

اصلاح روش کلاسیک مانکن - گرانت با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته برای سوپر آلیاژها

محمود موسوی مشهدی
دانشیار
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

مهدی سلیمی
دانشجوی کارشناسی ارشد
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

فرهاد جاویدراد
استادیار
دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری

چکیده

اجزای ساختاری که در دماهای بالا کار می کنند، بیشتر در اثر آسیب خزشی که از شکل گیری، رشد و ادغام میکرو حفره ها حاصل می شود می شود، به حالت و اماندگی می رسند. برای پیش بینی طول عمر خزشی، روش های متعددی پیشنهاد شده است. یکی از روش های مهندسی پر کاربرد روش مانکن - گرانت (M-G) است. در این تحقیق، به دلیل اهمیت مرحله ی سوم خزش در سوپر آلیاژها، اصلاحاتی بر این مدل اجرا شده است تا مقدار پراکندگی نتایج تجربی، نسبت به مقادیر پیش بینی شده اصلاح شود. در این مقاله با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته، روش M-G اصلاح شده و آنگاه طول عمر خزشی سوپر آلیاژ IN738LC محاسبه شده است.

کلمه های کلیدی

خزش، سوپر آلیاژها، مکانیک آسیب پیوسته، مانکن - گرانت

Modifying the Classic M-G Method Using CDM for Superalloys

M. Salimi
MSc.student
Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering,
University of Tehran

M. Mosavi Mashadi
Associate Professor
Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering,
University of Tehran

F. Javidrad
Assistant Professor
Department of Aerospace Engineering,
AirForce Academy of Shahid Sattari

Abstract

The component operating at elevated temperature usually fails because of creep damage resulted from formation, growth and combination of micro-voids. To predict the creep life, a number of methods have been suggested. One of them is Monkman-Grant (M-G)

relationship that is widely applied in engineering problems.

In order to adjust the variation between the empirical and theoretical results and because of the importance of the third phase of creep this model has been modified. In this work, the M-G method has been modified to give a more accurate result by using the Continuum Damage Mechanics and then, the creep life of IN738LC has been determined. The results show that the predicted creep life determining from the modified model demonstrates good agreement with that of the Koul-Castillo model due to pay more attention to the third stage of creep in the presented study model.

Keywords

Creep, Superalloys, M-G route, Continuum Damage Mechanics

مقدمه

سوپر آلیاژها، کاربرد فراوانی در صنعت توربین دارند و چون در دمای بالا قرار می‌گیرند، یکی از مکانیزم‌های اصلی واماندگی، آن‌ها واماندگی در اثر خزش است. روش‌های گوناگونی برای ارزیابی طول عمر خزشی مواد مختلف، ارائه شده است. یکی از روش‌های کلاسیک، روش مانکن - گرانت است که با توجه به نتایج تجربی، به دست کول و کاستیلو اصلاح شده است. در این مقاله، روش کلاسیک مانکن - گرانت با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته اصلاح شده است و از آنجا که برای تعیین پارامترهای مادی مکانیک آسیب پیوسته از داده‌های موبوط به روش کول - کاستیلو استفاده می‌شود، روش کول - کاستیلو نیز به اختصار بررسی شده است.

روش کلاسیک مانکن - گرانت

یکی از روش‌های پیش بینی طول عمر خزشی مواد، استفاده از روش مانکن - گرانت است که از برازش نتایج تجربی به صورت زیر بیان شده است [۱]:

$$t_f \dot{\epsilon}_s^{m_1} = c \quad (1)$$

c ، m_1 پارامترهای مادی و وابسته به دما هستند و $\dot{\epsilon}_s$ حداقل نرخ کرنش خزشی است. در صورت معلوم بودن مقدار پارامترهای مادی c ، m_1 و با اندازه گیری حداقل نرخ کرنش خزشی می‌توان طول عمر خزشی ماده را پیش‌بینی کرد. این روش بر مبنای حداقل نرخ کرنش خزشی است و مرحله‌ی سوم خزشی و تغییرات ساختاری ایجاد شده را در این مرحله شامل نمی‌شود؛ به همین دلیل این روش نیاز به اصلاح دارد.

مدل مکانیک آسیب پیوسته

تعیین آسیب، با اندازه‌گیری سطح عیوب، عملی مشکل و یک تست مخرب است. برای تعیین آسیب از روشی غیر مستقیم؛ یعنی، از اثر آسیب بر رفتار مکانیکی ماده استفاده می‌شود. با توجه به مفهوم تنش مؤثر و با فرض تعادل کرنش، از قانون رفتاری ماده برای حالت آسیب‌دیده با جا به جا کردن تنش مؤثر و تنش ظاهری می‌توان همچنان استفاده کرد. کاجانف [۱] اولین کسی بود که مفهوم تنش مؤثر را برای مدل کردن گسست خزشی بیان کرد. وی پارامتر پیوستگی، $0 \leq \phi \leq 1$ ، را برای بیان آسیب تدریجی ساختار میکروسکوپی ماده، تحت شرایط خزشی تعریف کرد. اگر آسیب D فقدان سطح مؤثر را نشان دهد، A_{net} سطح واقعی تحمل بار برابر با $(1-D)A_0$ (یا ϕA_0) خواهد بود و در نتیجه تنش مؤثر برابر $\bar{\sigma}$ می‌شود:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2)$$

این موضوع به ارتباط آسیب و رفتار مکانیکی ماده می‌انجامد که می‌تواند به طور پیوسته، تکامل آسیب ماده را ارزیابی کند. این رابطه برای خزش به صورت:

$$\dot{D} = g(\sigma, D) \quad (3)$$

پیشنهاد شده است [۱]. که در آن σ تنش اعمالی، D پارامتر آسیب خزشی و نقطه، نشان دهنده‌ی دیفرانسیل نسبت به زمان



است.

از طرفی معادلات اساسی خزش و تکامل آسیب با استفاده از مفهوم تنش موثر به صورت زیر بیان شده اند [1]:

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = A \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^n \quad (\text{معادله‌ی اساسی نرخ کرنش}) \quad (4)$$

$$\frac{dD}{dt} = B \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^v \quad (\text{معادله‌ی اساسی تکامل آسیب}) \quad (5)$$

که با انتگرال گیری از (5) با عوامل شرایط مرزی: $t=0 \Rightarrow D=0$, $t=t_f \Rightarrow D=D_f$ نتیجه می‌شود:

(6)

$$1-D = \left[1 - (1+v)B\sigma^v t \right]^{1/(1+v)}$$

و در حالت واماندگی ($t=t_f$) مقدار آسیب برابر با واحد در نظر گرفته می‌شود. پس:

$$1 - (1+v)B\sigma^v t_f = 0 \quad (7)$$

$$\Rightarrow t_f = \frac{1}{B(1+v)\sigma^v}$$

اصلاح روش مانکنم - گرانت با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته

همان طور که اشاره شد در روش مانکنم - گرانت، مرحله‌ی سوم خزش و تغییرات ساختاری ایجاد شده، در این مرحله در نظر گرفته نمی‌شوند. از سویی طول عمر مرحله‌ی سوم خزشی در سوپر آلیاژها اهمیت زیادی دارد و به خاطر قیمت بالای این قطعات استفاده‌ی هر چه بیشتر و البته ایمن از این قطعات همواره مورد توجه بوده است. در این قسمت به کمک معادلات اساسی مکانیک آسیب پیوسته (معادلات (4) و (5)) روش کلاسیک مانکنم - گرانت اصلاح خواهد شد.

در شروع کار، قطعه بدون آسیب است و می‌توان طول عمر خزشی را که شامل مراحل اول و دوم خزشی است، با استفاده از رابطه مانکنم - گرانت محاسبه کرد. در این مرحله برای تعیین نرخ کرنش خزشی از قانون توانی نورتون ($\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n$) استفاده می‌شود. اگر قطعه بیشتر کار کند، رژیم خزشی، وارد مرحله‌ی سوم خزش می‌شود و ماده به صورت آسیب دیده عمل می‌کند. پس برای تعیین نرخ کرنش خزشی در این مرحله باید از معادله‌ی اساسی ارائه شده در مکانیک آسیب پیوسته (معادله (4)) استفاده کرد.

از سویی در این معادله برای تعیین نرخ کرنش خزشی باید پارامتر آسیب D مشخص باشد که با استفاده از معادله‌ی اساسی (5) مقدار آسیب قابل محاسبه است. پس در مرحله‌ی دوم با استفاده از معادله‌ی (6) (نتیجه شده از معادله‌ی (5)) مقدار آسیب را برای زمان کارکرد محاسبه شده در مرحله‌ی قبل بدست آورده و با استفاده از آن، نرخ کرنش خزشی تعیین کنیم. بار دیگر با استفاده از رابطه‌ی مانکنم - گرانت کلاسیک، طول عمر خزشی در مرحله‌ی سوم محاسبه می‌شود. در حقیقت با توجه به مفهوم تنش موثر در این مرحله، ماده آسیب دیده به صورت یک ماده‌ی بدون آسیب فرض می‌شود که تحت تنش مؤثر قرار گرفته است و طول عمر خزشی مراحل اول و دوم برای این ماده‌ی فرضی با استفاده از رابطه مانکنم - گرانت کلاسیک محاسبه می‌شود. این طول عمر محاسبه شده، همان طول عمر مرحله‌ی سوم خزشی ماده‌ی آسیب دیده است. پس طول عمر خزشی ماده مجموع طول عمرهای محاسبه شده در دو مرحله‌ی فوق است. در ادامه، مقدار آسیب با طول عمر محاسبه شده (مجموع طول عمرهای دو مرحله) ارزیابی می‌شود و اگر کمتر از مقدار بحرانی آن بود، مرحله‌ی دوم مجدداً تکرار خواهد شد.

قابل توجه است که علاوه بر پیش بینی طول عمر خزشی ماده با استفاده از این روش، می‌توان مقدار آسیب ماده را که به صورت غیرخطی تغییر می‌کند در هر زمان ارزیابی کرد و طول عمر باقیمانده‌ی ماده را به دست آورد.

در قسمت بعدی، طول عمر خزشی سوپر آلیاژ IN738LC با استفاده از این روش محاسبه شده است. برای این محاسبه با استفاده از روش اصلاح شده مانکنم - گرانت، ابتدا باید پارامترهای مادی مربوط به معادلات مکانیک آسیب پیوسته (ν, n, B, A) را تعیین کرد.

برای سوپر آلیاژ IN738LC حداقل نرخ کرنش خزشی، با توجه به نتایج تجربی، به صورت:

$$\dot{\epsilon}_{\min} = 1.5 \times 10^{-11} \exp(0.025\sigma) \quad (8)$$

بیان شده است (شکل (۱)) [۵]. با استفاده از روش کمترین مجموع مربعات و نتایج حاصل از معادله‌ی (۸) می‌توان حداقل میزان کرنش خزشی را به صورت زیر بیان کرد (قانون توانی نورتون):

$$\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n$$

$$\sigma < 300 \text{ MPa} : A = 1.23925 \times 10^{-17}, n = 3.57147$$

$$\sigma > 300 \text{ MPa} : A = 5.10549 \times 10^{-40}, n = 12.67366 \quad (9)$$

در شکل (۲) تطابق نتایج حاصل از دو معادله‌ی (۸) و (۹) نشان داده شده است.

در این مقاله برای تعیین پارامترهای مادی مربوط به معادله‌ی تکامل آسیب (B و ν) از پارامترهای مادی رابطه‌ی کول - کاستیلو استفاده شده است.

کول و کاستیلو با تجزیه و تحلیل نتایج تجربی مجموع طول عمرهای خزشی مراحل اول و دوم را به صورت زیر بیان کردند:

$$t_p + t_s = k\dot{\epsilon}_s^{-m} \quad (10)$$

که در آن k و m - ثابت‌های مادی و مستقل از دما هستند. از سوی دیگر نشان دادند که طول عمر مرحله‌ی سوم خزشی با عمر گسست، رابطه‌ی خطی دارد (این موضوع در شکل (۳) برای سوپر آلیاژ IN738LC نشان داده شده است) و رابطه‌ی زیر را ارائه کردند [۶]:

$$t_t = bt_f^{n_1} \quad (11)$$

که مجموع طول عمر مرحله‌های اول، دوم و سوم می‌شود:

$$t_f = t_p + t_s + t_t \Rightarrow t_f = bt_f^{n_1} + k\dot{\epsilon}_s^{-m} \quad (12)$$

با فرض $n_1=1$ نتیجه می‌شود:

$$t_f = \frac{k}{(1-b)\dot{\epsilon}_s^m} \quad (13)$$

که در آن k ، b و m پارامترهای مادی، مستقل از دما و در جدول (۱) آورده شده‌اند. $\dot{\epsilon}_s$ نیز حداقل نرخ کرنش خزشی است. در روش بالا طول عمر مرحله‌ی سوم خزش نیز منظور شده است و در نتیجه، تغییرات ساختاری ایجاد شده در ماده نیز بر طول عمر ماده اثر گذار می‌باشند.

پس می‌توان طول عمرهای به دست آمده از روش مکانیک آسیب پیوسته در معادله (۷) و روش کول - کاستیلو، (۱۳)، را هم ارز با هم قرار داد:

$$\frac{k}{(1-b)A^m \sigma^{mm}} \equiv \frac{1}{B(1+\nu)\sigma^\nu} \quad (14)$$

$$\Rightarrow \nu = mn, B = \frac{(1-b)A^m}{k(1+nm)}$$

با توجه به جدول (۱) و رابطه‌ی (۹) نتیجه می‌شود:

$$\sigma < 300 \text{ MPa} \Rightarrow \nu = 3.57174 \times 0.8246 = 2.945257, B = 4.59749 \times 10^{-15}$$

$$\sigma > 300 \text{ MPa} \Rightarrow \nu = 10.4507, B = 5.50799 \times 10^{-34}$$

حال پارامترهای مادی موجود در مدل مکانیک آسیب پیوسته برای سوپر آلیاژ IN738LC مشخص هستند و می‌توان از روابط به دست آمده از این مدل استفاده کرد. طول عمر خزشی سوپر آلیاژ IN738LC با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته و با به کار بردن معادله‌ی (۷) برای تنش ۲۰۰ مگاپاسکال به صورت زیر به دست می‌آید:

$$t_f = \frac{1}{B(1+\nu)\sigma^\nu} \Rightarrow t_f = 2558.45 \text{ hr} \quad (7 \text{ معادله})$$

با استفاده از روش کول - کاستیلو نتیجه می‌شود:

$$t_f = \frac{k}{(1-b)\dot{\epsilon}_s^m} \Rightarrow t_f = 2390 \text{ hr} \quad \text{از معادله (۱۳)}$$

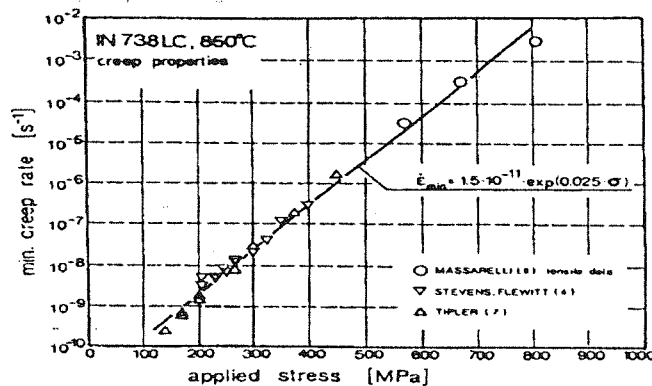
و با استفاده از روش اصلاح شده در این مقاله نتیجه می‌شود:

$$t_f = \frac{C}{\dot{\epsilon}_s^{m_1}} \quad \text{(رابطه مانکنم - گرانت کلاسیک)}$$

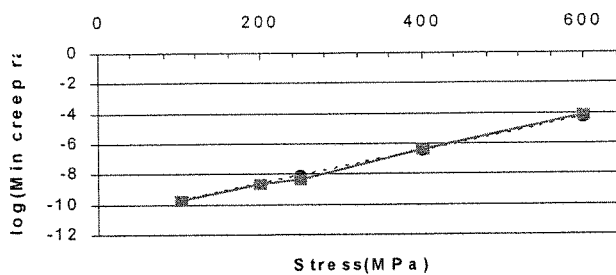
که در آن c و m_1 با توجه به شکل (۴) مشخص می‌شوند. زمان به دست آمده در این مرحله 1867.9 ساعت است. با استفاده از معادله (۶) در زمان 1867.9×3600 ثانیه و تحت تنش 200 مگاپاسکال نتیجه می‌شود: $1-D=0.7181$ نتیجه نرخ کرنش در این زمان 6.68×10^{-9} خواهد بود (با استفاده از معادله (۴)). با جای‌گذاری کرنش خزشی به دست آمده (برای مرحله سوم خزش) در معادله، مانکنم - گرانت، زمان گسست مرحله‌ی سوم خزشی 762 ساعت به دست می‌آید که می‌تواند با زمان محاسبه شده برای مراحل اول و دوم جمع شود و در نتیجه طول عمر خزشی برابر با 2630 ساعت خواهد شد. در این مرحله بار دیگر باید مقدار آسیب را محاسبه کرد و اگر از آسیب بحرانی (که مقداری کمتر از یک است) کوچکتر بود، مرحله دوم مجدداً تکرار خواهد شد تا طول عمر خزشی سوپر آلیاژ IN738LC به دست آید. برای تکرار مرحله‌ی دوم دو راه وجود دارد. اول آنکه می‌توان مقدار آسیب را با تنش ظاهری 200 مگاپاسکال و مجموع زمان‌های محاسبه شده‌ی قبلی به دست آورد. دیگر آنکه می‌توان با استفاده از تنش مؤثر در هر مرحله و مدت زمان کارکرد ماده تحت این تنش، مقدار آسیب ایجاد شده در هر مرحله را محاسبه و با آسیب قبلی جمع کرد. در شکل (۵) تطابق آسیب‌های اندازه‌گیری شده با دو روش فوق نشان داده شده است. در جدول (۲) نتایج حاصل از روش‌های مانکنم - گرانت، کول - کاستیلو، مکانیک آسیب پیوسته و روش ارائه شده در اینجا با هم مقایسه شده‌اند و مشاهده می‌شود که طول عمر پیش‌بینی شده با این روش، تقریباً مطابق با نتایج حاصل از روش‌های کول - کاستیلو و مکانیک آسیب پیوسته است. طول عمر پیش‌بینی شده با روش مانکنم - گرانت کمتر از دیگر پیش‌بینی‌هاست که دلیل آن منظور نشدن مرحله‌ی سوم خزش در آن روش است.

نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش مکانیک آسیب پیوسته، رابطه‌ی مانکنم - گرانت کلاسیک اصلاح شده است تا بتوان در پیش‌بینی‌ها طول عمر مرحله‌ی سوم خزش را نیز منظور کرد. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود نتایج حاصل از این روش به نتایج به دست آمده از روش کول - کاستیلو نزدیک است. همچنین، با توجه به تغییرات غیر خطی آسیب و تنش مؤثر (شکل‌های (۶) و (۷)) از این روش می‌توان برای پیش‌بینی طول عمر باقیمانده مواد نیز استفاده کرد (در روش کول - کاستیلو این امکان وجود ندارد و عمر باقیمانده به صورت خطی قابل محاسبه است). از سوی دیگر با تعیین مقدار آسیب بحرانی به صورت تجربی (و احتمالاً در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان مناسب) می‌توان با استفاده حداکثر از طول عمر خزشی ماده از واماندگی کامل قطعه نیز جلوگیری کرد.



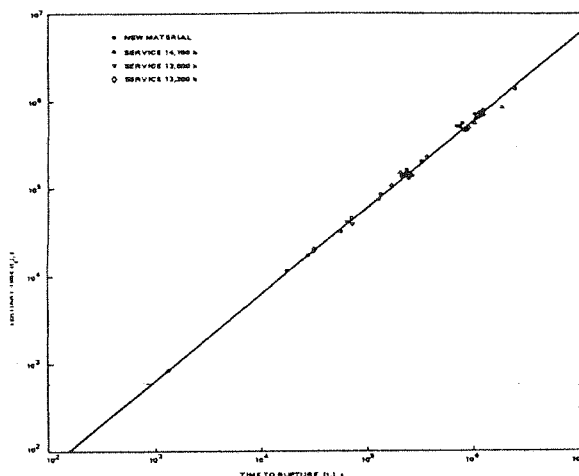
شکل (۱): حداقل نرخ خزشی به عنوان تابعی از تنش اعمال شده برای سوپر آلیاژ IN738LC [۴].



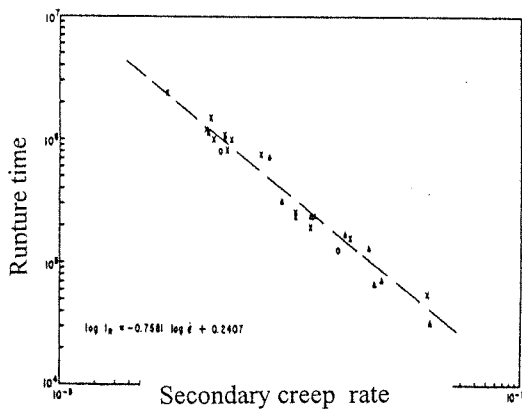
شکل (۲): تطابق نتایج حاصل از دو معادله (۸) و (۹) (معادله (۸) و معادله (۹)) [۷].

جدول (۱): مقادیر تجربی ثابت‌های مادی معادله (۱۳) برای سوپر آلیاژ IN738LC [۶].

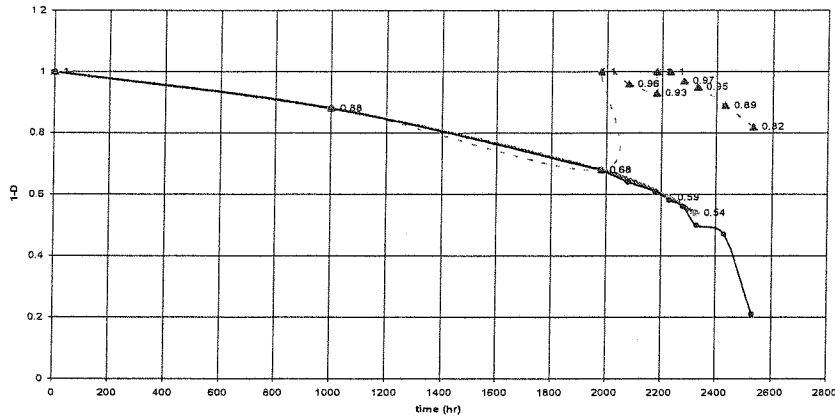
k	m	b	n
0.2199	0.8246	0.6515	0.996



شکل (۳): رابطه‌ی بین طول عمر گسست و عمر مرحله‌ی سوم خزشی برای سوپر آلیاژ IN738LC [۶].



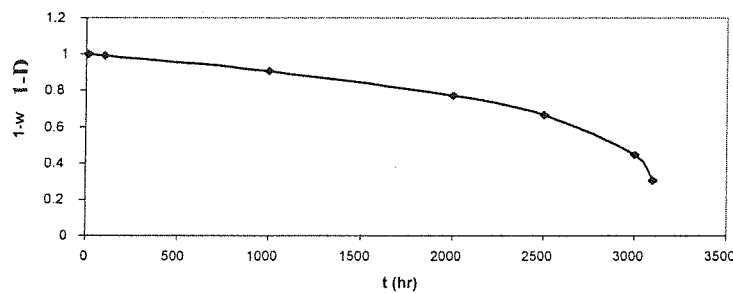
شکل (۴): زمان گسست در برابر نرخ خزش برای سوپر آلیاژ IN738LC (×) بر مبنای رابطه‌ی M-G. داده‌های خزشی IN738LC کار کرده نیز نشان داده شده‌اند (o؛ 20000 hr؛ Δ، 13000 hr) [۶].



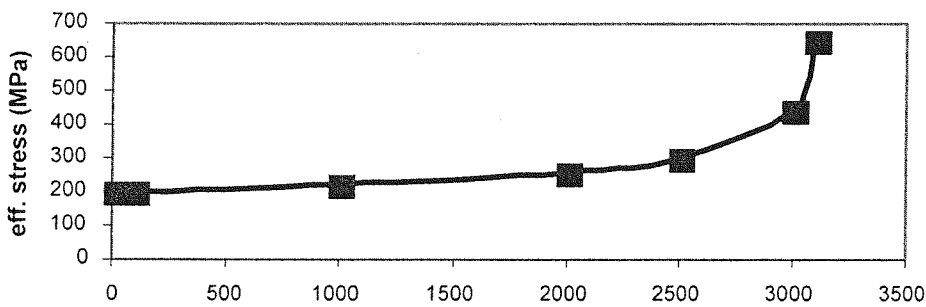
شکل (۵): تطابق آسیب اندازه گیری شده در هر مرحله (آسیب اندازه گیری شده در هر مرحله، آسیب اندازه گیری شده با تنش ثابت و مجموع آسیب های ایجاد شده در مراحل مختلف) [۷].

جدول (۲): مقایسه ی طول عمرهای پیش بینی شده با روش های مختلف در تنش ۲۰۰ مگاپاسکال (D=1) [۷].

روش اصلاح شده	مکانیک آسیب پیوسته	کول - کاستیلو	مانکن - گرانٹ
2630	2558	2390	1867



شکل (۶): تکامل آسیب در برابر زمان برای سوپر آلیاژ IN738LC [۷].



شکل (۷): افزایش غیر خطی تنش موثر با گذشت زمان (تحت تنش ظاهری 200 MPa برای سوپر آلیاژ IN738LC) [۷].

- [1] A.K.Koul, R. Castillo and K.willett, 'creep life prediction in Ni-based super alloys', Material Science and Engineering, vol. 66, pp. 213-226 (1984)
- [2] J. L. Chaboche, Continuum Damage Mechanics: ASME Journal of Applied Mechanics part I-General Concepts, vol.55, pp 54-64 (1988)
- [3] J.M. Rongvaux, J. Y. Guedou,'Mechanisms of fatigue and creep damage of two superalloys for turbine blades', proceeding of the symposium in High temperature Fracture Mechanisms and Mechanics, European Group on Fracture (1990)
- [4] M. Zyckowski , 'Creep damage evolution equations expressed in terms of dissipated power', Int. J. of Mechanical Science, vol.42, pp. 755-769 (2000)
- [5] B. Buchmayr ,W. Hofflener, 'Some interaction of creep and fatigue in IN738LC at 850° C ', proceeding of the symposium in High Temperature Alloys for Gas Turbine 1982, Netherlands(1982)
- [6] R. Castillo, A.K.Koul and E.H.Toscano, 'Life time prediction under constant load creep condition for a cast Ni-base super alloy'. J. of Eng. For Gas Turbines and Power, vol. 109, pp.101-109(1987)
- [7] مهدی سلیمی، مکانیک آسیب پیوسته، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۲