**بررسی عددی عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم AL2024-T351 تحت بارگذاری کرنش کنترل بر روی نمونه استاندارد دمبلی شکل**

**احسان چابوک**

دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

[Ehsan.chabouk@yahoo.com](mailto:Ehsan.chabouk@yahoo.com)

**محمود شریعتی**

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

Mshariati44@gmail.com

**مهران کدخدایان**

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

Kadkhoda@um.ac.ir

**چکیده**

در این تحقیق فرآیند شبیه­سازی آزمایش خستگی بر روی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 به صورت کرنش- کنترل بر روی نمونه استاندارد دمبلی شکل که از استاندارد مخصوص آزمایش­های کزنش کنترل برداشت شده، در دامنه کرنش­های مختلف، در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکز انجام شده است. پس از مدل­سازی نمونه در نرم­افزار سالیدورکز، و وارد کردن در نرم­افزار کامسول یک مطالعه خستگی برای نمونه به صورت کرنش پایه تعریف گردیده است. در مطالعه خستگی کرنش پایه مذکور از مدل SWT جهت تخمین عمر خستگی استفاده شده است. مکان های قید گذاری شده دقیقا مشابه شرایط آزمایشگاهی از لحاظ قرارگیری مکان فک­ها شیبه­سازی گردیده است. سپس در دامنه کرنش­های مختلف بررسی عمر خستگی صورت گرفته که نتایج عمر خستگی که به صورت عدد لگاریتمی نمایش داده می­شود نشانگر آن است که با افزایش دامنه کرنش، عمر خستگی نمونه کاهش می­یابد که شیب این کاهش عمر در دامنه کرنش­های بالاتر بیش­تر است. همچنین تاثیرات شعاع فیلت نمونه­ها در عمر خستگی نیز مورد بررسی قرار گرفته که نتایج حاکی از آن است که افزایش شعاع فیلت موجب افزایش عمر خستگی نمونه­ها می شود.

**واژگان كليدي:** خستگی کم­چرخه- آلیاژ آلومینیوم 2024T-351- عمر خستگی- کامسول

# مقدمه

برخلاف خستگی پر چرخه، خستگی کم چرخه عموما به وسیله شکست زیر 10000 سیکل تشریح می­شود که به بارگذاری توام با پاسخ پلاستیک همراه است. این شرایط بارگذاری می­تواند در سازه­های هواپیمایی، تحت اثر فشارهای مکانیکی غیر قابل پیش­بینی مانند فرود سخت، و یا شرایط بد آب و هوایی، شکست در سازه­ای بدون عیب و... اتفاق بیفتد. امروزه طراحی هواپیماها بعد از انجام تست­های متعدد بر روی نمونه­هایی با ابعاد متفاوت به منظور تخمین مقاومت خستگی اعضای آن نظیر بدنه­ صورت می­پذیرد. انجام این آزمایش­ها بسیار وقت­گیر و هزینه­بر است. بنابراین توسعه­ی مدل­های پیش­بینی کننده جوانه­زنی ترک و تحلیل عمر خستگی قطعات هواپیما برای بهبود طراحی سازه­ها و عملکرد آن­ها امری ضروری به نظر می­رسد.

یکی از اهداف اصلی در مطالعات خستگی، پیش­بینی عمر خستگی قطعات و اجزای ماشین آلاتی است که تحت بارگذاری به صورت کرنش-زمان قرار می­گیرند. به منظور دست­یابی به این امر، اطلاعات کامل و جامعی از نحوه­ی رفتار ماده تحت بارگذاری سیکلی لازم است. علاوه بر خصوصیات پاسخ تنش-کرنش سیکلی، داشتن اطلاعات مختصری از مقاومت جوانه­زنی و رشد ترک نیز مهم خواهد بود. روش­های مدرن پیش­بینی عمر که بر پایه­ی نظریه کرنش محلی هستند؛ مانند روش نوبر(Neuber, 1961)، مدل مولسکی-گلینکا (Molski and Glinka, 1981)، مدل­های آنالیز اجزا, محدود بر روی جوانه­زنی ترک (pinho da cruz et al, 2000) و یا رشد ترک (Antunes et al, 2004) تماما فرضیاتی بر این پایه هستند که رابطه­ای وجود دارد که منحنی تنش-کرنش را در اثر اعمال بارگذاری کرنش-سیکلی تشریح می­کند.

افزایش روزافزون نیازهای بشر و تلاش برای برآورده ساختن آن­ها، منجر به خلق مسائل تازه و پیچیده­ای در همه زمینه­های علمی و فنی شده که حوزه مهندسی مکانیک و سازه نیز از این امر مستثنی نبوده است. در اغلب موارد، نیاز به طراحی و تحلیل قطعات با هندسه و خواص پیچیده تحت بارگذاری­های نامنظم ایجاد می­شود و به­کارگیری روش­های کلاسیک موجود منجر به یافتن معادلات حاکم بسیار پیچیده، با شرایط مرزی و اولیه متنوع می­شود که حل این معادلات به روش تحلیلی را غیرممکن می­سازد و باید برای حل از روش­های عددی کمک گرفت. در میان روش­های عددی متعدد موجود برای حل مسائل، سه شاخه را می­توان به‌عنوان اصلی­ترین روش­های شناخته‌شده نام برد که به ترتیب پیدایش عبارت‌اند از روش اجزا محدود (FEM)، روش المان مرزی (BEM) و روش بدون المان .(EFM) در این پژوهش از روش المان محدود برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها استفاده شده است.

کاریاواسام و همکاران (Kariyawasam and Mallikarachchi, 2015) مدل­سازی عددی رفتار خستگی فولاد ضد زنگ را با استفاده از نرم­افزار آباکوس انجام دادند. آن­ها در پژوهش انجام شده تظابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه­سازی عددی مشاهده نمودند. همچنین مدل سازی عددی رفتار خستگی فولاد مقاومت بالا به وسیله گلودز و همکاران (Glodež, 2007)مورد بررسی قرار گرفت. برای آلومیینیوم 2024 رفتار خستگی به صورت آزمایشگاهی و عددی توسط خان و همکاران (Khan, 2012) مورد بررسی قرار گرفت و ضرایب معادله­ی کافین-مانسون به­دست آمد.

در این مقاله، شبیه­سازی عمر خستگی آلومینیوم 2024 در دامنه کرنش­های مختلف و مشابه با شرایط آزمایشگاهی انجام شده است. تاثیرات دامنه کرنش اعمالی و همچنین تغییرات شعاع فیلت[[1]](#footnote-1) نمونه در عمر خستگی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است

# معرفی نرم­افزار کامسول

نرم‌افزار کاربردی کامسول مالتی­فیزیک، فیزیک و مهندسی برای داده­پردازی و شبیه­سازی کامپیوتری در مهندسی مکانیک، شیمی، پتروشیمی و علوم فیزیک و شیمی و... است.

با استفاده از نرم­افزار کامسول مولتی فیزیک[[2]](#footnote-2) می­توان طراحی و شبیه­سازی پروژه­های مهندسی برق، مکانیک، علوم زمین، شیمی، فیزیک، نجوم، و کوانتوم انجام داد. همچنین این برنامه امکان تعامل با نرم­افزارهای مهندسی دیگر مانند کتیا و متلب را دارد.

این نرم­افزار در سال 1986 توسط دانشجویان موسسه سلطنتی فناوری سوئد ایجاد شد. نام قبلی این نرم­افزار FEMLAB و از سال 2005 به کامسول مولتی فیزیک تغییر نام داده است.

امروزه استفاده از روش­های حل عددی و نرم­افزارهای شبیه‌سازی در محاسبات کامپیوتری و علوم و مهندسی کاربرد وسیعی پیداکرده است. و به‌عنوان ابزاری کارآمد در طراحی وسایل مهندسی به کار می­روند. در دهه 1980 با همت محققین زیادی نرم­افزارهای مهندسی مختلفی روانه بازار شدند. دقت این نرم­افزارها توسط محققین زیادی مورد تأیید قرارگرفته است. پیچیدگی معادلات حاکم بر مسئله، تأثیر متغیرهای فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه­های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاه­های اندازه­گیری در بسیاری از کاربرد­های علمی، ازجمله دلایلی هستند که استفاده از روش­های تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روش­های عددی محدود می­کند.

# نحوه­ی تخمین عمر در نرم­افزار کامسول

تخمین عمر بر اساس کرنش

* نظریه اسمیت- واتسون- توپر (SWT)[[3]](#footnote-3)
* نظریه وانگ-برانگ[[4]](#footnote-4)

تخمین عمر بر اساس تنش

* نظریه فایندلی[[5]](#footnote-5)
* نظریه متاک[[6]](#footnote-6)
* نظریه ماکزیمم تنش نرمال[[7]](#footnote-7)

در ادامه به تشریح مدل SWT که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، می­پردازیم:

(1)

در رابطه (1) Nf عمر ماده (تعداد سیکل طی شده تا شکست)،  ضریب مقاومت خستگی،  ضریب شکست خستگی، b توان مقاومت خستگی و c توان شکست خستگی می­باشند.

به‌منظور تخمین عمر در این تحقیق از مدل SWT استفاده‌شده است که درواقع پایه و اساس آن روابط کافین-مانسون می­باشد. با نگاهی به رابطه کافین-مانسون و مدل SWT داریم:

 (2)

بخش اول رابطه­ی 2 محدوده­ی الاستیک، و بخش دوم محدوده­ی پلاستیک را در نظر می­گیرد، که درواقع نشان­دهنده­ی این موضوع می­باشد که این تئوری هم در ناحیه الاستیک و هم در ناحیه­ی الاستو پلاستیک معتبر می­باشد

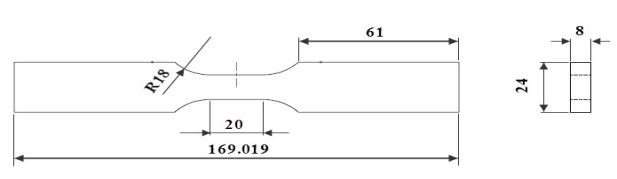
# مشخصات ماده­ی مورد آزمایش

در این پژوهش شبیه­سازی آزمایش خستگی کم چرخه بر روی آلیاژ آلومینیوم 2024، با عملیات حرارتی 351 T انجام گرفته است. این آلیاژ دارای قابلیت عملیات حرارتی بوده و مشخصه 3T نشان دهنده عملیات حرارتی از نوع محلول سازی شده، کار سرد شده و پیر شده به¬صورت طبیعی بوده و عدد 51 بیانگر تنش­زدایی به وسیله­ی کشش بعد از عملیات حرارتی است. این آلیاژ مقاومت مکانیکی بسیار خوبی داشته و کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا دارد. خواص مکانیکی آن در جدول1 آورده شده است.

نمونه­های انتخاب شده برای آزمایش خستگی بر اساس استاندارد ASTM-E 606 - 92 R98 (. Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2004) ساخته‌شده است. که استانداردی مخصوص آزمایش­های خستگی کم چرخه و در حالت جابه­جایی کنترل می­باشد. ضخامت نمونه­ها 8 میلی­متر می­باشد. هندسه­ی نمونه­های مدل سازی شده برای این پژوهش خستگی در شکل 1 نشان داده ‌شده است.

**جدول1: خصوصیات مکانیکی ماده­ی مورد آزمایش**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| میزان کشیدگی (%) | کرنش شکست | استحکام نهایی (مگاپاسکال) | استحکام تسلیم (مگاپاسکال) | مدول یانگ (گیگاپاسکال) |
| 1/30% | 301/0 | 475 | 324 | 72 |

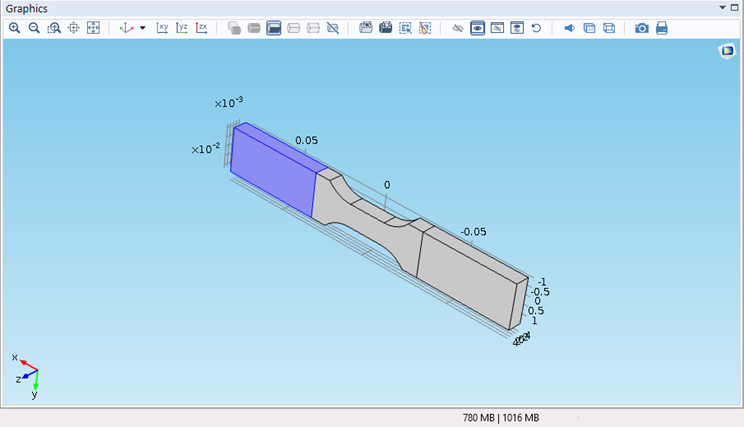


**شکل1 : ابعاد هندسی نمونه مدل­سازی شده خستگی برحسب میلی‌متر**

# شبیه­سازی در محیط نرم­افزار

## مدل­سازی و شرایط بارگذاری

برای شبیه­سازی با شرایط واقعی در آزمایشگاه، نمونه به‌طور کامل در محیط نرم­افزار سالیدورکز مدل، و به محیط نرم‌افزار کامسول انتقال داده شد. همچنین شرایط مرزی دقیقاً مشابه چیزی که در آزمایشگاه انجام شد در محیط نرم­افزار تعریف گردید. یعنی یک‌طرف نمونه از جایی که داخل فک قرارگرفته بود قید ثابت بودن داده شد و طرف دیگر نمونه تحت جابه­جایی قرار داده شد. مراحل انجام قیدهای شرایط مرزی در شکل2 نشان داده‌شده است.



شکل2 ‏5: مکان و نحوه­ی قرارگیری قیدها

همچنین یک پارامتری تحت عنوان para برای سیکلی کردن بارگذاری تعریف گردید و مقدار این پارامتر از 0 تا 1 در طول سیکل‌هاقرار داده شد تا بارگذاری را به‌صورت سینوسی روی قطعه اعمال کند. نحوه­ی این بارگذاری در رابطه 3 نشان داده‌شده است:

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

در para=0.25 نمونه در حداکثر کشش قرار دارد و para=0.75 نشان­دهنده­ی بیشترین فشار است.

## تعریف خستگی

|  |  |
| --- | --- |
| 2/727 | : ضریب مقاومت خستگی (مگاپاسکال) |
| 18/0 | : ضریب شکست خستگی |
| 09/0- | b : توان مقاومت خستگی |
| 59/0- | C : توان شکست خستگی |
| 72 | E (Gpa) : مدول یانگ |
| 324 | Sy (Mpa) : تنش تسلیم |

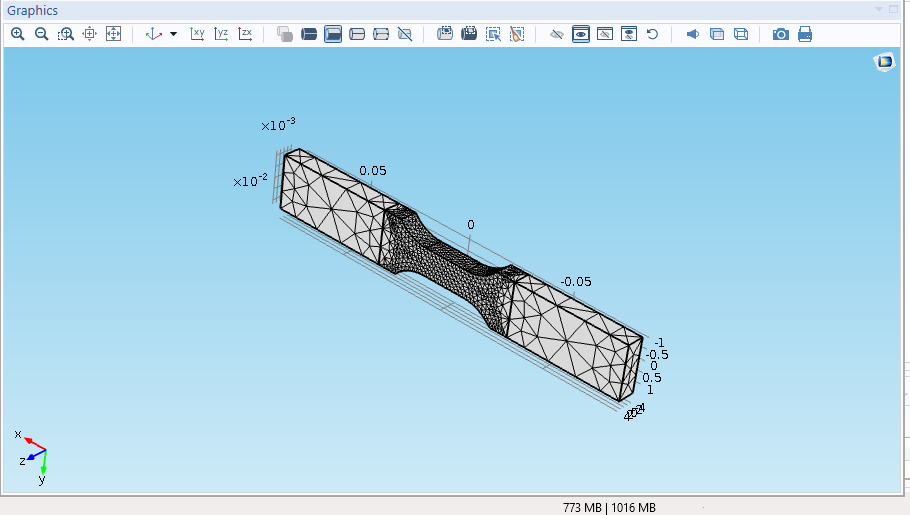
بعد از تعریف خواص ماده برای نمونه موردنظر، یک مطالعه خستگی به صورت کرنش کنترل برای نمونه تعریف شده است. همان طور که گفته شد، نرم­افزار کامسول در قسمت کرنش پایه قادر به تخمین عمر خستگی از روابط متفاوتی است که بسته به در دسترس بودن خواص، قابل استفاده خواهند بود. در این مقاله با توجه به کار آزمایشگاهی (تست کشش و تست خستگی) انجام شده بر روی نمونه موردنظر، و ترسیم کرنش­های الاستیک و پلاستیک و به دست آوردن ضرایب معادله­ی کافین- مانسون از نتایج آن، از مدل SWT، جهت تخمین عمر خستگی استفاده شده است. ضرایب استفاده شده در این مدل برای تخمین عمر خستگی نمونه در جدول2 زیر ارائه شده­اند:

**جدول 2: پارامترهای به‌کاررفته در نرم‌افزار کامسول**

## مش

به طور پیش­فرض نرم­افزار کامسول از مدل مش تتراهدرال برای المان­بندی نمونه­ها استفاده می­کندو لازم به ذکر است که مش­بندی قطعات به صورت خودکار صورت می­گیرد و کاربر فقط برای نواحی حساس می­تواند مش­های کوچک­تری انتخاب کند تا به جواب دقیق­تری برسد.

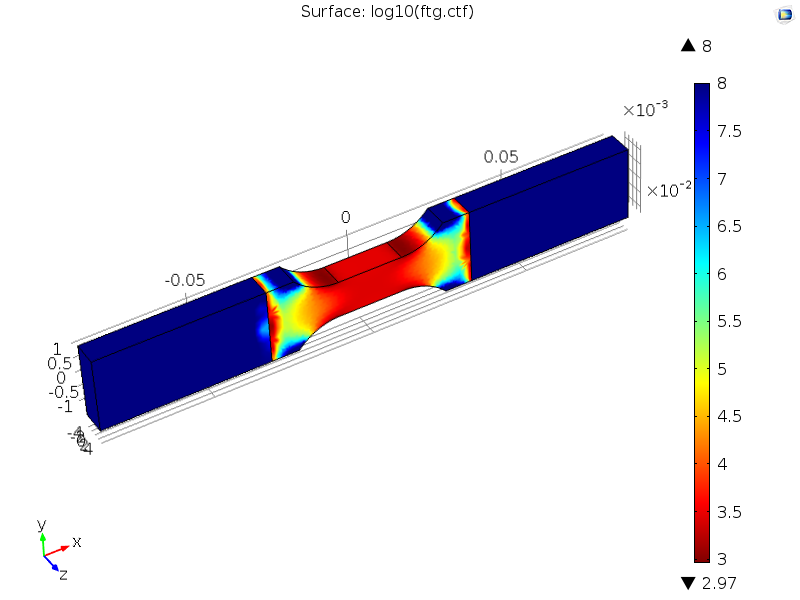
در شکل3 مش­بندی نمونه موردنظر آمده است همان­طور که مشاهده می­شود، برای ناحیه­ی بین دو فیلت و به علت کوچک بودن سطح و تنش بیشتر در این منطقه از مش بسیار ریزتر استفاده شده تا نتایج دقیق­تری حاصل شود.



شکل3: قطعه مش زده‌شده در نرم­افزار کامسول

## عمر خستگی

نتایج عمر خستگی در نرم­افزار کامسول در مقیاس لگاریتمی نمایش داده می­شود. به‌عنوان‌مثال عمر خستگی برای دامنه کرنش 0.02 به‌صورت شکل3 است.



شکل 3: شکل تعیین عمر خستگی در نرم­افزار کامسول

بعد از اندازه­گیری عمر خستگی در 6 دامنه کرنش نتایج به صورت جدول 3 ارائه شده­اند:

**جدول3 : نتایج شبیه­سازی در دامنه کرنش مختلف**

|  |  |
| --- | --- |
| نتایج عددی | دامنه کرنش |
| 47 | 02/0 |
| 65 | 0175/0 |
| 93 | 015/0 |
| 156 | 0125/0 |
| 295 | 010/0 |
| 932 | 0075/0 |

# تاثیر دامنه کرنش بر عمر خستگی

همان طور که در نتایج جدول 3 مشاهده می­شود با افزایش دامنه کرنش اعمالی به نمونه عمر خستگی کاهش می­یابد. به دلیل اینکه در دامنه کرنش بالاتر تنش بیشتری در نمونه اتفاق افتاده و به تبع آن نمونه زودتر به سمت شکست پیش می­رود. البته شایان ذکر است که با افزایش دامنه کرنش اعمالی شیب کاهش عمر خستگی، کاهش می­یابد.

نمودار 1 تغییرات عمر خستگی بر حسب دامنه کرنش اعمالی را نشان می­دهد:

نمودار 1: تغییرات عمر خستگی در ازای تغییرات دامنه کرنش اعمالی

# تاثیر شعاع فیلت بر عمر خستگی

عمر خستگی نمونه­های آلومینیومی با شعاع فیلت­های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، که نتایج آن در نمودار 2 نشان داده شده است. همان­طور که در این نمودار پیداست عمر خستگی در 3 شعاع فیلت مختلف و با شرایط یکسان اندازه­گیری شده است و نتایج نشان می­دهد که با کاهش شعاع فیلت به علت تیز شدن گوشه­ها و به­وجود آمدن تمرکز تنش در این نقاط، از عمر نمونه کاسته می­شود و قطعه زودتر به سمت شکست می­رود. و بالعکس با افزایش شعاع فیلت تمرکز تنش کمتری در نمونه به وجود آمده و نمونه دارای عمر بیشتر است. به عنوان مثال برای دامنه­ی کرنش 02/0، در شعاع فیلت 18 سانتی­متر نمونه دارای عمر خستگی 47 سیکل است، وقتی که شعاع فیلت 21 سانتی متر شود تعداد سیکل تا شکست 63 سیکل شده است و زمانی که شعاع فیلت 15 در نظر گرفته شده است تعداد سیکل خستگی 32 خواهد بود.

18 سانتی­متر

15 سانتی­متر

21 سانتی­متر

نمودار2: بررسی تغییرات شعاع فیلت در عمر خستگی

بحث و نتيجه‌گيري

در این مقاله، شبیه­سازی عمر خستگی آلومینیوم 2024 در دامنه کرنش­های مختلف و مشابه با شرایط آزمایشگاهی انجام شده است. که با توجه به توضیحاتی که ارائه گردید، نتایج زیر قابل برداشت هستند:

1. با توجه به توسعه نرم­افزار کامسول و همچنین محاسبه و مدل کردن راحت­تر خستگی در این نرم­افزار، استفاده از آن در تحقیقات آتی در زمینه­ی خستگی توصیه می­گردد.
2. با توجه به تست آزمایشگاهی انجام شده و به دست آوردن ضرایب معادله­ی کافین- مانسون از نتایج آن­ها، استفاده از مدل SWT مناسب­تر به نظر می­رسد.
3. با افزایش دامنه کرنش اعمالی به نمونه و به علت به وجود آمدن تنش­های بیش­تر عمر خستگی نمونه­ها کاهش پیدا کرد. که این کاهش در دامنه کرنش­های بالاتر با شیب کمتری همراه بوده است.
4. مشاهدات نشان داد که با کاهش یافتن شعاع فیلت نمونه و به علت تیز شدن گوشه­ها و به وجود آمدن تمرکز تنش بیش­تر، عمر ماده کاهش می­یابد.

منابع

Neuber, H. (1961). Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law. *Journal of Applied Mechanics*, *28*(4), 544-550.

Molski, K., & Glinka, G. (1981). A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root. *Materials Science and Engineering*, *50*(1), 93-100.

Da Cruz, J. P., Costa, J. D. M., Borrego, L. F. P., & Ferreira, J. A. M. (2000). Fatigue life prediction in AlMgSi1 lap joint weldments. *International journal of fatigue*, *22*(7), 601-610.

Antunes, F. V., Borrego, L. F. P., Costa, J. D., & Ferreira, J. M. (2004). A numerical study of fatigue crack closure induced by plasticity. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, *27*(9), 825-835.

Kariyawasam, K. K. G. K. D., & Mallikarachchi, H. M. Y. C. Simulation of Low Cycle Fatigue with Abaqus/FEA.

Glodež, S., Knez, M., & Kramberger, J. (2007). Fatigue behaviour of high strength steel S1100Q. *Advanced engineering*, 143-152.

Khan, S., Kintzel, O., & Mosler, J. (2012). Experimental and numerical lifetime assessment of Al 2024 sheet. *International Journal of Fatigue*, *37*, 112-122.

Standard, A. S. T. M. (2004). E606-92. *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing,” Annual Book of ASTM Standards*, *3*.

1. Fillet [↑](#footnote-ref-1)
2. COMSOL Multiphysic [↑](#footnote-ref-2)
3. Smith- Watson- Topper [↑](#footnote-ref-3)
4. Wang- Brang [↑](#footnote-ref-4)
5. Findley [↑](#footnote-ref-5)
6. Matake [↑](#footnote-ref-6)
7. Maximum Normal Stress [↑](#footnote-ref-7)