دانشگاه صنعتی امیر کبیر(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد
تبیین مکانیزم شکست برشی در تیرورق های فولادی

نگارش
مریم شکیبا 85124125

استاد راهنما: آقای دکتر علی نیا

پائیز 87

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه

کارشناسی - ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی 7

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: مریم شکیبا — دانشجوی آزاد ● — بورسیه ○ — معادل ○

شماره دانشجوئی: 85124125 — دانشکده: مهندسی عمران و محیط زیست — رشته تحصیلی: مهندسی عمران گروه: سازه

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: محمد مهدی علی نیا — درجه و رتبه: دکترا- دانشیار

نام و نام خانوادگی: — درجه و رتبه:

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: — درجه و رتبه:

نام و نام خانوادگی: — درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : تبیین مکانیزم شکست برشی در تیرورق های فولادی

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Explicit Characteristic of Shear Failure Mechanism in Steel Plate Girders

نوع پروژه: کارشناسی○ — ارشد● — دکتر ا ○ — سال تحصیلی: پاییز 87

کاربردی ○ — بنیادی ○ — توسعه‌ای ○ — نظری ○

تاریخ شروع : پاییز 86 — تاریخ خاتمه : پاییز 87 — تعداد واحد :6 — سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه‌های کلیدی به فارسی: تیرورق فولادی، مکانیزم شکست برشی، مفصل پلاستیک، مقاومت نهایی

واژه‌های کلیدی به انگلیسی : steel plate girders; shear failure mechanism; plastic hinge; ultimate capacity

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات	تصویر ● جدول ● نمودار ● نقشه ○ واژه‌نامه ○	تعداد مراجع	تعداد صفحات ضمائم
	115		48	

زبان متن	فارسی ● انگلیسی ○	چکیده	فارسی ● انگلیسی ●

یادداشت

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

1 : **ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه**

2 : **ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)**

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

عنوان پروژه: تبیین مکانیزم شکست برشی در تیرورق های فولادی

چکیده: در ادبیات موجود تحلیل و طراحی تیر ورق ها، تئوری های متنوع و گاه متضادی در خصوص نحوه شکست برشی تیر ورق ها وجود دارد. در این پروژه با استفاده از روش اجزا محدود، تیر ورق های فولادی با اندازه های واقعی مدل سازی و رفتار آنها از مراحل الاستیک خطی و غیر خطی تا پلاستیک و شکست، تحلیل و رفتار آنها بررسی شده‌اند. هدف از انجام این تحلیل های عددی غیرخطی الاستوپلاستیک، تعیین چگونگی، زمان و مکان تشکیل مفاصل پلاستیکی که در آزمایش های تجربی مشاهده می‌گردند می‌باشد. در این تحقیق نشان داده شد که پانل‌های برشی به تنهایی نمایانگر تیرورق های واقعی نمی‌باشند و مکانیزم شکست برشی آنها را به درستی نشان نمی دهند. در ادامه با استفاده از مدل سازی تیرورق ها در چند دهنه متفاوت نشان داده شد که مفصل های پلاستیک برشی فقط در پانل های انتهایی تیرورق و به دلیل تغییر شکل های برشی تشکیل می شوند. سپس وضعیت تنش ها در دو سمت تیرورق در طول بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که بر خلاف تصور موجود که تنش های فشاری در مرکز تیرورق پس از کمانش افزایش پیدا نمی کنند، این تنش ها در هر دو سمت تیرورق افزایش می یابند. در مرحله بعد، زاویه میدان کششی تشکیل شده پس از کمانش مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که زاویه تابیدگی ایجاد شده در ورق جان تقریباً همان زاویه تنش های اصلی می باشد و این زاویه با مقادیر پیشنهاد شده در تئوری های مختلف مقایسه گردید و نشان داده شد که زاویه های به دست آمده از آنالیز های عددی بین زاویه تعریف شده توسط پورتر و زاویه 45 قرار دارند و نتایج بدست آمده از رابطه هوگلند بسیار کمتر از نتایج آنالیز های عددی می باشد. در نهایت مقاومت نهایی و محل تشکیل مفصل پلاستیک بدست آمده از نتایج محاسبات عددی با نتایج تئوری های مختلف و آیین نامه های مبتنی بر آنان مقایسه گردید و نشان داده شد که تئوری باسلر و آیین نامه های منطبق بر آنان و تئوری هوگلند بهترین همخوانی را با نتایج محاسبات عددی دارند.

کلید واژه: تیرورق فولادی، مکانیزم شکست برشی، مفصل پلاستیک، مقاومت نهایی.

فهرست

لیست علامت ها..... 1

فصل اول: دیباچه

1-1 مقدمه..... 3

2-1 مروری بر کارهای انجام شده..... 5

3-1 روش تحقیق..... 8

فصل دوم: کمانش برشی تیرورق ها

2-1 مقدمه..... 10

2-2 کمانش برشی صفحات..... 12

2-2-1 انواع کمانش..... 12

2-2-2 کمانش ارتجاعی..... 12

2-2-3 کمانش غیر ارتجاعی..... 14

2-2-4 روش دقیق محاسبه بار کمانش برشی صفحات..... 14

2- 2-5 روشهای تقریبی محاسبه بار کمانش صفحات..... 16

- مقدمه..... 16

- روشهای انرژی..... 17

الف) روش رایلی ریتز..... 18

ب) روش گالرکین..... 20

3-2 مقاومت پس از کمانش صفحات و تیرورق ها..... 23

1-3-2 مقدمه..... 23

2-3-2 تئوری واگنر (Wagner 1931)..... 26

3-3-2 تئوری باسلر (Basler 1961) 28

4-3-2 تئوری تاکئوچی (Takeuchi 1964) 30

5-3-2 تئوری فوجی (Fujii 1968a,b-1971) 31

6-3-2 تئوری کوماتسو (Komatsu 1971) 32

7-3-2 تئوری چرن و استاپنکو[7] (Chern and Ostapenko1969)..... 33

8-3-2 تئوری پورتر (Porter) 34

9-3-2 تئوری هوگلند (Hoglund 1971a,b-1973) 36

10-3-2 تئوری هرزاگ[5] (Herzog1974a,b) 40

2-3-11 تئوری کلارک و شارپ[10] (Clark and Sharp1971)..... 41

2-3-12 تئوری اشتاینهارد و شروتر (Steinhardt and Schroder1971)..... 42

فصل سوم: روش اجزا محدود

3-1 مقدمه..... 43

3-2 گامهای اساسی روش اجزا محدود..... 44

3-3 کاربرد روش اجزای محدود در تحلیل سازه های صفحه‌ای..... 44

- روش اجزای محدود..... 44

3-4 قابلیت های نرم افزارهای **ABAQUS** 45

3-4-1 روشهای تحلیل..... 47

الف- آنالیز استاتیکی خطی (Static General) 47

ب- آنالیز غیر خطی(Static Riks) 47

1- روشهای حل مسائل غیر خطی در برنامه ABAQUS..... 48

2- رفتار غیر خطی ماده..... 48

3- رفتار غیر خطی هندسی..... 49

ج- آنالیز کمانش (Buckling Analysis) 49

- آنالیز کمانش خطی (مقادیر ویژه) (Eigen Buckling)..... 50

5-3 معرفی شرایط پروژه ونحوه مدل سازی نمونه ها در نرم افزار ABAQUS 50

1-5-3 سیستم واحد..... 50

2-5-3 المان های مورد استفاده..... 50

- المان صفحه ای پلاستیک..... 50

3-5-3 مصالح 51

4-5-3 نحوۀ اعمال بار بر نمونه ها..... 52

5-5-3 شرایط مرزی 52

6-5-3 معیارهای همگرائی در برنامه ABAQUS..... 54

7-5-3 سختی ناشی از تنش و کاربرد آن در پروژه..... 55

8-5-3 تحلیل پلاستیک..... 56

1- معیار تسلیم..... 56

2- قانون جاری شدن..... 57

3- قانون سخت شوندگی..... 58

- افزایش کرنش پلاستیک..... 58

9-5-3 معیارهای گسیختگی..... 59

1- فرضیهٔ تنش برشی ماکزیمم..... 60

2- فرضیهٔ انرژی کرنشی ماکزیمم..... 61

3- فرضیهٔ انرژی واپیچش ماکزیمم..... 61

4- فرضیهٔ تنش برشی هشت وجهی..... 62

- نتایج آنالیز گسیختگی..... 63

10-5-3 آنالیز حساسیت..... 63

فصل چهارم: شکست برشی تیرورق ها

1-4 مقدمه..... 66

2-4 بررسی پانل برشی تحت برش خالص..... 67

1-2-4 انتخاب مدل برای بررسی شکست برشی..... 69

2-2-4 مقایسه تیرورق با 2 و 4 پانل..... 71

3-4 شکست تیرورق ها..... 75

1-3-4 تعیین مرز میان شکست برشی و خمشی در تیرورق ها..... 78

4-4 چگونگی تشکیل مفصل پلاستیک در تیرورق ها..... 80

1-4-4 تاثیر End Post بر شکست برشی تیرورق ها..... 82

- طراحی اجزای End Post بر طبق آیین نامه EURO CODE..... 85

5-4 زمان تشکیل مفصل پلاستیک در تیرورق ها..... 87

6-4 محل تشکیل مفصل پلاستیک در تیرورق ها..... 88

7-4 بررسی تغییرات نیروهای اصلی در طول بارگذاری..... 90

فصل پنجم: مقایسه نتایج با تئوری های مختلف

1-5 مقدمه..... 96

2-5 محل تشکیل مفصل پلاستیک..... 97

3-5 مقایسه زاویه میدان کششی..... 100

4-5 مقایسه نتایج مقاومت نهایی..... 104

فصل ششم: نتیجه گیری..... 110

فهرست منابع و مراجع..... 112

لیست علامت ها

A_w	مساحت مقطع جان
a	بعد بزرگتر ورق
b	بعد کوچکتر ورق
b_f	عرض بال تیرورق
C_V	نسبت تنش کمانش برشی الاستیک به تنش برشی جاری شدن
c	فاصله بین مفصل خمشی از سخت کننده در بال
D_i	تغییر مکان در درجات آزادی سازه
D	عمق جان
d_0	فاصله بین دو سخت کننده
E	مدول الاستیسیته فولاد مصرفی
$f_{y(w)}$	تنش جاری شدن فولاد (جان تیرورق)
f_{yf}	تنش تسلیم بال تیرورق
g_i	توابع شکل مستقل
K_t	ماتریس سختی مماسی
k	ضریب کمانش برشی
$M_{pl,w}$	مقاومت لنگر پلاستیک در جان
$M_{pl,f}$	ممان پلاستیک بال تیرورق حول محور ضعیف
m_{pb}	لنگر پلاستیک بال بالایی
m_{pt}	لنگر پلاستیک بال پایینی
N_h	نیروی طولی موجود در جان در مرحله بعد از کمانش

N_{xy}	نیروی برشی وارد بر ورق
s	عرض ناحیه تسلیم جان
t_w	ضخامت جان ورق
t_f	ضخامت بال تیرورق
t	ضخامت ورق
U	انرژی تغییر شکل سازه (انرژی کرنشی)
V	انرژی پتانسیل کل سازه
V_u	نیروی برشی نهایی
V_{cr}	نیروی برشی بحرانی کمانش الاستیک
V_{pb}	نیروی برشی پس از کمانش
W	انرژی پتانسیل نیروهای خارجی وارده به سازه
w	تابع تغییر شکل
x	محور طولی صفحه
y	محورعرضی صفحه
z	محورقائم صفحه
α	نسبت جانبی پانل جان
g_{M1}	ضریب نسبی مقاومت به ناپایداری
h	ضریب افزایش مقاومت برشی در لاغری های کوچک جان
θ	زاویه میدان کششی قطری
θ_d	زاویه قطر پانل جان
υ	ضریب پواسون
σ_t	تنش میدان کششی قطری

τ_{cr}	تنش برشی بحرانی کمانش الاستیک
τ_y	تنش برشی تسلیم
φ	نسبت طول به عرض ورق

فصل اول

دیباچه

1-1 مقدمه

با ازدیاد طول دهانه و نیاز به حمل بار بیشتر در پل ها و سازه های بزرگ، مقدار لنگر خمشی و نیروی برشی افزایش یافته و نیمرخ های نورد شده جوابگو نمی باشند. برای رفع این نقیصه چند راه برای طراح وجود دارد:

1. تقویت نیمرخ های نورد شده با استفاده از ورق و یا نیمرخ های دیگر.
2. استفاده از انواع خرپا.
3. استفاده از تیرورق.

راه حل اول که گاهی از لحاظ ساخت ممکن است اقتصادی نیز باشد به علت محدودیت ظرفیت لنگر خمش نمی تواند به عنوان یک راه حل کلی مورد استفاده قرار گیرد.

استفاده از سازه های خرپایی و همچنین استفاده از تیرورق دو راه حلی هستند که می توانند هم ارز یکدیگر مورد استفاده قرار گیرند. ولی مزایای زیر باعث شده اند که امروزه استفاده از تیرورق ها رواج بیشتری پیدا کند:

1. پیشرفت فن جوشکاری و همچنین استفاده از جوشکاری اتوماتیک در ساخت تیرورق ها از یک طرف و هزینه و مشکلات زیاد اجرای اتصالات در سازه های خرپایی از طرف دیگر تمایل زیادی برای استفاده از تیرورق ها به وجود آورده است.

2. ظاهر زیبا و ارتفاع کمتر تیرورق ها در مقایسه با سیستم های خرپایی.

3. امکان استفاده از مزایای مقطع مرکب فولاد و بتن با نصب اتصالات برشی در بال فوقانی تیرورق ها که در سازه های خرپایی امکان آن وجود ندارد.

با توجه به موارد فوق امروزه تیرورق ها به نحو گسترده ای به عنوان تیر های اصلی در سالن های صنعتی با دهانه بزرگ و یا در پل های جاده و راه آهن مورد استفاده قرار می گیرند.

بنابر این محاسبه و استفاده از ظرفیت کامل تیرورق ها سال هاست که موضوع مورد بحث مهندسین عمران است. تیرورق ها معمولا از دو ورق بال و یک ورق جان تشکیل می شوند که بال ها در مقابل خمش و ورق جان در مقابل برش مقاومت می کنند و به منظورهای خاص سخت کننده هایی به صورت عرضی و طولی در جان آنها تعبیه می شود. در گذشته که تکنیک جوشکاری پیشرفت زیادی نکرده بود برای اتصال ورق های جان و بال به یکدیگر از پرچ استفاده می شد که در این صورت لازم بود که در محل اتصال بال و جان از دو نبشی استفاده کنند. امروزه با پیشرفت فن جوشکاری تمایل کمتری برای استفاده از پرچ وجود دارد. در این حالت بال و جان بدون هیچ واسطه ای به یکدیگر جوش می شوند که این مسئله باعث کاهش وزن تمام شده تیرورق می شود. گاهی مواقع تیرورق ها به صورت جعبه ساخته می شوند. نوع فولاد جان و بال در اغلب موارد یکی است ولی گاهی مواقع برای کاهش هزینه ها بال تیرورق را از فولاد پر مقاومت انتخاب می کنند در این حالت به تیرورق بدست آمده تیرورق دوگانه می گویند.

برای افزایش مقاومت خمشی تیرورق ها، سعی می شود فاصله بین دو بال بیشتر در نظر گرفته شود. این فاصله توسط جان پر شده که برای کاهش وزن و هزینه از ورق های نازک برای ساخت جان تیرورق ها استفاده می شود.

پس یکی از وظایف اصلی جان تیرورق ها دور نگه داشتن بال های تیرورق از یکدیگر می باشد. بنابر این از آنجایی که در تیرورق ها با سطوح بزرگی از ورق با ضخامت کم روبرو هستیم بزرگترین مسئله ای که در طراحی با آن روبرو می شویم ناپایداری ارتجاعی یا کمانش این ورق ها می باشد. این ناپایداری ها به دو قسمت عمدهء ناپایداری بال فشاری تیرورق و ناپایداری جان تیرورق تقسیم می شود که در طراحی یک تیرورق تمامی موارد باید با استفاده از روش منطقی کنترل گردد، به دلیل لاغری جان، جان در مراحل اولیه بارگذاری کمانش می کند بنابراین یکی از عوامل کنترل کننده این ناپایداری ها کمانش برشی جان تیرورق می باشد. پانل های جان معمولا به وسیله تعدادی سخت کننده طولی و عرضی برای افزایش بار بحرانی کمانش تقویت می شوند[1-3]و یک طراحی بهینه شامل پیدا کردن ترکیبی مناسب و بهینه از ضخامت پانل جان و فاصله بین سخت کننده ها می باشد. البته کمانش جانبی- پیچشی تیرورق ها از مسائل مهم دیگر ناپایداری این گونه سازه ها است که خارج از محدوده بحث در این پایان نامه می باشد.

2-1 مروری بر کارهای انجام شده

سالهای زیادی است که محققین پی برده اند که کمانش الاستیک به معنای اتمام باربری ورق ها نیست. زمانی که یک ورق به صورت صحیح طراحی شود، پس از کمانش الاستیک باربری آن متوقف نشده بلکه با تغییر مکانیزم باربری ادامه پیدا می کند. ظرفیت پس از کمانش ورق ها می تواند تا چندین برابر ظرفیت الاستیک بالغ گردد.

از آنجا که بحث اصلی این پایان نامه شکست برشی تیرورق ها می باشد، تمرکز کارها بر روی کمانش برشی و شکست برشی جان تیرورق ها است.

ویلسون [4] برای اولین بار مقاومت پس از کمانش را در جان تیر ورقها مورد بررسی قرار داد. واگنر [5] با بررسی پانل های برشی نازک آلومینیومی که در صنعت هواپیما سازی استفاده می شد، نشان داد که اگر این پانل های نازک دارای اعضای مرزی صلب باشند، پس از کمانش می توانند با تغییر مکانیزم باربری به میدان کششی قطری همچنان به باربری ادامه دهند. بر اساس این تئوری که به تئوری میدان کششی قطری یکنواخت کامل مشهور

است، واگنر توانست مقاومت برشی پانلهای برشی نازک آلومینیومی را محاسبه نماید. این مقاومت به علت نازکی زیاد پانلها عمدتاً وابسته به مقاومت پس از کمانش آنها بود.

سپس پانل هایی مورد بررسی قرار داده شد که مقاومت برشی آنها متاثر از مقاومت کمانش الاستیک و مقاومت پس از کمانش آنها بود و با این بررسی تئوری میدان کششی قطری محدود ارائه شد. در تئوری میدان کششی محدود بر خلاف تئوری میدان کششی کامل، میدان کششی در بخش محدودی از پانل گسترش می یابد.

پس از واگنر، باسلر [6-9] با ارائه مدلی بر اساس تئوری میدان کششی قطری محدود توانست مقاومت برشی تیرورق های فولادی جوش شده نورد گرم را محاسبه نماید. در این مدل باسلر فرض کرد که بال های تیرورق دارای سختی کافی جهت مهار میدان کششی نبوده و لذا میدان کششی دور از بال ها و در تماس با سخت کننده ها تشکیل می شود. لازم به ذکر است که اساس روابط محاسبه مقاومت برشی تیر ورقها در آیین نامه های طراحی سازه های فولادی آمریکا (**AISC** 1999) [10]، (**AASHTO**) [11] و طراحی حدی سازه های فولادی کانادا (**CSA-S16-01**) [12] بر مطالعات باسلر استوار است.

پورتر و همکاران [13] بر خلاف باسلر مدل دیگری را بر اساس تئوری میدان کششی قطری محدود ارائه کردند که بر اساس آن مقاومت نهایی برشی صفحه جان زمانی فرا می رسد که مفصل های خمشی در بال های تیر ورق به دلیل میدان کششی قطری تشکیل شود. این مدل به مدل راکی یا کاردیف (**Rockey or Cardiff Model**) مشهور است و بطور مستقل اساس محاسبه مقاومت برشی تیرورقها در آیین نامه **BS 5400** (1982) [14] را تشکیل می دهد. لازم به ذکر است که هر دو مدل باسلر و پورتر، مقاومت برشی پس از کمانش تیرورقها را در وضعیت برش خالص به طور مناسبی برآورده می نمایند.

علاوه بر باسلر و پورتر، تاکئوچی [15] و هرزوگ [16و17] نیز بر اساس تئوری میدان کششی قطری ناقص، مقاومت پس از کمانش پانل های برشی را بررسی نمودند. البته لازم به ذکر است که گیلورد [۱۸] نشان داده که در حقیقت باسلر از تئوری میدان کششی قطری یکنواخت برای محاسبه مقاومت برشی تیرورق استفاده کرده است.

محققین دیگری مانند فوجی [19و20]، کوماتسو [21] و چرن و استاپنکو [22] فرض کردند که میدان کششی قطری در تمام پانل گسترش می یابد ولی مقدار آن در راستای عمود بر کشش قطری متغیر است.

اشتاینهارت و شروتر [23] نیز فرض کردند که میزان گسترش میدان کششی قطری در پانل مابین دو فرض بالا می باشد.

تئوری میدان کششی قطری از سال 1961 توسط باسلر در طراحی تیرورق ها استفاده گردید در سال های اخیر نیز مفهوم میدان کششی قطری توسط محققین زیادی در کانادا، آمریکا، بریتانیا، کره جنوبی و ایران مورد بحث و بررسی قرار گرفته است که در فصل های بعدی اشاره می شوند.

اگر چه تئوری های مختلف الگوهای میدان های کششی مختلفی را پیشنهاد کردند اما فرض اساسی که تنش های فشاری که در جهت عمود بر تنش های کششی قطری گسترش پیدا می کنند پس از کمانش برشی پانل جان افزایش پیدا نمی کنند. اعمال این فرض اساسی در تمام پانل جان به تئوری مشهور دیگری منجر می شود که بال ها و سخت کننده ها باید در مقابل تنش های میدان کششی ایجاد شده در تیرورق های با سخت کننده مقاومت کنند تا پانل جان بتواند به بیشینه مقدار مقاومت پس از کمانش خود برسد.

پس از بیان تئوری های مختلف، افراد بسیاری رفتار تیرورق ها را مورد توجه قرار دادند. مارش [24] بیان کرد که بر خلاف فرض اساسی واگنر، تنش های فشاری قطری در گوشه های جان بعد از کمانش الاستیک همراه با تنش های کششی افزایش پیدا می کنند، اما او عقیده داشت که بال ها از طریق سختی خمشی خود بر مقاومت پس از کمانش تاثیر داشته و بر توزیع میدان کششی تاثیر می گذارند. لی و یو[25-29] تحقیقاتی را انجام دادند که نشان می داد شرایط مرزی اتصال جان به بال بر خلاف فرضیات تئوری های موجود، از نظر سختی پیچشی به شرایط گیرداری نزدیک تر بوده و رابطه ای را برای تعیین ضریب کمانش در این حالت ارائه کردند. سپس آنها تحقیقاتی را روی مقاومت نهایی تیرورق ها انجام داده و نشان دادند که در تیرورق های مورد استفاده در مهندسی عمران روابط ارائه شده توسط باسلر و پورتر مقاومت نهایی را با تقریب خوبی پیش بینی می کند. آنها همچنین نشان دادند که بال ها و سخت کننده ها در تیرورق لزوماً به صورت گیردار عمل نمی کنند. لی و همکاران[28] روشی را با عنوان سلول برشی برای تحلیل تفاوت بین دانسته های گذشته و یافته های جدید که بال ها و سخت

کننده ها به صورت گیردار عمل نمی کنند، مطرح کردند. این روش همچنان بر پایه فرض اساسی عدم افزایش تنش فشاری استوار بود. در ادامه آنها با مرور روش خود دریافتند که این روش دارای خطای بزرگی می باشد. سپس یک سری تحقیقات بر پایه آنالیز اجزا محدود غیر خطی انجام شد که نشان می داد نیروی محوری بزرگی که انتظار می رود در سخت کننده به وجود بیاید در واقعیت وجود ندارد.

تئوری های مختلف بیان شده به درستی نمایانگر مقاومت نهایی تیر ورق نمی باشند زیرا پس از کمانش و تغییر شکل های بزرگ خارج از صفحه آنها تحت تاثیر تنش های خمشی ثانویه بزرگی قرار می گیرند که در دو سمت صفحه با هم متفاوت می باشند[30]. بنابر این اگرچه تئوری های مختلف تنش بحرانی کمانش پانل ها را در نتیجه در نظر نگرفتن سختی پیچشی اعضای مرزی کمتر از میزان واقعی بدست می آورند، مقاومت نهایی بیشتری از حد واقعی به دلیل تخمین بیشتر مقاومت پس از کمانش به دست می آورند[31،29و32].

تعامل بین تنش های برشی غیر خطی و تنش های نرمال که از لحظه کمانش برشی آغاز می شوند به اندازه ای پیچیده بوده اند که هر گونه تلاش برای بیان آنها به نظر ناموفق می آید. وجود تعداد زیاد تئوری در این زمینه گویای این واقعیت می باشد. هدف از انجام این پروژه و تحلیل های عددی غیرخطی الاستوپلاستیک، تعیین چگونگی، زمان و مکان تشکیل مفاصل پلاستیکی که در آزمایش های تجربی مشاهده می‌گردند می‌باشد. جنبه های دیگر رفتار ورق های برشی مانند قابلیت تغییر شکل پذیری، سختی و کاهش مقاومت در نتیجه خستگی قبلا توسط علی نیا و همکاران[32-35] بررسی شده است.

3-1 روش تحقیق

هدف از این تحقیق تبیین مکانیزم شکست برشی در تیر ورق های فولادی می باشد.

در فصل اول کلیاتی در مورد تیر ورق ها و تئوری های مختلف شکست آنها آورده شده است.

فصل دوم به بررسی کمانش برشی تیر ورق ها، روش های دقیق و تقریبی تعیین آن و همچنین تئوری های مختلفی که در این زمینه وجود دارد می پردازد.

فصل سوم به کاربرد روش اجزاء محدود در تحلیل ورق ها و معرفی نرم افزار ABAQUS [36] اختصاص داده شده است.

فصل چهارم به بررسی و تبیین مکانیزم شکست برشی تیرورق ها می پردازد.

فصل پنجم به مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تئوری های مختلف موجود می پردازد.

فصل ششم جمع بندی موارد مطرح شده می باشد.

فصل دوم

کمانش برشی تیرورق ها

2-1 مقدمه

در تیرورق ها با سطوح بزرگی از ورق با ضخامت کم روبرو هستیم و بزرگترین مسئله ای که در طراحی با آن روبرو می شویم ناپایداری این ورق ها می باشد. انواع ناپایداری های موضعی که در بررسی یک تیرورق با آن مواجه می شویم به صورت زیر می باشند:

الف: ناپایداری های بال فشاری تیرورق

1. کمانش جانبی بال فشاری
2. کمانش پیچشی بال فشاری
3. کمانش قائم بال فشاری