plate Girders

Hedayat Veladi ^{a,*}, Mehrdad Shadfaran ^b, Seyed Farzad Yasrebi ^a

^a Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 05 December 2015; **Accepted:** 15 Marche 2017

Keywords:

Castellated Beams, Cellular Beams, Design Variables, Plate Girder, Finite element method.

1. Introduction

In the Civil Engineering field, we have to search a structure with lower weight and cost, to reach minimal energy and materials. Since using of Cellular and Castellated Beams can provide higher bending strength and stiffness without increasing the weight of the structure, therefore, in the recent years, they have lionized by most researchers. In some structures like bridges, in order to large stiffness and high strength, we have to use special beams with large dimensions and height. On the other hand, to solve this necessity, it is not possible to use hot-rolled Castellated Beams. So Castellated plate girders can be used. In this paper, it is denoted that castellated plate girders can be used in long spans as a convenient choice.

2. Methodology

2.1. Design criteria

Before starting numerical investigation on the behavior of these beams, we have to introduce a practical way to cut the W-sections and produce them. The proposed method of cutting and producing cellular and castellated beams has been shown in the article.

For designing of these beams, it is necessary to consider their strength and serviceability. So the geometrical parameters of cellular and castellated beams like length between the holes and number of them, the interaction of flexure and shear effects, vertical and horizontal shear, compression stress on the web, local buckling effect and displacement limitations have to be considered. The design procedure given here is taken from (AISC-ASD).

2.2. FEM model of numerical example

The FEM-based software, Abaqus, is used for the numerical modeling and analysis. In this process, the behavior of castellated plate girders will be investigated. So, castellated web plate with circular and hexagonal holes, length of 8 m, and pinned joints at its two ends which are respectively subjected to distributed loads of 8.5 kg/cm², 12.75 kg/cm² and 22 kg / cm², is used. All of restrictions are applied in accordance with the AISC-ASD. Results of analysis are summarized and presented in Tables 1 and 2.

Table 1. Numerical results of castellated plate girders

Loading (kg/cm ²)	maximum deflection (cm)	Maximum of stress (kg/cm ²)
8.5	0.652	2400
12.75	1.07	2400
22.5	3.22	2400

Table 2. Numerical results of castellated plate girders

Loading (kg/cm ²)	maximum deflection (cm)	Maximum of stress (kg/cm ²)
8.5	0.356	2400
12.75	0.786	2400
22	2.94	2400

3. Results and discussion

Considering the results under the effects of distributed loads, it is seen that by increasing the loading rate, the maximum deformation also enhances, and the maximum deflections occurs at the middle part of the beam. In addition, the deformation rate in cellular beams is lower than castellated one's. By investigation of stress contour, it can be concluded that near supports areas are failure candidates.

4. Conclusions

By investigation of this type of beams. It can be seen that in the castellated beams, the sharp corners of near supports holes are failure candidates. Also, a focus of stress and yielding can be noticed. In addition, results observe that under the larger load in a castellated beam, due to the presence of a hole, a mutation of deformation values was created. The reduction of the cross section inertia can be afforded mentioned phenomena. It should be noted that, in the cellular beams, deformations are lower than castellated one's, and more appropriate cross-sectional shape can provide that the smaller part of the cross sections reaches to yield stress.

5. References

- Erdal F, Saka MP, "Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams", *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 80 355-368.
- Showkati H, Ghanbari Ghazijahani T, Noori A, Zirakian T, "Experiments on elastically braced castellated beams", *Journal of Constructional Steel Research* 2012, 77, 163-172.
- Soltani MR, Bouchaïr A, Mimoune M, "NonlinearFE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams", *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 70 101-114.