

## فصل اول

# مقدمه و تاریخچه

## ۱-۱ - نمای تاریخی:

حل مسائل الاستیک- پلاستیک و خزش در استوانه‌ها، به سال‌های بسیار دور باز می‌گردد اما در این مرور فقط به کارهای انجام شده در دو دهه گذشته می‌پردازیم و در خاتمه این بخش تفاوت این تحقیق با کارهای انجام شده را بیان می‌کنیم.

لقمان و وهاب<sup>۱</sup> [۱] در سال ۱۹۹۴ تحلیل الاستیک- پلاستیک در استوانه‌های جدار ضخیم از جنس ماده‌ای با سختی کرنشی تحت تاثیر فشار داخل و گرادیان دما را ارائه کردند. در این تحقیق که به منظور بررسی تنش‌های پسماند ناشی از بارگذاری و باربرداری استوانه‌های جدار ضخیم انجام گرفته بود از معادله ساختاری یک بعدی فولاد آلیاژی SUS۳۰۴ که بصورت آزمایشی بدست آمده، استفاده شده است. در سال ۲۰۰۲ لیوری<sup>۲</sup> و لازارین<sup>۳</sup> [۲] حل تحلیلی برای توزیع تنش‌های پسماند ناشی از پروسه اتوفرتاژ<sup>۴</sup> در استوانه‌های جدار ضخیم ارائه نمودند. معادله ساختاری آنها برای رفتار الاستیک- پلاستیک ماده نوع اصلاح شده‌ای از قانون رامبرگ و اوسگود<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده بود که در باربرداری از آن اثر باوشینگر<sup>۶</sup> لحاظ شده بود. در سال ۲۰۰۳ قربانپور و لقمان [۳] به تحلیل الاستیک- پلاستیک استوانه‌های جدار ضخیم پرداختند. هدف آنها در این تحلیل بررسی تاثیر پدیده باوشینگر بر روی تنش‌های پسماند در استوانه‌های جدار ضخیم بود. در سال ۲۰۰۳ قربانپور و لقمان [۴] تاثیر سختی کرنشی<sup>۷</sup> و پدیده باوشینگر را بر روی تنش‌های پسماند بررسی نمودند. بطور کلی در مسائل مربوط به تنش‌های پسماند در استوانه‌های جدار ضخیم تحلیل‌های الاستیک- پلاستیک مورد نیاز است. در سال ۲۰۰۳ جوزف پری<sup>۸</sup> و همکارش [۵] به تحلیل الاستیک- پلاستیک استوانه‌های جدار ضخیم پرداختند. هدف آنها نیز بررسی تنش‌های پسماند ناشی از پروسه اتوفرتاژ

<sup>۱</sup> - Loghman and Wahab

<sup>۲</sup> - Liveri

<sup>۳</sup> - Lazarin

<sup>۴</sup> - Autofrettage

<sup>۵</sup> - Ramberg and Osgood

<sup>۶</sup> - Bauschinger Effect

<sup>۷</sup> - Hard Strain

<sup>۸</sup> - Josef Perry

در لوله‌های توپ و طراحی بهینه آنها بود. در همان سال ۲۰۰۳ ژائو<sup>۱</sup> و همکارانش [۶] نیز با قطعه قطعه خطی فرض کردن منحنی تنش- کرنش به تحلیل الاستیک- پلاستیک و تنش‌های پسماند در استوانه‌های جدار ضخیم پرداختند. به موازات تحلیل‌های الاستیک- پلاستیک تحلیل‌های خزشی نیز ادامه یافت. در سال ۱۹۹۶ لقمان و وهاب [۷] خزش در لوله‌های جدار ضخیم بخار را بررسی کردند. در این تحقیق از روش تقریب متوالی مندلسون<sup>۲</sup> به این صورت استفاده شده است که نمو‌های کرنش خزشی در بازه‌های کوچک زمان تخمین زده می‌شوند و با این تخمین‌ها معادلات تعادل و سازگاری و تنش کرنش مانند هر مسئله الاستیکی حل می‌شود و تنش‌ها بدست می‌آیند و سپس تنش موثر فان میسر<sup>۳</sup> محاسبه می‌شود. با استفاده از معادله ساختاری خزشی رفتار ماده نرخ کرنش خزشی موثر بدست می‌آید و با استفاده از معادلات پراندتل-روس نرخ کرنش‌های خزشی بدست می‌آیند و با توجه به بازه زمانی انتخاب شده مقادیر جدیدی برای هر یک از کرنش‌های نمو خزشی بدست می‌آید که با مقادیر تخمینی مقایسه می‌شود و تا آنجا تکرار می‌شود که همگرایی حاصل شود. مهمترین تفاوت کار لقمان و وهاب با کارهای قبلی در این بود که آنها برای نخستین بار از یک معادله ساختاری خزشی به نام گستره تتا<sup>۴</sup> ( $\theta$ ) استفاده نمودند که رفتار خزشی ماده را تا شکست پیش بینی می‌نماید و لذا حل آنها کل مراحل خزش اولیه<sup>۵</sup> و ثانویه<sup>۶</sup> و ثالثیه<sup>۷</sup> را تا شکست شامل می‌شود و برای حالت خاصی مانند خزش پایدار نیست. علاوه بر آن با توجه به پیش بینی شکست ماده در معادله ساختاری و در دست بودن کل تاریخچه تنش‌ها و کرنش‌ها آنها موفق شدند توزیع آسیب‌های خزشی را در ضخامت لوله برحسب زمان نشان دهند.

---

<sup>۱</sup> - Zhao

<sup>۲</sup> - Mendelssohn

<sup>۳</sup> - Von-Mises

<sup>۴</sup> - Theta Projection

<sup>۵</sup> - Primary Creep

<sup>۶</sup> - Secondary Creep

<sup>۷</sup> - Tertiary Creep

در سال ۲۰۰۰ یانگ<sup>۱</sup> [۸] رفتار الاستیک و خزشی استوانه‌ای را مورد مطالعه قرار داد که دارای پوشش نازکی از کامپوزیتهای مواد درجه بندی شده تابعی<sup>۲</sup> بود. کرنش کل شعاعی، مماسی و محوری جمع کرنش‌های الاستیک و خزشی در نظر گرفته شده (کرنش‌های حرارتی لحاظ نگردیده) و با انتخاب معادله نورتن<sup>۳</sup> برای رفتار خزشی یک بعدی ماده بصورت  $\dot{\epsilon}_e = D(r)\sigma_e^{N(r)}$  نرخ کرنش‌های خزشی شعاعی و محوری از طریق معادلات پراندتل روس<sup>۴</sup> به رفتار یک بعدی ماده ارتباط داده شده است و در مورد نرخ کرنش محوری دو حالت کرنش صفحه‌ای<sup>۵</sup> با  $\dot{\epsilon}_z = 0$  و کرنش صفحه‌ای عمومی<sup>۶</sup> با  $\dot{\epsilon}_z = \text{const}$  در نظر گرفته شده است. روابط تنش-کرنش بصورت نرخ کرنش‌ها برحسب نرخ تنش‌ها و رفتار یک بعدی ماده استفاده شده و معادلات دیفرانسیل تعادل و سازگاری نیز به ترتیب برحسب نرخ تنش‌ها و نرخ کرنش‌ها معرفی گردیده است. عینا مانند حل مسائل الاستیک استوانه در کتب کلاسیک نرخ کرنش‌ها از روابط تنش-کرنش برحسب نرخ تنش‌ها در روابط سازگاری جایگذاری شده و سپس با استفاده از معادله تعادل برحسب نرخ تنش‌ها معادله دیفرانسیل برحسب نرخ تنش شعاعی بدست آمده که از حل آن ابتدا نرخ تنش شعاعی و بدنبال آن نرخ تنش مماسی بدست آمده و از شرط کرنش صفحه‌ای و یا کرنش صفحه‌ای عمومی نرخ تنش محوری تعیین شده است با تعیین نرخ تنش‌ها توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی و محوری بصورت تابعی از شعاع و زمان بصورت عددی با انتخاب بازه‌های زمانی کوچک قابل محاسبه است:

$$\sigma_{ij}^{(i)}(r, t_i) = \sigma_{ij}^{(i-1)}(r, t_{i-1}) + \dot{\sigma}_{ij}^{(i)}(r, t_i)\Delta t^{(i)}$$

در سال ۲۰۰۲ جباری، سهراب پور و اسلامی [۹] به مطالعه تنش‌های حرارتی و مکانیکی در استوانه توخالی ساخته شده از مواد FGM تحت بارهای متقارن شعاعی پرداخته‌اند. آنان تحلیل کلی تنش‌های حالت پایدار یک بعدی در استوانه توخالی ضخیم FGM را بررسی کرده اند و حل تحلیلی برای محاسبه تنش‌های

<sup>۱</sup> - Yang

<sup>۲</sup> - Functionally Graded Materials (FGM)

<sup>۳</sup> - Norton Equation

<sup>۴</sup> - Prantel roos

<sup>۵</sup> - Plane Strain

<sup>۶</sup> - Generalized Plan Strain

مکانیکی و حرارتی متقارن محوری در استوانه فوق الذکر ارائه داده اند. توزیع دما را تابعی از شعاع فرض کرده‌اند و شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی کلی را در امتداد سطوح داخلی و خارجی در نظر گرفته‌اند. خواص ماده به غیر از نسبت پواسن<sup>۱</sup> را وابسته به متغیر  $r$  پنداشته‌اند و این خواص را بعنوان توابع توانی  $r$  بیان کرده اند. از روش مستقیم برای حل معادلات انتقال حرارت و ناویر استفاده کرده‌اند. در این تحقیق گرچه تنش‌های حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت اما خزش مورد بررسی قرار نگرفت.

در سال ۲۰۰۷ یو<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۰] خزش حالت پایدار در استوانه FGM را تحت تاثیر فشار داخلی مورد بررسی قرار دادند. آنها معادله ساختاری رفتار ماده را معادله نورتون به صورت  $\dot{\epsilon}_e = B(r)\sigma_e^{n(r)}$  انتخاب نمودند و با قرار دادن این معادله ساختاری در رابطه پراندتل-روس نرخ کرنش‌های خزشی شعاعی و مماسی را برحسب تنش‌ها و تنش موثر و ضرایب رفتاری ماده بدست آوردند. در عین حال با انتخاب کرنش صفحه‌ای تنش محوری را نیز برحسب تنش‌های شعاعی و مماسی جایگزین نمودند. با انتخاب معیار فان میسز تنش موثر را بر حسب تنش‌های شعاعی و مماسی در معادلات نرخ کرنش‌ها جایگزین نمودند، سپس با جایگذاری نرخ کرنش‌ها در معادله سازگاری و با استفاده از معادله تعادل و انتگرال‌گیری حل بسته‌ای برای تنش شعاعی و سپس تنش مماسی و محوری بدست آوردند و ثابت‌های انتگرال را با استفاده از شرایط مرزی فشار در داخل و فشار صفر در سطح خارج تعیین نمودند. در مثال‌های ارائه شده مقدار  $n(r) = n_0$  ثابت در نظر گرفته شده و تاثیر مقادیر ثابت مختلف  $n_0$  بر روی تنش‌های مماسی و شعاعی و محوری گزارش شده است، بعلاوه تنش‌های شعاعی و مماسی و محوری برای مقادیر مختلف  $(B(r) = b_0 r^{b_1})$  توان  $b_1$  بدست آمده است.

در سال ۲۰۰۹ لقمان و شکوهی [۱۱] با استفاده از یک مدل ساختاری خزش بلند مدت، به ارزیابی آسیب خزش<sup>۳</sup> در کره‌های جدار ضخیم پرداخته‌اند. برای محاسبه آسیب‌های خزش در کره جدار ضخیم تحت فشار داخلی و گرادیان دما مدلی عددی ارائه نموده‌اند. این مدل، تاریخچه آسیب خزش در طول عمر

<sup>۱</sup> - Poason Ratio

<sup>۲</sup> - You

<sup>۳</sup> - Creep Damage

کره را پیش بینی می‌کند. شکست خزش براساس قانون رابینسون<sup>۱</sup> می‌باشد، که به منظور محاسبه آسیب‌ها در یک تحلیل تنش غیر خطی وابسته به زمان به کار رفته است، بدنبال تاریخچه تنش‌ها، تاریخچه تنش موثر نیز بدست آمده و آسیب‌های خزش در طول عمر کره محاسبه و افزوده شده‌اند. در این مقاله، تاریخچه آسیب در مدت ۳۸ سال محاسبه شده و نتایج نشان می‌دهند که همیشه بیشترین و کمترین آسیب‌ها به ترتیب در سطح داخلی و خارجی کره متحمل می‌شود.

گرچه تحلیل‌های الاستیک-پلاستیک و خزش در استوانه‌های جدار ضخیم به موازات هم تکامل یافت و به مواد تابعی نیز بسط داده شد. با این وجود در هیچ یک از این تحقیقات به بررسی تحلیل‌های خزشی در استوانه‌ای که بر اثر بارگذاری در ناحیه پلاستیک فرو رفته باشد پرداخته نشده است. هدف از این تحقیق بررسی تاریخچه تنش‌ها و کرنش‌ها بر اثر خزش در استوانه‌ای است که در اثر بارگذاری اولیه تا نیمی از آن در حالت پلاستیک باشد.

---

<sup>۱</sup> - Robinson Raw

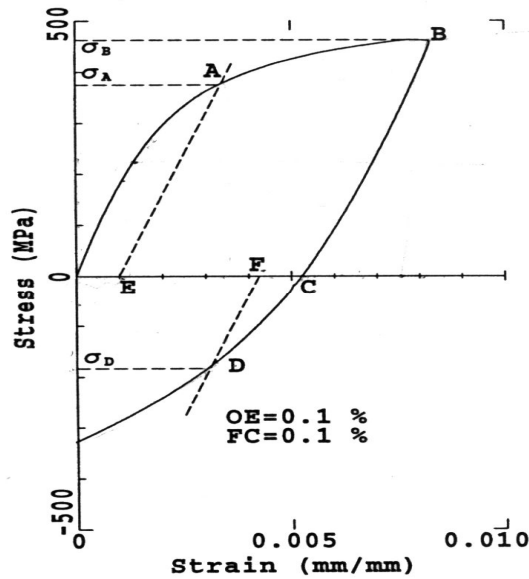
## فصل دوم

# معادلات ساختاری رفتار

# الاستیک – پلاستیک و خزشی ماده

## ۱-۲- معادله ساختاری رفتار الاستیک-پلاستیک ماده

ماده‌ای که در این تحقیق جهت تحلیل تنش‌های الاستیک-پلاستیک مورد مطالعه قرار می‌گیرد، آهن فریتی متشکل از ۰.۵ Mo - ۰.۲۵ Cr می‌باشد. رفتار یک بعدی این ماده در آزمایش کشش و فشاربدست آمده و منحنی تنش کرنش آن در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: منحنی تنش کرنش فولاد ۰.۵ Mo - ۰.۲۵ Cr.

معادله ساختاری رفتار الاستیک-پلاستیک این ماده با استفاده از اطلاعات فوق بصورت زیر بیان شده است.

$$\sigma_e = 232.68187 + 689.01541 \cdot (\varepsilon_p)^{0.21842186} \quad (1-2)$$

که در آن  $\sigma_e$  و  $\varepsilon_p$  به ترتیب تنش و کرنش موثر می‌باشند.



## ۲-۲- تاریخچه معادلات ساختاری خزش

اولین قدم در تحلیل تنش و بررسی تغییر شکل مواد در دمای بالا در سال ۱۹۲۹ توسط بایلی<sup>۱</sup> و نورتون<sup>۲</sup> صورت گرفت. آنها یک رابطه غیرخطی بین نرخ کرنش خزشی و تنش بدین ترتیب ارائه نمودند:

[۱۲]

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n \quad (۲-۲)$$

$\dot{\varepsilon}$  نرخ کرنش خزشی،  $\sigma$  تنش،  $A$  و  $n$  ثابت‌های وابسته به دما می‌باشند. بایلی و نورتون از این رابطه به جای قانون هوک در تحلیل تنش - کرنش در ناحیه خزشی استفاده نمودند. این رابطه برای حالت تنش تک محوری می‌باشد در حالی که در مسایل واقعی و عملی شرایط تنشی چند محوری حکم فرماست.

معادله تک محوری فوق در سال ۱۹۳۵ توسط بایلی برای حالت چند محوری عمومیت پیدا کرد مهم‌ترین و اساسی‌ترین مسئله و هدف در سیستم‌های چند محوری معادلسازی و تبدیل تنش‌ها در این سیستم‌ها به حالت تنش تک محوری می‌باشد. روابط کلی که توسط بایلی برای خزش پیشنهاد شد بر اساس جهات و تنش‌های اصلی می‌باشد. برای مثال نرخ کرنش خزشی در جهت اصلی  $x$  بدین ترتیب بیان شده است:

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{A}{2} \left[ \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) + \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_z)^2 \right]^m \times [(\sigma_x - \sigma_y)^{n-2m} - (\sigma_z - \sigma_x)^{n-2m}] \quad (۳-۲)$$

$m, n, A$  ثابت‌های ماده هستند که به میزان درجه حرارت بستگی دارد و  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  تنش‌های اصلی می‌باشند. برای کشش ساده با قرار دادن ( $\sigma_z = 0, \sigma_y = 0$ ) معادله فوق به معادله  $\dot{\varepsilon}_x = A\sigma_x^n$  کاهش می‌یابد. که مشابه معادله (۱-۲) می‌باشد. داده‌های آزمایشگاهی در تغییر شکل خزشی لوله‌های تحت فشار داخلی و پیچش محوری ساده با مقادیر حاصل از معادله فوق تطابق دارد [۱۳].

<sup>۱</sup> - Bailey

<sup>۲</sup> - Norton

در ۱۹۳۹ نورتون رفتار خزشی در حالت تک محوری را در لوله‌های تحت فشار همانند لوله‌های دیگ بخار بررسی کرد. او آزمایشاتی در مورد تغییر شکل محوری و مماسی تحت فشار داخلی و درجه حرارت بالا در لوله‌های دیگ بخار انجام داد. او نحوه رفتار دو نمونه فلزی کاملاً مشابه تحت درجه حرارت و فشار داخل یکسان برای دو حالت کشش ساده و تحت تنش مماسی، مقایسه نمود. نورتون نتیجه گرفت که نرخ کرنش خزشی در راستای مماسی حدوداً نصف نمونه تحت کشش محوری می‌باشد و مقدار نرخ کرنش خزشی طولی بسیار ناچیز است. هیچ فرمول یا تئوری جهت ارتباط حالت محوری یا چند محوری برای آزمایشات تجربی او پیشنهاد نشده است.

نتایج حاصله از اقدامات بایلی در ۱۹۳۵ منجر به تئوری شد که بیان می‌کند فلزات در حالتی که تحت تنش‌های ترکیبی قرار دارند، تغییر شکل خزشی کمتری نسبت به حالت کشش محض دارند. به هر حال برای بدست آوردن رابطه بین تنش‌های چند محوری و معادلسازی با حالت تک محوری نیاز به روابط و آزمایشات دقیق‌تری احساس می‌شد.

در سال ۱۹۴۱ نورتون آزمایشات خزشی را بر روی لوله‌های استوانه‌ای انجام داد در بررسی که وی انجام داد میزان تغییر شکل خزشی در راستای محوری تقریباً صفر بود در حالی که تغییر شکل خزشی مماسی به تقریبی مشابه با خزش در نمونه کشش ساده منجر شد در واقع تنشی معادل برای تنش مماسی حاصل گردید. هیچگونه رابطه تحلیلی تنش کرنش در بررسی او وجود نداشت و نتایج تنها حاصل از کارهای آزمایشگاهی و تجربی بود.

در تلاشی دیگر، برای بدست آوردن رابطه بین تغییر شکل خزشی چند محوری و خزش تک محوری سودربرگ<sup>۱</sup> در ۱۹۴۱ تئوری تسلیم بر اساس حداکثر تنش و حداکثر کرنش را استفاده کرده است [۱۴].

سودربرگ در ۱۹۴۱ رابطه بین نرخ کرنش‌های خزش اصلی و نرخ کرنش خزشی کشش ساده را در سیستم‌های سه بعدی بدین ترتیب بیان کرد:

---

<sup>۱</sup> - Soderberg

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\dot{\varepsilon}}{s} \left[ \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\dot{\varepsilon}}{s} \left[ \sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right] \quad (4-2)$$

$$\dot{\varepsilon}_3 = \frac{\dot{\varepsilon}}{s} \left[ \sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

$\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$  نرخ کرنش‌های خزشی اصلی و  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  تنش‌های اصلی  $s$  حداکثر تنش و  $\dot{\varepsilon}$  حداکثر نرخ کرنش می‌باشد.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (5-2)$$

$$s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (6-2)$$

سودربرگ در ۱۹۴۱ تئوری بالا برای یک لوله جدار نازک تحت فشار داخلی به کار برده است. او فرض کرده که نرخ کرنش ثابت است و خطوط کرنش با حداقل شیب به تنش‌ها مرتبط هستند. سودربرگ بیان داشت که نرخ کرنش خزشی مماسی  $\sqrt{3}/2$  برابر نرخ کرنش کشش خزش محوری می‌باشد. وی در نهایت بیان کرد که بررسی خزش در لوله‌های جدار ضخیم موضوعی پیچیده و مشکل می‌باشد. در حقیقت سودربرگ تئوری پلاستیسیته (تئوری تغییر شکل هنکی<sup>۱</sup>) را اصلاح نموده است [۱۴].

در ۱۹۴۲ نورتون و سودربرگ برای لوله جدار ضخیم اصلاحاتی را بر روش قبلی انجام دادند و ضریب تصحیحی را به شکل زیر ارائه نمودند:

$$f = \left[ 1 - \frac{t}{(2R)^2} \right]^2 \quad (7-2)$$

---

<sup>۱</sup> - Hencky

$t$  ضخامت لوله،  $R$  شعاع متوسط می‌باشد. این ضریب در حداکثر تنش لوله جدار نازک ضرب می‌شود تا حداکثر تنش در شعاع متوسط در لوله جدار ضخیم بدست آید. تا آن زمان تمامی دانشمندان و محققین، خزش در لوله‌های جدار نازک را بررسی کرده، و با اصلاحاتی آن را برای لوله‌های جدار ضخیم به کار می‌بردند علاوه بر این، آنها تنها خزش حالت پایدار یا به عبارتی خزش مرحله دوم را در تحلیل‌های تنش - کرنش در نظر می‌گرفتند.

بررسی تنش خزشی در حالت غیر پایدار برای استوانه‌های جدار ضخیم اولین بار توسط کوفین<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۱۹۴۹ صورت گرفت. آنها برای یک استوانه جدار ضخیم که تحت فشار داخلی و دمای ثابت می‌باشد تنش‌ها و کرنش‌های خزشی در جداره استوانه را وابسته به زمان دانستند [۱۵]. در آزمایش خزش،  $t$  زمان،  $T$  دما و  $\varepsilon^*$  کرنش پارامترهایی کلیدی هستند بدین ترتیب:

$$\sigma^* = f(\varepsilon^*, t, T) \quad (۸-۲)$$

$\sigma^*$ ,  $\varepsilon^*$  تنش مؤثر و کرنش مؤثر نامیده می‌شوند که در زیر تعریف شده‌اند.

$$\begin{aligned} \sigma^* &= \sigma_\theta - \sigma_r \\ \varepsilon^* &= \varepsilon_\theta - \varepsilon_r \end{aligned} \quad (۹-۲)$$

$\sigma_r, \sigma_\theta$  تنش‌های مماسی و شعاعی هستند،  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  کرنش‌های مماسی و شعاعی هستند. کوفین کرنش خزشی اولیه را برحسب زمان برای مقادیر ثابتی از تنش ترسیم کرده است. همچنین تنش مؤثر را برحسب کرنش مؤثر بازای مقادیر ثابتی از زمان ترسیم نموده است و استنباط نموده است که در زمان‌های ثابت این منحنی‌ها، رابطه بین تنش - کرنش مؤثر هستند. او پیشنهاد کرده است شبیه ناحیه پلاستیک با داشتن رابطه تنش - کرنش مؤثر می‌توان پدیده خزش را تحلیل نمود.

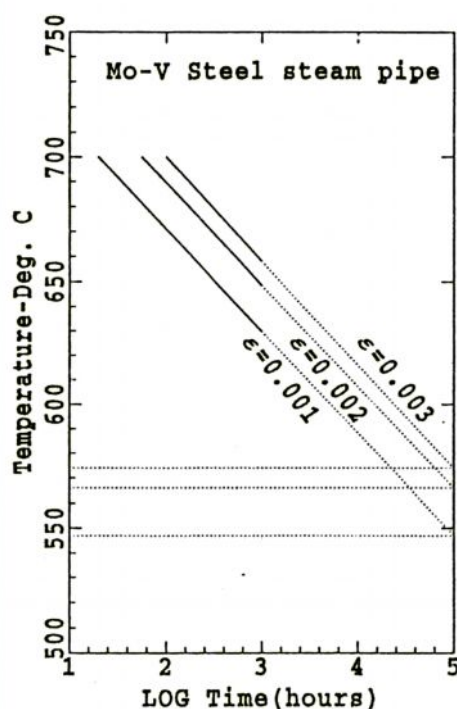
این مطلب به اثبات رسیده است، که تنش و تغییر شکل خزشی در لوله‌هایی که تحت پدیده خزش قرار می‌گیرند به زمان وابسته می‌باشد، اما در طراحی لوله‌ها ماکزیمم تنش خزشی به عنوان معیار طراحی در نظر گرفته شده است.

---

<sup>۱</sup> - Coffin

بایلی (۱۹۵۱) چند موضوع مهم و اصلی را در تحلیل خزش در نظر گرفته است که در طراحی خطوط لوله برای شرایط کاری دما - فشار بالا باید مورد توجه قرار گیرد. او به طور کلی درباره درجه حرارت و توزیع تنش‌ها برای طرح‌های مورد نظر بحث کرده است [۱۶].

بایلی در ۱۹۵۱ آزمایشات خزش را بر روی فلز Mo-V برای شرایط کاری با سطح تنش بالا و درجه حرارت‌های زیاد از  $630^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$  انجام داده و گزارش‌هایی ارائه نموده است. برای تعیین کرنش‌هایی به میزان  $0.001$  و  $0.002$  و  $0.003$  منحنی‌هایی ترسیم نموده است که دما را به عنوان محور عمودی و لگاریتم زمان را محور افقی در نظر گرفته است. او نشان داد که بین دما و لگاریتم زمان یک رابطه خطی وجود دارد که در شکل شماره ۲-۲ قابل ملاحظه می‌باشد [۱۶].



شکل ۲-۲: نتایج آزمایش خزش بر روی فلز Mo-V در فشار  $3000 \text{ Psi}$  ( $45 \text{ MPa}$ )

او این خطوط را تا  $100,000$  ساعت امتداد داده است تا دمای طراحی را بتواند بدست آورد. دمای طراحی برای لوله‌ها، توزیع تنش، خزش در لوله‌های تحت فشار داخلی در مقاله‌ای جداگانه توسط بایلی در ۱۹۵۱ مورد بررسی قرار گرفته است. او فرمول‌هایی را برای تنش‌های اصلی در استوانه جدار ضخیم بدست

آورده است او مدعی شده است که برای بدست آوردن کرنش‌های خزشی می‌توان از کرنش‌های الاستیک صرف‌نظر نمود [۱۶].

او برای بدست آوردن نرخ کرنش‌های خزشی در مختصات سه بعدی از فرمول (۱-۲) که قبلاً تعریف شده است استفاده نموده است همچنین رابطه‌ای را برای درجه حرارت لوله بدست آورده است که وابسته به فشار داخلی می‌باشد.

انجام آزمایشات خزشی برای یک دوره زمانی طولانی مدت تحت شرایط کاری دما - فشار بالا در لوله‌های بخار بسیار مشکل و دشوار می‌باشد. اولین بار توسط بایلی آزمایشاتی در دماهای بسیار بالا صورت گرفت. او آزمایش خزش را بصورت شتابدار انجام داد و برای مقادیر مشخص شده‌ای از کرنش، تنش را استنتاج کرد و دمای طراحی و عمر باقی‌مانده را از طریق برون‌یابی تخمین زد.

رابطه خطی که بین دما و لگاریتم زمان به ازاء کرنش‌های خزشی معین در سال ۱۹۵۱ توسط بایلی ارائه گردید بعداً در ۱۹۵۲ توسط لارسون<sup>۱</sup> و میلر<sup>۲</sup> توسعه داده شدند. آنها یک رابطه زمان - دما برای تنش خزشی و زمان شکست ارائه نمودند. آنها نشان دادند که خطوط بازای مقادیر مختلف تنش‌ها در نقطه‌ای روی محور عمودی همگرا می‌شوند. آنها پارامتر لارسون - میلر ( $P_{LM}$ ) را تعریف کردند [۱۷]. پارامتر لارسون - میلر براساس درجه حرارت لگاریتم زمان شکست تعریف می‌شود:

$$P_{LM}(\sigma) = T(C + \log_{10} t_R) \quad (۱۰-۲)$$

لارسون - میلر برای اکثر مواد مقدار  $C = 20$  را انتخاب نموده‌اند.

لارسون و میلر نشان دادند که پارامتر فقط به تنش بستگی دارد و منحنی‌های پارامتر (لارسون - میلر) را معرفی کردند. پارامتر لارسون - میلر در تحلیل شکست خزشی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسیاری از محققان استفاده از مقدار  $C = 20$  را برای کلیه موارد بسیار مورد سؤال قرار دادند و بدین ترتیب ایراداتی به لارسون - میلر گرفتند و در نهایت پارامترهایی دیگر پیشنهاد شد [۱۷].

---

<sup>۱</sup> - Larson

<sup>۲</sup> - Miller

مانسون<sup>۱</sup> و هافرد<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۳ لگاریتم زمان شکست را به صورت تابعی از درجه حرارت ترسیم نموده‌اند و نشان دادند که برای مقادیر مختلف تنش این خطوط به نقطه‌ای همگرا می‌شوند. این نقطه به خصوصیات ماده کاملاً وابسته می‌باشد. آنها پارامتری را معرفی کردند که تا اندازه‌ای کلی‌تر از پارامتر لارسون - میلر برای مواد مختلف بود [۱۸].

در نهایت مانسون در ۱۹۶۳ پارامتر عمومیت یافته‌ای را معرفی کرد که از پارامترهای لارسون - میلر و مانسون - هافرد کلی‌تر می‌باشد [۱۹].

مفهوم عمر طراحی شده و عمر شکست در ۱۹۵۱ توسط بایلی و در ۱۹۵۲ توسط لارسون - میلر معرفی شده‌اند. اولین بار بحث عمر باقی‌مانده تحت شرایط درجه حرارت و تنش بالای وابسته به زمان در سال ۱۹۵۲ توسط رابینسون<sup>۳</sup> و همکارانش انجام گرفت.

رابینسون ضریبی را برای اجزایی که تحت فشار و درجه حرارت بالا عمل می‌کردند محاسبه نمود. او عمر مصرف شده را به صورت زیر تعریف کرده است [۲۰]:

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{L_i} = \frac{t_1}{L_1} + \frac{t_2}{L_2} + \frac{t_3}{L_3} + \dots \quad (11-2)$$

$t_i$  زمان،  $L_i$  زمان شکست مربوط به تنش و درجه حرارت معین می‌باشد مفهوم آسیب‌دیدگی در آن زمان معرفی نشده بود اما بعداً این معیار تحت عنوان معیار آسیب‌دیدگی رابینسون مشهور شد.

مفهوم عمر مصرف شده توجه خاصی را به خود جلب نکرد اما از زمانی که تخمین عمر مصرف شده و عمر باقی‌مانده در نیروگاه‌های سوخت فسیلی در اواسط سال ۱۹۸۰ مطرح شد، این موضوع اهمیت ویژه‌ای پیدا کرد. بررسی لوله‌های جدار ضخیم با روش‌های تحلیلی تقریبی ادامه داشت که مهمترین این روش‌ها، روش تنش مرجع بوده است.

<sup>۱</sup> - Manson

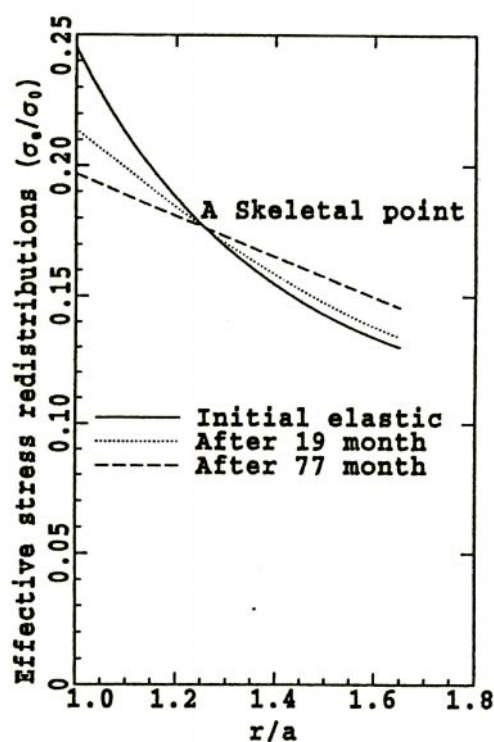
<sup>۲</sup> - Haferd

<sup>۳</sup> - Robinson

اسکالت<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۰ مشاهده کرد که در حل خزش تیرها نقاطی در مقطع تیر وجود دارند که در آن تنش تغییر نمی‌کند. این تنش ثابت، تنش مرجع نامیده شده بود. با انجام آزمایش خزش در این تنش ثابت، او توانست تغییر شکل تیر را پیش‌بینی کند [۲۱].

به طور کلی، در این روش رفتار سازه‌ها تنها برای شرایطی که آزمایش خزش تحت این فشار مرجع صورت گیرد قابل ارزیابی بود.

ماریوت<sup>۲</sup> و لیکی<sup>۳</sup> در ۱۹۶۴ مشاهده کردند که در طی فرآیند خزش نقاطی وجود دارند که در آن با زمان تغییر نمی‌کند. در استوانه‌های جدار ضخیم تحت فشار این نقطه، نقطه اساسی<sup>۴</sup> نامیده شده است که در شکل (۳-۲) نقطه A نشان داده شده است. به هر حال از این نقطه در هیچ بررسی استفاده نکرده‌اند [۲۲].



شکل ۳-۲: توزیع تنش‌های مؤثر در ضخامت لوله از حالت الاستیک تا خزش حالت پایدار

- 
- <sup>۱</sup> - Schulte
  - <sup>۲</sup> - Marriott
  - <sup>۳</sup> - Leckie
  - <sup>۴</sup> - Skeletal point



ماکنزی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۸ روشی را برای بدست آوردن تنش مرجع پیشنهاد نموده است [۲۳]. این روش مشروط به پیروی رفتار ماده از قانون جریان خزشی می‌باشد مطابق زیر:

$$\dot{\varepsilon} = B \sigma^n \quad (۱۲-۲)$$

تحلیل تنش‌ها در حالت پایدار با استفاده از قانون فوق برای سازه‌هایی مثل تیرها، استوانه‌های جدار ضخیم صورت گرفته است. تنش‌های مرجع از مقایسه حل الاستیک و حل حالت پایدار بدست آمده‌اند. ماکنزی رابطه فوق را برحسب تنش مرجع  $(\sigma_{ref})$  و نرخ کرنش مرجع  $(\dot{\varepsilon}_{ref})$  بازنویسی کرد.

$$\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_{ref}} = \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{ref}} \right)^n \quad (۱۳-۲)$$

ماکنزی معادله فوق و رابطه بین تنش و نرخ کرنش را برای تعدادی از موارد از جمله استوانه جدار ضخیم بکار برده است. نحوه تغییر شکل و رفتار ماده را برحسب پارامترهای مرجع تخمین زده است.

نرخ کرنش خزشی مماسی در سطح خارجی  $\dot{\varepsilon}_{\theta_o}$  و در سطح داخلی  $\dot{\varepsilon}_{\theta_i}$  برای استوانه برحسب  $\dot{\varepsilon}_{ref}$  بدین ترتیب ارائه نموده است:

$$\dot{\varepsilon}_{\theta_i} = 1.5 \frac{\lambda \dot{\varepsilon}_{ref} \beta^2}{(\beta^2 - 1)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta_o} = 1.5 \frac{\lambda \dot{\varepsilon}_{ref}}{(\beta^2 - 1)} \quad (۱۴-۲)$$

$\beta$  نسبت شعاعی برابر  $(R_o/R_i)$  و  $\lambda$  پارامتری وابسته به  $\beta$  می‌باشد. به این ترتیب می‌توان مقدار کرنش‌های خزشی مماسی را در هر استوانه‌ای بدست آورد.

خزش در استوانه کره با گرادیان دمایی منفی در راستای شعاع توسط سیم<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۳ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین او درجه حرارتی را به عنوان دمای مرجع معرفی کرده است.

<sup>۱</sup> - Mackenzie

<sup>۲</sup> - Sim

در سال ۱۹۸۰ کراس<sup>۱</sup> توزیع تنش در استوانه‌های جدار ضخیم را بررسی کرده و بیان کرد که نرخ کرنش‌های خزشی مماسی و شعاعی برابر بوده و از نظر علامت متفاوتند و همچنین نرخ کرنش خزشی در راستای طولی برابر با صفر می‌باشد. ارتباط بین نرخ کرنش خزشی مؤثر در حالت پایدار و تنش خزشی مؤثر همانند رابطه بایلی - نورتن در حالت تک محوری برای خزش ثابت می‌باشد یعنی  $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ ، او نشان داد که مقدار  $n$  از مقایسه و برابر قرار دادن حل حالت پایدار خزش و حل الاستیک بدست می‌آید [۲۴].

یک روش محاسباتی برای پیش‌بینی عمر لوله‌هایی که در سیستم‌های گرمایشی مراکز پتروشیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند توسط سیمون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۵ ارائه شده است. در این روش از روش‌های المان محدود برای حل خزش دوبعدی بهره گرفته شده است.

پارامتر لارسون - میلر برای تحلیل داده‌های شکست خزشی استفاده می‌شود. لارسون و میلر رفتار واقعی شکست مواد فلزات آلیاژی مورد استفاده و رفتار شکست حاصل از تحلیل عددی را مقایسه نموده‌اند. تحقیقات سیمون نشان داد که ماکزیمم آسیب‌دیدگی در دیواره میانی لوله رخ می‌دهد در حالی که هیچگونه آسیب‌دیدگی در سطح خارجی لوله دیده نمی‌شود.

سیشادری<sup>۳</sup> در سال ۱۹۸۸ یک روش عددی را برای گستره وسیعی از تغییر شکل‌ها و آسیب‌های خزشی در لوله‌های بخار با استفاده از رفتار الاستیک خطی بیان داشته است [۲۵]. این روش بر مبنای معیار هسته‌الاستیک که در سال ۱۹۶۷ توسط بری<sup>۴</sup> و اودونل<sup>۵</sup> در سال ۱۹۷۴ بیان شده است، استوار می‌باشد. این معیار در واقع به تحلیل رفتار غیرالاستیک وابسته به زمان با استفاده از فرمول‌ها و محاسبات الاستیک می‌پردازد. به هر حال در این معیار با استفاده از یک مقدار متوسط تنش در یک محدوده وسیع برای جداره داخلی و خارجی لوله اثر تنش مؤثر نادیده گرفته می‌شود. برای ضخامت جداره یک مقدار میانگین در نظر گرفته می‌شود.

---

<sup>۱</sup> - Kros

<sup>۲</sup> - Simonen

<sup>۳</sup> - Seshadri

<sup>۴</sup> - Bree

<sup>۵</sup> - O'Donnell

روش‌های پیش‌بینی عمر، براساس محاسبه تنش‌هایی بودند که این تنش‌ها براساس قطر متوسط و میزان فشار طراحی بدست می‌آمد.

این روش‌ها به دلیل نادیده گرفتن نحوه توزیع تنش‌ها صحیح و منطقی نیستند. همانطور که می‌دانیم میزان تنش‌ها در شرایط کاری در لوله‌های جدار ضخیم با زمان تغییر می‌کند. اما روش ارائه شده جهت تنش متوسط همچنان در ارزیابی عمر لوله‌ها در شرایط کاری دما - فشار بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیشادری در سال ۱۹۸۸ [۲۵] و ریپلی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۵ [۲۶] از تنش متوسط در تحلیل‌های خود استفاده نموده‌اند.

در سال ۱۹۹۰ کوهن<sup>۲</sup> با استفاده از تنش معادل به جای استفاده از قطر متوسط به تخمین بهتر و دقیق‌تری جهت ارزیابی عمر و میزان آسیب‌دیدگی در لوله‌های جدار ضخیم دست یافت. در سال ۱۹۹۰ کوهن از چندین فرمول تنش معادل را برای تخمین عمر در سیستم‌های لوله‌کشی با انرژی بالا استفاده نمود. این سیستم‌ها همگی تحت تنش‌های چند محوری بودند اما نرخ خزش و تنش شکست براساس روابط تک محوری محاسبه شده‌اند.

در سال ۱۹۷۲ هایرست<sup>۳</sup> [۲۷]، در سال ۱۹۸۲ براون<sup>۴</sup> [۲۸] و در سال ۱۹۸۵ هادلستون<sup>۵</sup> [۲۹] چند معیار برای تنش‌های معادل ارائه نموده‌اند.

این تنش‌های معادل در تحلیل وابسته به زمان برای آلیاژ Cr-Mo جهت محاسبه زمان شکست و پیش‌بینی رفتار ماده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در این روش‌ها عمر کل قطعه محاسبه شده و عمر مصرف شده کاسته می‌گردد تا عمر باقی‌مانده حاصل شود. کوهن نتیجه‌گیری کرد که زمان شکست به نحوه توزیع تنش‌های چند محوری و همچنین نحوه

---

<sup>۱</sup> - Ripley

<sup>۲</sup> - Cohn

<sup>۳</sup> - Hayharst

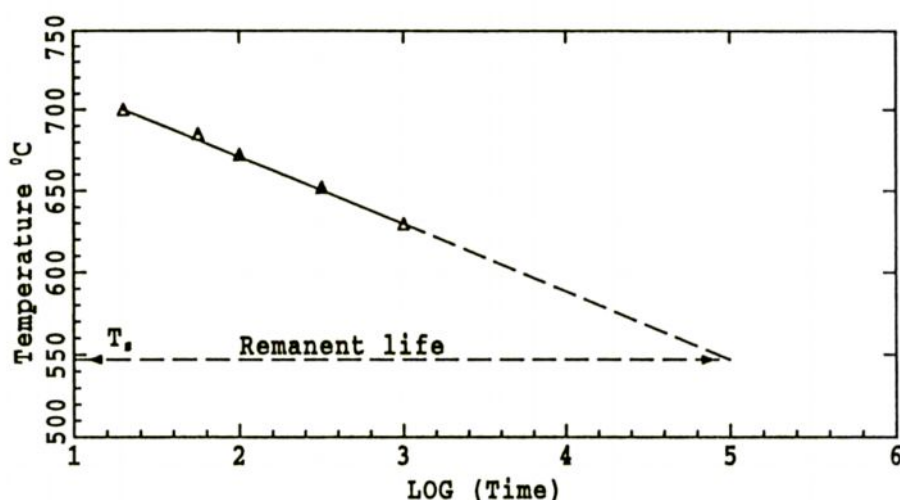
<sup>۴</sup> - Brown

<sup>۵</sup> - Huddleston

تغییرات تنش با زمان بستگی دارد. او پیشنهاد کرد که پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار ماده براساس استفاده از نمونه‌های عمر مصرف شده و باقی‌مانده حاصل می‌شود.

در سال ۱۹۹۵ تولکدورف<sup>۱</sup> عمر باقی‌مانده در لوله‌های تحت خزش قرار گرفته را براساس نتایج حاصل از زمان شکست از روی آزمایش خزش مورد بحث قرار داده است [۳۰].

او آزمایشات خزشی شتابداری در تنش‌های ثابت و در درجه حرارت‌های بالا انجام داد و با استفاده از درونیابی در درجه حرارت‌های مختلف مقدار عمر باقی‌مانده را پیش‌بینی کرد. این مطلب با عنایت به شکل شماره ۲-۴ قابل درک می‌باشد.



شکل ۲-۴: تخمین عمر باقی‌مانده در شرایط کاری دما بالا

در سال ۱۹۹۵ تولکدورف آزمایشات خزشی را در تنش‌های بالا و دمای ثابت انجام داده است. همچنین او آزمایشات خزشی را تحت دماها و تنش‌های بالا به طور همزمان انجام داده است تا عمر باقی‌مانده در لوله‌های جدار ضخیم را پیش‌بینی کند. در این آزمایشات قطعاتی از نمونه اصلی جهت ساخت نمونه‌های آزمایش جدا می‌شود و در واقع این آزمایشات، آزمایشات مخربی هستند. توجه به این نکته حائز اهمیت است که این نمونه‌ها بیانگر رفتار واقعی نمی‌باشند [۳۰].

<sup>۱</sup> - Tolksdorf