# روش المان محدود غیرخطی برای تحلیل تنشها درچشم کوچک شاتون در هنگامه احتراق

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز	سيد اسماعيل رضوي
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز	تاجبخش نويد چاخرلو
دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند	احمدحسين أصفىنژاد

#### چکیدہ

طراحی شاتون، به دلیل اینکه واسطه تبدیل حرکت رفت و برگشتی پیستون به حرکت دورانی میل لنگ میباشد از اهمیت ویژهای برخوردار است، بنابراین تحقیقاتی که بتواند در طراحی بهینه کاربرد داشته باشد میتواند به افزایش کارایی موتور منجر شود. درپژوهش حاضر توزیع تنشها در چشم کوچک در هنگامه احتراق بررسی میشود. در این بررسی مدل المان محدود سه بعدی شامل چشم کوچک، گژن پین و باس پیستون ارایه شده و با کاربرد المانهای تماسی، اندرکنش این قطعات و رفتار چشم کوچک مدلسازی میشود. با مقایسه نتایج عددی به دست آمده با آنچه از روابط نیمه تجربی به دست میآید توافق خوبی مشاهده میشود. هرچند مدل المان محدود نشان میدهد که روابط نیمه تجربی نمیتوانند توزیع تنش بحرانی را به درستی پیش بینی کنند.

کلمات کلیدی: چشم کوچک شاتون، تحلیل تنش، المانهای تماسی.

## A Nonlinear Finite Element Method for Analysis of Stresses in Connecting Rod Small-End During Combustion Stroke

S. E. Razavi and T. Navid Chakherlou School of Mechanical Eng. University of Tabriz A. H. Asefi Nejad Mech. Eng. Dept., Sahand University

#### Abstract

Because of the motion transferring role of connecting rod from piston to crankshaft, an accurate design of this part is of vital important. In this research the stress distribution in small-end during combustion stroke is obtained. 3-D finite element method (FEM) is employed to model the interaction of piston pin, connecting rod small-end, and piston bosses in combustion stroke. Contact sections of the mentioned parts are modeled by employing enhanced contact elements. Non-linear analysis is performed to solve the governing equations. The results were compared with semi-empirical relations of other investigators in which good agreement would exist. Besides, it is shown that semi-empirical method cannot properly predict the critical stress distribution in combustion stroke.

#### Key words: Small-end, Stress analysis, Contact elements.

۱– مقدمه

طراحى شاتون به دليل اينكه وظيفه بسيار مهم انتقال حركت از پیستون به میل لنگ را بر عهده داشته وعلاوه بر آن بیشترین تاثیر را در موزونسازی (بالانس کردن) موتور بر عهده دارد از اهمیت بسزایی برخوردار است. پروفیل حرکت وچرخه بارگذاری پیچیده ومتغیر- حتی در سرعتهای ثابت موتور- واندرکنش شاتون با گژن پین، پیستون- از طریق گژن پین- میل لنگ، بوشها و یاتاقانها و پیچهای مورد استفاده در آن از جمله مواردی هستند که مدلسازی وتحلیل این قطعه را پیچیده می سازد. به این مسایل باید مشکلات متالورژیکی را که منجر به از کار افتادگی شاتون می شود نیز اضافه کرد [۱]. از اینرو هر یک از مدل های ارایه شده برای شاتون بنا به نیاز شامل تأکید بر بررسی بخشهایی از آن است. برای مثال شکست ساقه ناشی از مشکلات متالورژیکی، شکست چشم بزرگ به دلیل گوشههایی که برای پیچهای D-head در آن پیشبینی می شود وشکست چشم کوچک به دلیل سایش<sup>(۱)</sup> چشم کوچک با بوش برنزی پرس شده در آن گزارش شده است [۲]. گفتنی است با توجه به طول تماس زیاد گژن پین و پیچیدگی رفتار قطعات در محلهای تماس با چشم کوچک شاتون و باس پیستون، این نوع خاص سایش منجر به شکستهای خستگی با سازوکارهای بسیار پیچیدهای میشود که اکنون تحقیقات گستردهای در زمینه موتورهای احتراق داخلی روی آن صورت می گیرد [۳ و ۴]. [4] [6] و Kolchin [7] از جمله منابعی هستند که با رویکردی تحلیلی- تجربی اقدام به ارایه مدلهایی برای توزیع تنشها در چشم کوچک کردهاند. [۲] تحلیل خستگی یک شاتون از کار افتاده موتور دیزلی حادثه دیده را انجام داده است. این تحلیل بر اساس اثرات سایش (fretting) بوده و منجر به اصلاح پروفیل دندانههای جای پیچها در چشم بزرگ و تغییر مصالح ساخت شده است.

Fessler وهمکاران [۸] مدلی از جنس پلی استرن شامل چشم کوچک وقسمتی از ساقه شاتون، گژن پین و پیستون ساخته و به بررسی تجربی تنشها در گژن پین با روش فتوالاستیسیته در هنگامه احتراق پرداخته اما در خصوص توزیع تنشها درچشم کوچک گزارشی ارایه ندادهاند. بسیاری دیگر از

پژوهشها نیز در خصوص مدلسازی فورجینگ و تحلیل تنشها درآن حالت [۹ و ۱۰] و یا سایر مراحل ساخت [۱۱] بوده است. شاید عمدهترین موردی که با عث میشود تحلیل تنش

هدف از پژوهش حاضر ارایه مدل المان محدود سه بعدی جامع برای تحلیل تنش چشم کوچک در هنگامه احتراق است. برای این منظور مدل المان محدودی شامل شاتون، گژن پین و باس پیستون شکل ۲، ساخته شده و المانهای تماسی نیز در سطوح تماس قطعات تعریف میشود. سپس با کمک تحلیل غیر خطی اندرکنش آنها به دقت مدل شده و توزیع تنشها در چشم کوچک در هنگامه احتراق به دست آورده میشود. در ادامه نتایج حاصل با نتایج تحلیلی [۵ و ۶] مقایسه خواهند شد.

### ۲- مدل المان محدود

همانگونه که از شکل ۱ مشخص است مجموعه پیستون، گژن پین و شاتون نسبت به صفحات شعاعی و محوری که از آنها میگذرد متقارن است، بنابراین مطابق شکل ۲ برای مدلسازی یک چهارم گژن پین و شاتون و یک دوم یکی از باسهای پیستون در نرم افزار ANSYS مدل شده و شرایط مرزی تقارن اعمال میشود. برای تولید شبکه از المان SOLID45 و در محلهای تماس نیز از المان تماسی CONTACT49 استفاده شده است. خواص و مشخصات قطعات گفته شده و شرایط موتور در جدول ۱ آمده است بحرانیترین بارگذاری فشاری بر روی چشم کوچک در هنگامه انفجار ایجاد میشود. نیروی عکسالعمل برآیند ناشی از احتراق و اینرسی به وسیله رابطه (۱) محاسبه شده و به صورت فشار یکنواخت روی قسمتی از ساقه شاتون که برش

 $F_{com} = (p_{g,\max} - p_0)A_p - m_p R \alpha_t^2 (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi)$ 

1- Fretting

(1)



شکل ۱- مجموعه پیستون، چشم کوچک شاتون و گژن پین



شکل ۲- هندسه وتولید شبکه المان محدود نوعی برای زاویه استقرار چشم کوچک روی ساقه شاتون  $arphi_{em}=110^{\circ}$ 

جدول ۱- مشخصات پیستون، گژن پین و شاتون و شرایط

 $d_p$ 

موتور				
	0.264	R	33.35 mm	
	23.820 mm	$r_m$	15.5 mm	
	14.7 mm	$m_p$	0.6654 kg	

برای بررسی اعتبار (validation) جوابهای به دست آمده، توزیع تنشهای ایجاد شده در گژن پین که از مدلهای حاصل از مدل المان محدود حاضر به دست آمده بود با نتایج حاصل از فتوالاستیسیه [۸] مقایسه شد که مطابقت

بسیار خوبی مشاهده شد، شرح تفصیلی آن در [۱۳] آمده است.

#### ۳- نتیجهگیری

برای مقایسه نتایج حاصل از المان محدود با مدلهای نیمه تجربی از روابط مرجعهای [۵ و ۶] استفاده میشود.

شکل ۴ کانتورهای تنش خمشی  $(\sigma_{ heta})$  در مجموعه چشم کوچک، گژن پین وباس پیستون است. برای نشان دادن بهتر کانتور تنش مذکور در چشم کوچک، این قطعه از مجموعه جدا و در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. این شکل به روشنی نشان مىدهد حداكثر تنش در سطح داخلى در  $\varphi_{cr} = 180^\circ$  رخ میدهد که روش تحلیلی قادر به پیشبینی آن نیست، زیرا در روش تحلیلی چشم کوچک حلقهای در نظر گرفته می شود که روی نیمه پایینی خود در  $arphi_{cr}=\pmarphi_{em}$  به طور صلب مقید ( شده است [۵ و ۶]. نتایج تنشهای محیطی ( $\sigma_{ heta}$ ) و تنشهای شعاعی ( $\sigma_r$ ) حاصل از مدل های المان محدود در موقعیت های مشخص شده در شکل ۳ بر حسب تغییرات (  $arphi_{cr}$  ) که نسبت به محور تقارن عمودی چشم کوچک اندازه گیری می شود شکل ۲ برای زاویه استقرار <sup>°</sup>110 در شکل ۵ رسم شده است. به خاطر تقارن شاتون نسبت به محور عمودی که از آن می گذرد، یک دوم نمودار رسم شده است. این شکل به روشنی نشان میدهد که حداکثر تنشهای محیطی در لبه بیرونی چشم کوچک  $\sigma_{ heta}, 2-ext$  شکل ۳ روی میدهد.

همچنان که شکل ۵ نشان میدهد حداکثر تنشهای شعاعی در  $\varphi_{cr} = \pm 180^{\circ}$  در محل لبههای گرن پین شکل ۳ و 2-ext روی میدهد، این مورد ناشی از تماس شدیدتر گژن پین با چشم کوچک در آن ناحیه است، که از کانتورهای شکلهای ۴ کاملاً مشخص است.

برای مقایسه نتایج حاصل از المان محدود با روشهای نیمه تجربی نتایج گرهی المان محدود در محلهای 2-ext و 2-ext در سطح خارجی و int-2 و int-3 درسطح داخلی به ترتیب در شکلهای ۶-الف و ۶-ب برای زاویه استقرار °110 رسم شده است. چنانکه شکل ۶-الف نشان میدهد روابط نیمه تجربی [۵ و ۶] در سطح خارجی فقط میتوانند برآوردی در وسط چشم کوچک (ext) ارایه دهند وقادر به پیشبینی تنشها در لبه سطح خارجی چشم کوچک (2-ext) نیستند. این شکل نشان

میدهد که استفاده از روابط نیمه تجربی در محدوده میدهد که استفاده از روابط نیمه تجربی در محدوده  $-\varphi_{em} \leq \varphi_{cr} \leq \varphi_{em}$  ایمن میباشد اما قادر به پیشبینی حداکثر تنش در سطح داخلی که در  $\varphi_{cr} = \pm 180^{\circ}$  رخ میدهد نمیباشد. علت رشد نسبی تنشها در لبه بیرونی چشم کوچک (ext) تغییر شکل زیاد این محل به علت تماس با گژن پین است که از کانتورهای شکلهای ۴ به وضوح دیده میشود. شکل ۶-ب برای سطح داخلی نشان میدهد استفاده از روابط تجربی در محدوده قابل ملاحظهای از چشم کوچک ایمن نیست.

شکل ۷ مقایسهای بین نتایج عددی مدلسازی المان محدود حاضر در وسط و لبههای گژن پین در سطوح داخلی و خارجی آن است شکل ۳. از  $\varphi_{cr} = 100^{\circ}$  به بعد افزایش قابل توجهی در میزان تنشهای خمشی ( $\sigma_{\theta}$ ) به وجود میآید. همانگونه که از این شکل نیز مشاهده میشود بحرانیترین توزیع تنش در لبه

بیرونی چشم کوچک (ext) روی میدهد که روش تجربی قادر به پیش بینی آن نیست.



شکل ۳- موقعیت گرههای انتقال یافته جهت رسم نمودار ۵



شکل ۴- الف- توزیع تنشهای محیطی (  $\sigma_{ heta}$  ) بر حسب MPa در مجموعه چشم کوچک شاتون، گژن پین و باس پیستون، شکل ۴- الف- توزیع تنشهای محیطی (  $\sigma_{ heta}$  ) در شکل (ب) چشم کوچک از مجموعه ( الف) جدا شده است.



 $arphi_{em}=110^{\circ}$  شکل ۵- توزیع تنشهای محیطی (  $\sigma_{ heta}$  ) و شعاعی (  $\sigma_{r}$  ) در چشم کوچک (



(ب)

(الف)

شکل ۶- الف - توزیع تنشهای محیطی (  $\sigma_{ heta}$  ) در سطوح خارجی و (ب) داخلی چشم کوچک در هنگامه احتراق براساس مدلهای تکل  $^{9}$  الف - توزیع تنشهای محدود، برای زاویه استقرار چشم کوچک روی ساقه شاتون  $arphi_{em}=110^{\circ}$ 



شکل ۲- مقایسه توزیع تنشهای خمشی (  $\sigma_ heta$  ) در سطح داخلی وبیرونی چشم کوچک در هنگامه احتراق براساس مدل المان محدود، برای زاویه استقرار چشم کوچک روی ساقه شاتون  $arphi_{em}=110^\circ$ 

М	گشتاور محیطی		نمادها
$m_p$	جرم مجموعه پيستون	Α	سطح مقطع چشم کوچک
Ν	نیروی نرمال	$A_p$	سطح مقطع پيستون
$n_t$	سرعت حداکثر گشتاور موتور <i>rpm</i>	D	قطر پيستون
$p_0$	فشار اتمسفر	$d_i$	قطر داخلی گژن پین
$p_{g,\max}$	حداکثر فشار گاز	$d_p$	قطر بیرونی گژن پین
$q_{com}$	شدت بار گسترده احتراق	h	ضخامت چشم کوچک
R	شعاع لنگ	$l_b$	پهنای چشم کوچک
$r_m$	شعاع متوسط چشم کوچک	$l_p$	طول گژن پین

www.SID.ir

- [6] Kolchin A., Demidov V., "Design of Automotive Engine", Mir Publishers, 1984.
- [7] Rabb R., "Fatigue Failur of a Connecting Rod", Engineering Failure Analysis, 1996.
- [8] Fessler H., Hyde T. H., "Stress Distribution in Gudgeon pins", Strain Analysis, Vol. 32, No. 5, 1997.
- [9] Cho J. R., Yang D. Y., "Three Dimensional Finite Element Simulation of Connecting Rod Forging Using a New Remeshing Scheme", Engineering Computation,, Vol. 5, No. 6, 1998.
- [10] Lohmousavi M., Bakhshijouybari M. B., "The comprehensive system of design and simulation of connecting rods forging aided computer", 6 th. SMEIR, 2002.
- [11] Fukuda S., Eto H., "Development of Fracture Splitting Connecting Rod", SAE of Japan, Elsevier Science, 2002.
- [12] Zahavi, E., Barlam, D., "Non-Linear Problem in Machine Design", CRC Press, 2000.
- [13] Assefinejad A. H., "Stress Analysis in Connecting Rod Small-end and Gudgeon Pin of Internal Combustion Engines", MEng. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, 2004.

[۱۴] تیموشنکو س.، "مقاومت مصالح"، ترجمه توکلی هشجین

ت، مهرکار اصل م.، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۴.

λ

$$\sigma_{_{ heta}}$$
 ننش مماسی

 $\sigma_{_{ext}}$  تنش مماسی در سطح خارجی چشم کوچک

- $\sigma_{_{
  m int}}$  تنش مماسی در سطح داخلی چشم کوچک
- $arphi_t$   $m_t$   $rad / \sec$  موتور  $m_t$   $m_t$

$$arphi$$
 زاویه لنگ

$$\mathcal{P}_{em}$$
 تقارن عمودی شاتون

تغییرات زاویه حلقه چشم کوچک نسبت به محور تقارن عمودی

 $arphi_{cr}$ شاتون

مراجع

- ASM Handbook, "Failure Analysis and Prevention", ASM International, 1986, Vol. 11.
- [2] Wright D. H., "Testing Automotive Materials and Components", SAE, 1993.
- [3] Zhang C. et. al., "Scuffing Behavior of Piston-Pin/Bore Bearing in Mixed Lubrication, Part I: Experimental Studies", Tribology Transaction, Vol. 46, 2003.
- [4] Zhang C. et. al, "Scuffing Behavior of Piston-Pin/Bore Bearing in Mixed Lubrication, Part II: Scuffing Mechanism and Failure Criterion", Tribology Transaction, Vol. 47, 2004.
- [5] Khovakh M., "Motor Vehicle Engine", Mir Publishers, 1979.