

بهینه سازی طراحی بر مبنای نتایج تجربی و با استفاده از روش عناصر محدود

مهندس سیدمصطفی میرسلیم

مری دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

مشکلات ناشی از ضعف طراحی قطعات بعد از عملکرد، مورد بررسی و معاینه دقیق قرار گرفته است و سپس با استفاده از معادلات کشسانی (élasticité) و به کمک روش محاسبه عناصر محدود (méthode des éléments finis)، الگویی از قطعه مورد نظر به دست آمده است. برای تحلیل هرچه دقیقتر نقاط ضعف، همان الگو وسیله ای شده است برای اصلاح نقشه و بهینه سازی طراحی به گونه ای که برطرف کننده نواقص اولیه باشد. به عنوان مثال دسته سمیه* يك موتور دیزل انتخاب شده و به استناد مشاهدات عینی از وضع قسمت فوقانی آن، نقشه بهینه ای برای حذف پدیده سایش (fretting) پیشنهاد شده است.

Design optimization, on the base of experimental results and by the use of finite element method

S.M.Mirsalim, Mechanical Engineering

Amirkabir Univ.of Technology

Abstract:

We have studied some mechanical difficulties which occur in a typical engine after a normal period of running and that come from the weakness of design. Engine pieces were examined precisely and the amplitude of deformation were measured. By using elasticity equations and the finite element method, we have defined a model for a bidimensional particular part of the piece. Then we profited from the same model to correct the design and to eliminat the functional problem. The engine piece we studied in this article is the connecting rod of a semi - rapid diesel engine. We observed the upper part of this piece had suffered from fretting and pitting. We proposed, finally, a modified contour for this part to suppress fretting between Journal and the upper hole of the connecting-rod.

* *Connecting-rod*

محاسبه تنشها و تغییر شکلها (جابجایی های درونی) مرحله مهمی در طراحی ساختار مکانیکی است. شناخت ناقص تنشها یا جابجایی های داخلی هر قطعه تحت تأثیر نیروهای خارجی، می تواند عواقب ناگواری به بار آورد. مثلاً ممکن است منجر به حالت های غیر عادی از لحاظ شکل عمومی یا ابعاد شود یعنی قطعاتی با اندازه های اغراق آمیز و بنابراین گران یا قطعاتی با اندازه های ضعیف و بنابراین عملکردی خطرناک به دست دهد. بنابراین اگر بخواهیم طراحی با ملاحظات دوجنبه مهم یعنی اطمینان از عملکرد و قابلیت رقابت صورت پذیرد، ضروری است تحریکاتی را که بر هر قطعه مکانیکی در حین بهره برداری اعمال خواهد شد، با دقت بشناسیم.

عموماً برای تعیین تنشها و تغییر شکلها، قواعد و دستورهای متعارف مقاومت مصالح به کار می رود. در بسیاری از موارد این قواعد کافی هستند ولی کاربرد آنها تا موقعی مجاز است که قطعات را بتوان تشبیه به شکل های ساده نظیر تیر یا ستون کرد. در موارد پیچیده تر ناگزیر باید از معادلات نظریه کشسانی کمک گرفت. در مواردی که فرض جابجاییهای کوچک مقبول باشد، این نظریه بخوبی می تواند رفتار یک سازه را تحت تأثیر تحریکهای ایستای خارجی تشریح کند.

معادلات ناشی از نظریه کشسانی از لحاظ ریاضی دقیق هستند اما در آنها مشتقات نسبی وجود دارد و لذا حل آن دستگاه معادلات جز در مورد قطعات ساده و حالت بار ساده میسر نیست مگر به کمک وسایل محاسباتی پیشرفته و با استفاده از روشهای ویژه نظیر روش عناصر محدود. در این بررسی نرم افزار مورد استفاده متکی به نظریه کشسانی برای قطعات دوبعدی همسانگرد (isotrope) و حالت تنش دوبعدی و جابجایی دوبعدی و روش عناصر محدود با عناصر مثلثی هم فراسنج (isoparametrique) با شش گره (noeud) می باشد.

(۲) صورت مسأله

بررسی سایش (fretting) پوسته داخلی قسمت فوقانی دسته سمبه - جستجوی راه حل بهینه. با معاینه قطعات کار کرده موتور محرک یک قطار، پس از هشتصد هزار کیلومتر، مشاهده شد که حفره قسمت فوقانی دسته سمبه ها به شکل بیضی درآمده اند. پس از استخراج یاتاقان حلقوی، حفره شکل استوانه ای با مقطع دایره ای خود را بازیافت: شکل ۱.

بیضی شکل شدن این حفره که قطر آن 92mm است، به اندازه 0.05mm، نتیجه تغییر شکل کشسان جایگاه یاتاقان (به قطر 102mm) است یعنی بین یاتاقان و جایگاهش در قسمت فوقانی دسته سمبه یک لغزش پدید آمده است. آنچه از معاینه سطوح خارجی یاتاقان و داخلی جایگاهش یعنی حفره قسمت فوقانی دسته سمبه استنباط می شود حاکی از دونکنه است:

- ۱- در قسمتهایی پوسته سطحی کنده شده و گویای پدیده اصطکاک است. این را سایش می گوئیم (fretting).
- ۲- در قسمتهایی نقطه جوشهای بسیار ریز دیده می شود که هنگام استخراج یاتاقان از هم گسیخته شده و اثری که با ناخن محسوس است، باقی گذارده است. این را خال خوردگی (pitting) می گوئیم.

این دو اشکال باعث کاهش قابلیت تخلیه گرما و افزایش دمای یاتاقان و در نتیجه، از هم گسیختن غشاء روغن می شود. به علاوه ممکن است سرآغاز ترک خوردگی هم بشود. از طرف دیگر با معاینه دقیق داخل یاتاقان، مشاهده می شود که منطقه ای با وسعت زاویه ای فقط حدود 140° تیره رنگ شده است که همان منطقه تماس محور سمبه (Gudgeon Pin) و یاتاقان است.

(۳) هدف

می خواهیم این پدیده مضر یعنی سایش پوسته ای را حذف کنیم یا اثر آن را کاهش دهیم. بدین منظور ابتدا سعی می کنیم هر چه بهتر الگویی به دست آوریم که نزدیک به حالت واقعی باشد و به کمک آن، شناخت کاملتری از رفتار قطعه تحت تأثیر نیروهای احتراق و لختی (Combustion & Inertie) کسب کنیم. سپس روی الگو مبادرت به تغییر برخی عوامل و فراسنج ها (Parametres) و بررسی نتایج آن بر تنش و تغییر شکل می کنیم.

محاسبه تنشهای واقعی - برای این محاسبه، باید فرضهای مناسبی انتخاب کنیم که با نتایج تجربی معاینه شده تطابق داشته باشد و ضمناً درخور نرم افزار نیز باشد. با استفاده از داده ها، تغییر شکلها و تنشها به دست می آید. با این محاسبه می توانیم تنشهای عمودی و مماسی را روی سطح تماس یاتاقان و حفره قسمت فوقانی دسته سمبه مقایسه کنیم و سپس بهترین ترکیب داده ها را که نتایج رضایتبخش داده اند برگزینیم.

اثر عوامل مختلف - حال با استفاده از الگوی به دست آمده می توانیم محاسبه را از سر گیریم و عواملی نظیر ضخامت یاتاقان و نقشه قسمت فوقانی دسته سمبه را تغییر دهیم تا

شکلهایی که موجب بهبود مقاومت دسته سمبه می شود و قابلیت ساخت و تولید را دارد به دست آید.

پدآوری: در این بررسی تغییر کلی پهنای قطعه و نیروی حلقه اندازی را در نظر نگرفته ایم زیرا مطالعه قبلی به ما نشان داده بود که نیروی حلقه اندازی تأثیر کمی بر کاهش لغزش دارد و این که تغییر پهنای مطمئناً بر نرخ تنش داخل قطعه مؤثر است ولی ضرورت‌های ناشی از کمبود فضا چنان راه‌حلهایی را حذف می کند.

۴) شبکه بندی عناصر

در محاسبات پی در پی معلوم شد که فشردگی شبکه عناصر تأثیر بسزایی بر پیوستگی و قابلیت اطمینان نتایج دارد. به همین دلیل بالاخره در منطقه بحرانی بر ظرافت شبکه افزوده ایم: تعداد گره‌ها بر روی سطح تماس یاتاقان و حفره قسمت فوقانی دسته سمبه دوبرابر شده است تا بتوان با استقلال آنها از یکدیگر اثر جابجایی نسبی یعنی اثر لغزش یاتاقان را نسبت به حفره مطالعه کرد. با توجه به صفحه تقارن دسته سمبه، فقط نیمی از آن شبکه بندی شده است تا در مدت زمان محاسبه صرفه جویی شود شکل ۲.

۵) شرایط سرحدی جابجایی

گره‌هایی که روی محور تقارن قرار گرفته اند در حرکت خود به موازات محور تقارن آزادند ولی در جهت عمود بر آن بی حرکتند. بدین ترتیب قابلیت تشابه مناسبی برای قسمتی از دسته سمبه که در شبکه بندی منظور نشده است به دست می آید. گره‌هایی که روی محل اتصال قسمت فوقانی دسته سمبه با ستون بدنه آن قرار داده شده اند در دو جهت OX و OY بی حرکتند.

۶) نیروهای اعمال شده

این نیروها ناشی از احتراق و لختی و حلقه اندازی است. برای محاسبه تنشها، سه مورد ترکیب نیروها را در نظر می گیریم: حلقه اندازی؛ حلقه اندازی + احتراق؛ حلقه اندازی + لختی. برای حلقه اندازی عملاً دسته سمبه به دمای 100°C گرم می شود در حالی که یاتاقان را با غوطه ور ساختن در ازن مایع در 195°C خنک می کنند.

نیروی احتراق موجب تراکم و نیروی لختی موجب کشش دسته سمبه می شود. اما با توجه به این که بین محور سمبه و یاتاقان لقی وجود دارد عملاً نیروها فقط بر قسمتی از

پیرامون دایره مقطع یاتاقان و آن هم بر طبق قانون خاصی توزیع می شوند.

در مجموع شش حالت توزیع مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است: توزیع سینوسی و دوزنقه‌ای با زوایای 120° ، 150° ، 180° . در همه حالات، چه برای نیروی احتراق و چه برای نیروی لختی، مطالعه تنشهای عمودی و مماسی در سطح تماس یاتاقان - حفره، دو منطقه تنشهای بزرگ را نشان می دهد: شکل ۳ و شکل ۴.

اگر ضریب اصطکاک بین یاتاقان و حفره را 0.15 فرض کنیم به این نتیجه می رسیم که در آن دو منطقه امکان لغزش وجود دارد: در آنجا تنشهای مماسی بزرگتر از حاصلضرب تنشهای عمودی و ضریب اصطکاک است (تجاوز). به این ترتیب با محاسبه دو منطقه بحرانی ظاهر می شود حال آن که در واقع یکی بیشتر وجود ندارد. بررسی جابجاییهای ناشی از نیروهای احتراق نشان می دهد که بین این دو منطقه تفاوتی وجود دارد: در یک منطقه لغزش خالص وجود دارد در حالی که در دیگری نوعی همگرایی جابجاییها به چشم می خورد (مؤلفه های مماسیشان در دو جهت متقابل به هم تقسیم شده اند) به گونه ای که پوسته سطحی در این منطقه در حال تراکم است شکل ۵.

جابجاییهای ناشی از نیروی لختی نیز منطقه لغزشی را پدیدار می سازند که تقریباً با منطقه ناشی از احتراق تطبیق دارد. از میان شش حالت، توزیع سینوسی با زاویه 150° بهترین پاسخ را می دهد و نزدیکتر به نتایج تجربی است. بنابراین به عنوان الگو در محاسبات آتی، این حالت توزیع نیرو انتخاب می شود شکل ۶.

با این الگو محاسبه کامل انجام می گیرد و منحنیهای تغییر شکل رسم می شود: مؤلفه های مماسی تغییر شکل با نیروی احتراق شکل ۷ و با نیروی لختی شکل ۸ و منحنی تغییر شکل مقطع پیرامونی تحت تأثیر نیروی احتراق شکل ۹. ملاحظه می شود که منطقه تنشهای مماسی بیشینه از منطقه تغییرشکلهای مماسی بیشینه متمایز است و منطقه ای نیز وجود دارد که در آن تغییر شکلهای مماسی صفر است. در حالی که مابقی قطعه کلاً تغییر شکل می دهد.

برای تکمیل بررسی معیار ویژه ای نیز در نظر گرفته شده: تفاضل تنشهای مماسی بین حالت نیروی لختی و حالت نیروی احتراق شکل ۱۰. به این نتیجه می رسیم که این تفاضل در طرف ستون دسته سمبه تقریباً دو برابر طرف سمبه است:

$$4.8 \text{ daN/mm}^2 \text{ در مقابل } 2.35 \text{ daN/mm}^2$$

	طرف سیمه	طرف ستون دسته سیمه
	از 0.66 به 0.55	از 3.36..3- به 2.79-
نیروی احتراق	یعنی 18%-	یعنی 17%-
	-	از 22 به 20
	از 1.73- به 1.53-	-
نیروی لختی	یعنی 11%-	-
	-	از 35 به 34
	-	از 1.98 به 1.68
معیار ویژه-تفاضل بیشینه ² daN/mm	2.03	4

	طرف سیمه	طرف ستون دسته سیمه
نیروی احتراق	0.66	-3.36
	35	22
	0.48	2.18
نیروی لختی	-1.73	2.15
	25	35
	1.45	1.98

۸) محاسبه برای حالت پهنای متغیر

در حالتی که پهنای قسمت فوقانی دسته سیمه تغییر می کند و این تغییر به صورت پیوسته و تدریجی انجام می گیرد، محاسبات از سر گرفته شده است شکل ۱۱. نتایج محاسبات برای تنش در شکل های ۱۲ و ۱۳ و برای جابجایی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در مجموع به این نتیجه می رسیم که بین حالات پهنای متغیر و پهنای یکنواخت، چندان تفاوتی وجود ندارد. در منطقه بحرانی معذالک تنشهای مماسی در حالت پهنای متغیر نسبت به پهنای یکنواخت کمتر است.

۹) محاسبه با فرض امکان لغزش مماسی بین یاتاقان و حفره

نتیجه جابجاییها روی شکل ۱۵ مشخص شده است: هم یاتاقان و هم حفره دارای جابجایی مماسی با تغییر علامت هستند. البته در مورد حفره قسمت فوقانی دسته سیمه، شدت این امر بیشتر است. ملاحظه می شود که در یک منطقه تغییر مکان یاتاقان و حفره در جهت خلاف یکدیگرند.

۱۰) بهینه سازی ضخامت یاتاقان

یاتاقان موجود به ضخامت 5mm است. دو ضخامت دیگر برای محاسبه انتخاب شد: 3.5mm و 7mm. وقتی یاتاقان ضخیمتر را بررسی می کنیم ملاحظه می کنیم که تنشهای مماسی افزایش واضحی پیدا کرد. ولی در یاتاقان نازکتر بهبودهایی حاصل شد که در جدول خلاصه شده است شکل ۱۶. البته این بهبودها برای حل کامل مسأله سایش (fretting) کافی نیست خصوصاً که ضخامت یاتاقان را به کمتر از 3.5mm نمی توان رساند.

۱۱) بهینه سازی طراحی

با توجه به ابعاد سیمه و حرکت نوسانی دسته سیمه در اثر گردش میل لنگ ابتدا باید منطقه امکان تغییر در طراحی را مشخص کرد شکل ۱۷. اکنون چهار طرح جدید را مورد بررسی قرار می دهیم: طرح اول: قسمت اتصال به ستون نازکتر شکل ۱۸ طرح دوم: قسمت اتصال به ستون تقویت شده شکل ۱۸ طرح سوم: کل قسمت فوقانی تقویت شده شکل ۱۹ طرح چهارم: قسمت اتصال به ستون تقویت شده ولی بقیه نازکتر شکل ۱۹. خلاصه نتایج برای مقایسه در جدول پیوست آمده است شکل ۲۰.

۱۲) نتیجه گیری

الگوی مناسب برای مطالعه رفتار یاتاقان قسمت فوقانی دسته سیمه به دست آمد و اثر عوامل مختلف بر تغییر شکل و تنش داخل مجموعه یاتاقان - دسته سیمه مطالعه شد: راه حل قطعی جلوگیری از سایش پوسته داخلی قسمت فوقانی دسته سیمه اصلاح نقشه آن و تقویت طراحی است و با استفاده از روش عناصر محدود متوجه شدیم که افزایش ضخامت کل قسمت فوقانی دسته سیمه توأم با کاهش ضخامت یاتاقان، مسیر مناسبی برای بهینه سازی است. در تمام این مطالعه، مقایسه نتایج محاسبه با استفاده از ضریب اصطکاک برابر با ۰.۱۵ انجام گرفته است. شایسته است مستقلاً با آزمایش و اندازه گیری تجربی، مقدار دقیق آن تعیین شود و مورد استفاده قرار گیرد. البته این افزایش دقت، جهت کلی نتیجه گیری را تغییر نمی دهد.

جدول خلاصه مقایسه نتایج

نقشه طراحی	طرح و نقشه موجود	طرح اول (-)	طرح دوم (+)	طرح سوم (-)	طرح چهارم (+)	باتاقان 3.5mm
------------	------------------	-------------	-------------	-------------	---------------	---------------

نتایج حاصل در طرف ستون دسته سمبه

$\frac{daN}{mm^2}$	1.8	1	0.93	1.33	3	2.18	تجاوز	نیروی
گره	20	19	19	21	21	22	$\sigma_t > \sigma_n \times 0.15$	
$\frac{daN}{mm^2}$	-2.79	-2.14	-2.07	-2.51	-4.19	-3.36	$\sigma_t \max$	احتراق
%	-17	-36	-38	-25	+25	0		
$\frac{daN}{mm^2}$	1.68	1.45	1.6	1.68	2.5	1.98	تجاوز	نیروی
گره	34	35	36	35	33	35	$\sigma_t > \sigma_n \times 0.15$	
$\frac{daN}{mm^2}$	1.82	1.67	1.85	1.84	2.64	2.15	$\sigma_t \max$	لختی
%	-15	-22	-14	-14	+23	0		
$\frac{daN}{mm^2}$	4	3.1	3.1	3.7	5.9	4.18	معیار	ویژه
%	-4	-26	-26	-11	+41	0		

نتایج حاصل طرف سمبه

$\frac{daN}{mm^2}$	0.4	0.25	0.33	0.38	0.45	0.48	تجاوز	نیروی
گره	35	31	31	32	38	35	$\sigma_t > \sigma_n \times 0.15$	
$\frac{daN}{mm^2}$	0.55	0.45	0.49	0.58	0.67	0.66	$\sigma_t \max$	احتراق
%	-18	-32	-26	-12	+1.5	0		
$\frac{daN}{mm^2}$	1.25	1.08	1.38	1.3	1.6	1.45	تجاوز	نیروی
گره	24	23	23	24	26	25	$\sigma_t > \sigma_n \times 0.15$	
$\frac{daN}{mm^2}$	-1.53	-1.45	-1.71	-1.63	-1.31	-1.73	$\sigma_t \max$	لختی
%	-11	-18	-1	-6	+10	0		
$\frac{daN}{mm^2}$	2.03	1.8	2.13	2.1	2.5	2.35	معیار	ویژه
%	-14	-23	-10	-10	+6	0		

Optimisation

بهینه سازی

Méthode des éléments finis

روش عناصر محدود

Fretting

سایش پوسته ای

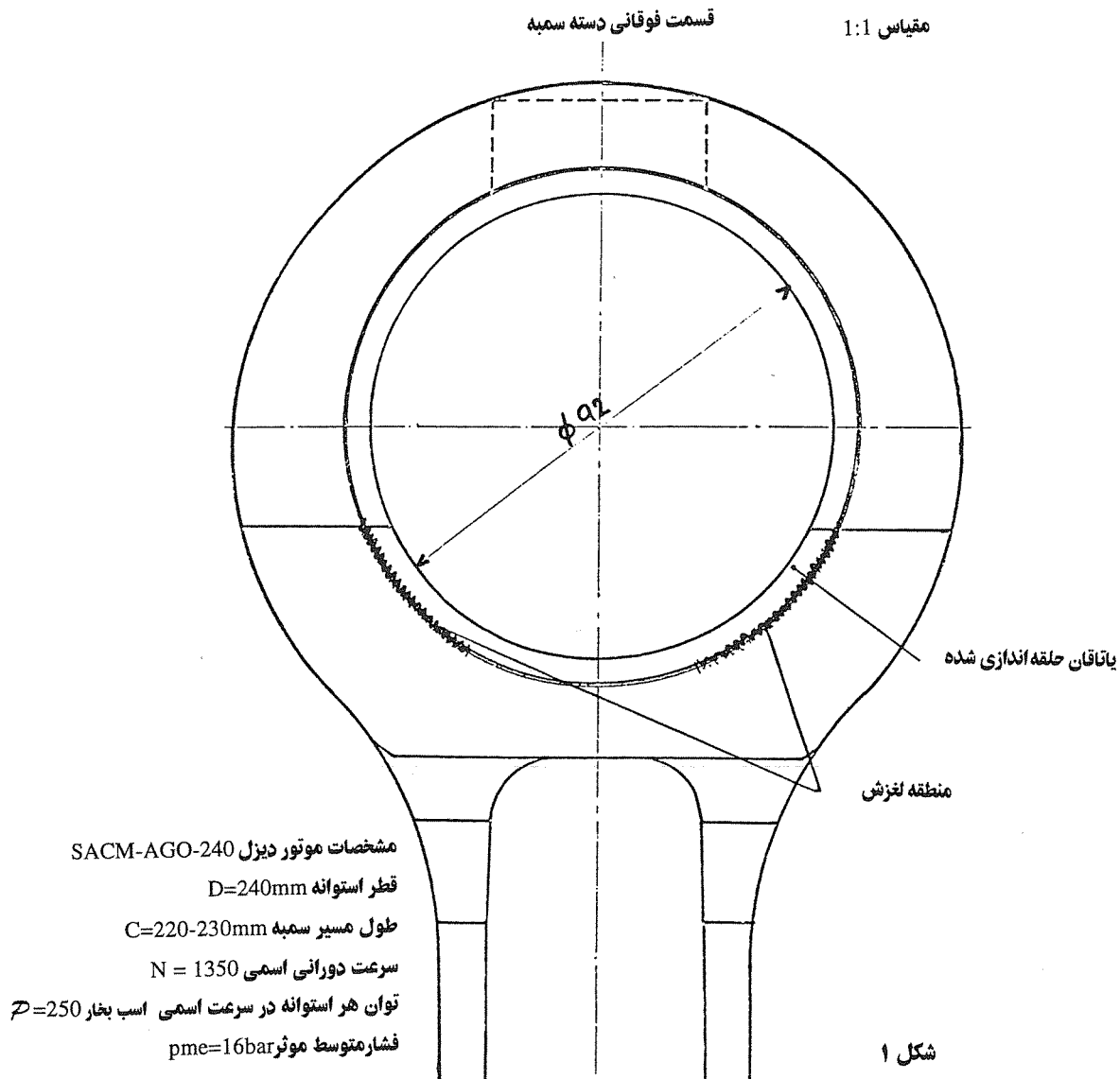
Pitting

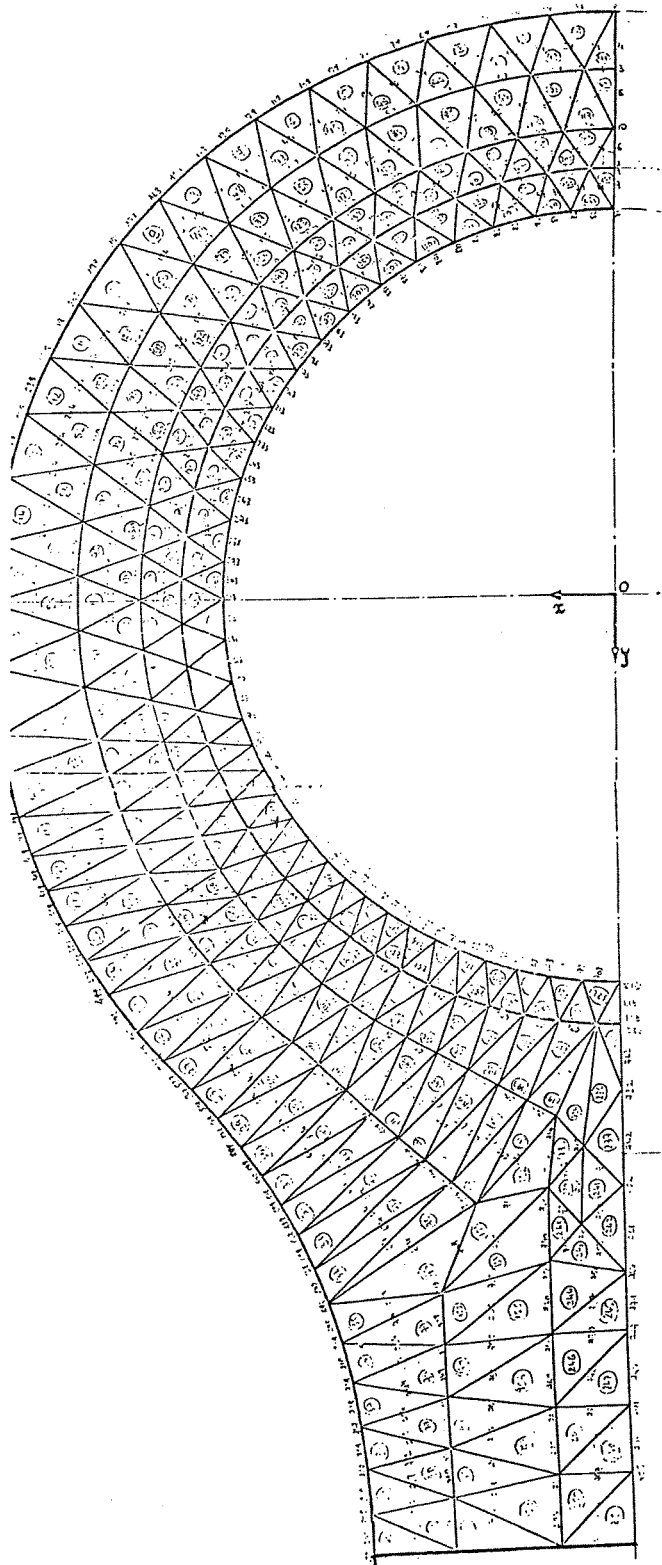
خال خوردگی

منابع:

- 1- Diesel Engine Reference Book Lilly Butter Wör And Co. Publishers Ltd 1984
- 2- L' Attelage Mobile Des Moteurs Rapides L.Buty M.Petricenko Technip 1964
- 3- Theorie et pratique de la Programmation FORTRAN

- J. VIGNES, M. LAPORTE Technip. 1969
- 4- Mecanique des milieux continus P.GERMAIN Masson Et Cie 1973
- 5- La Methode Des Elements Finis Zienkiewicz Ediscience 1973





دسته سمیه

یاقاقان

شبه بندی

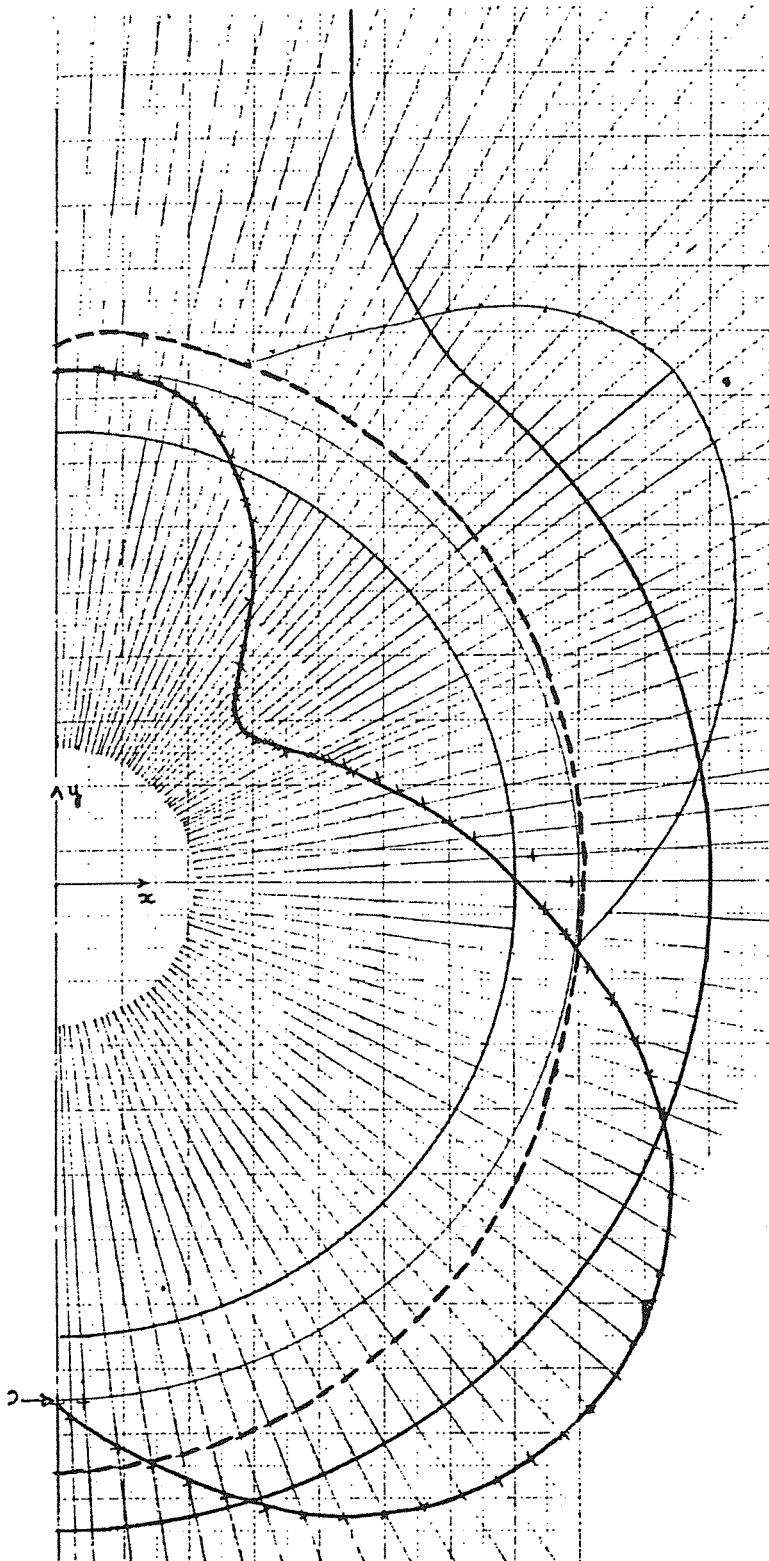
قسمت فوقانی دسته سمیه

تعداد گره ها 808

تعداد عناصر 322

مقیاس 1:2

شکل ۲



شکل ۳

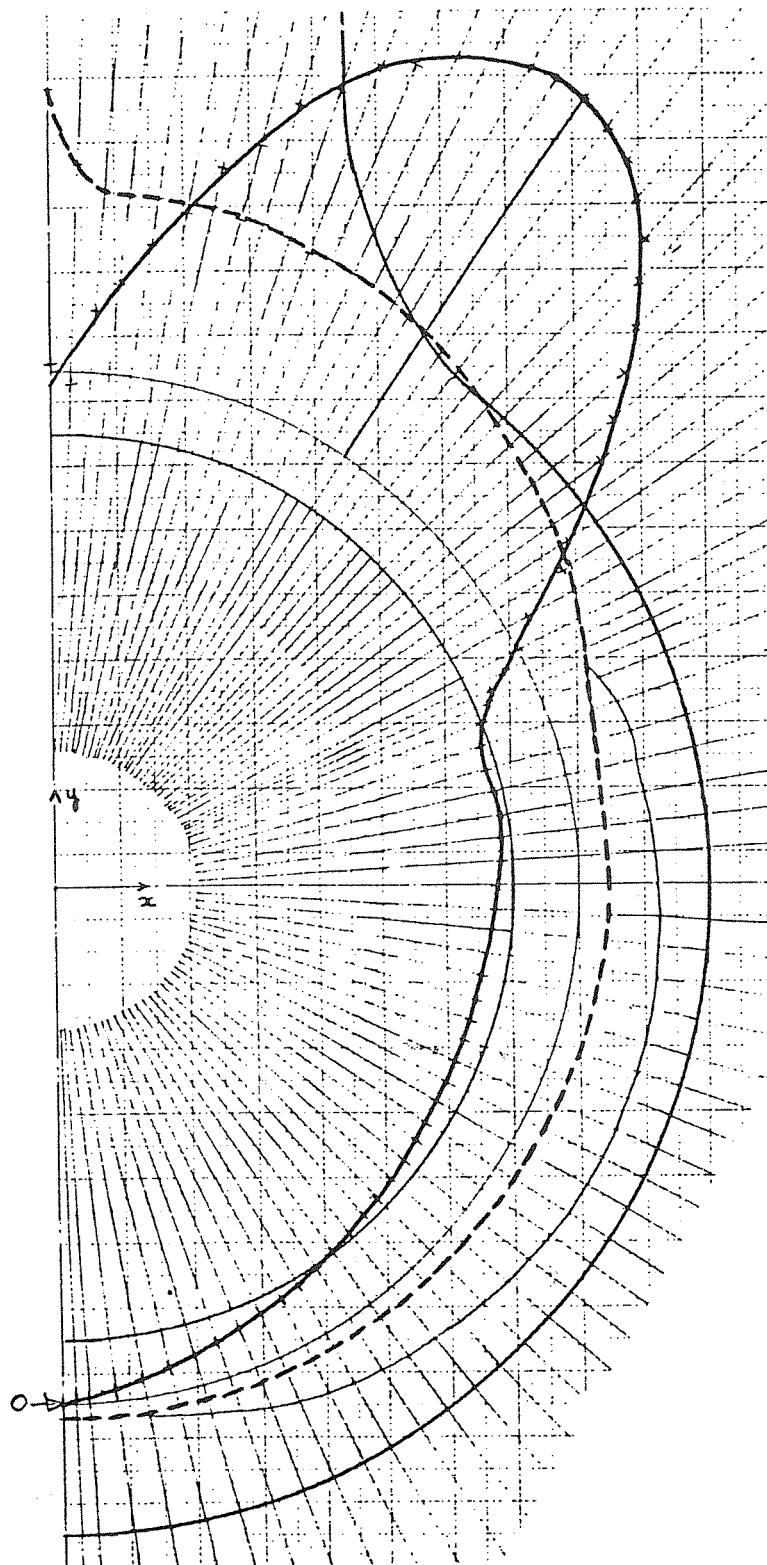
نیروی لختی + نیروی حلقه اندازی

توزیع نیرو SIN 150

تنشهای مماسی

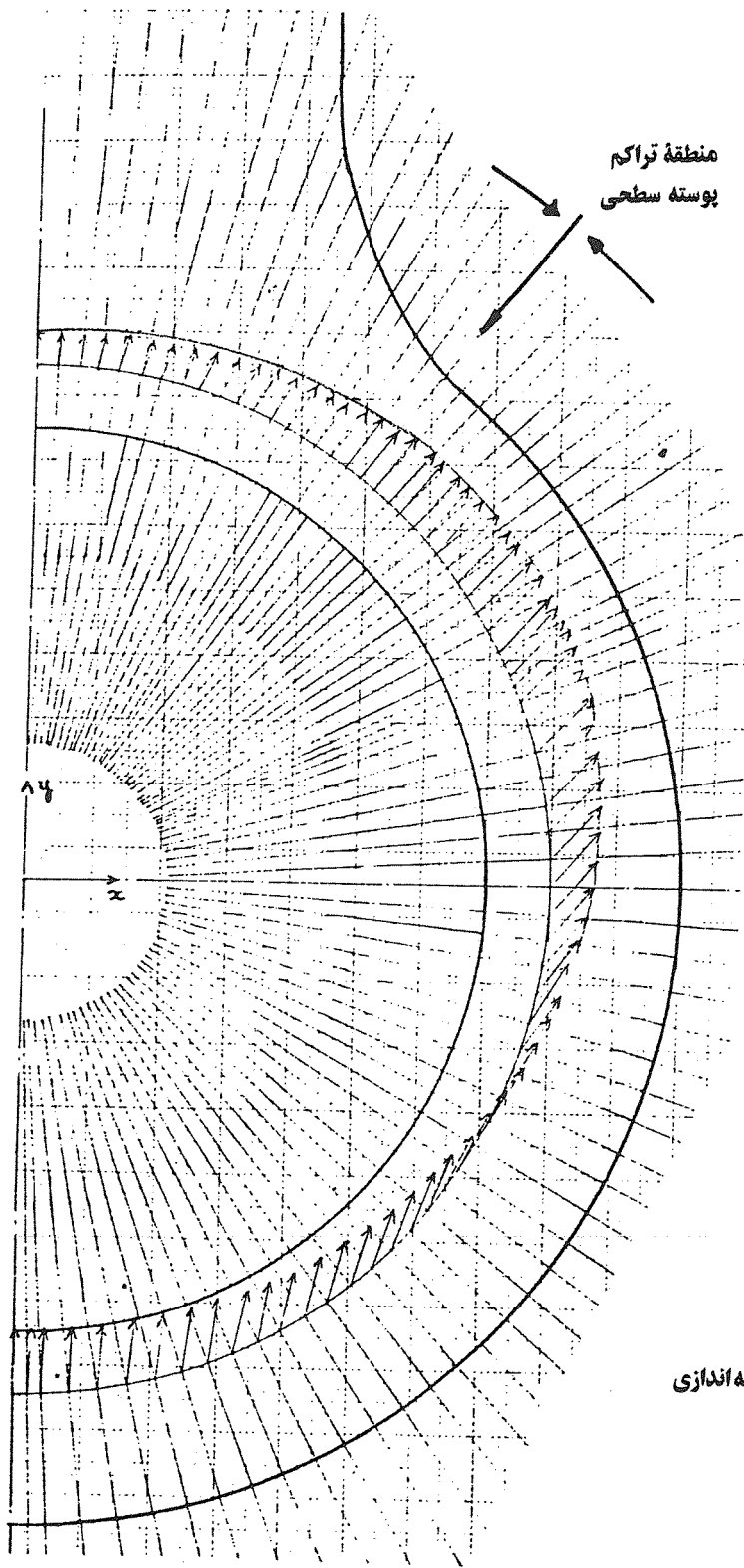
تنشهای عمودی $0.15 \times$

مقیاس تنشها: $1 \text{ N/mm}^2 = 2 \text{ mm}$



شکل ۴

نیروی احتراق + نیروی حلقه اندازی
 توزیع نیرو SIN 150
 — تنشهای مماسی
 - - - - 0.15 x تنشهای عمودی
 مقیاس تنشها: $1 \text{ N/mm}^2 = 2 \text{ mm}$



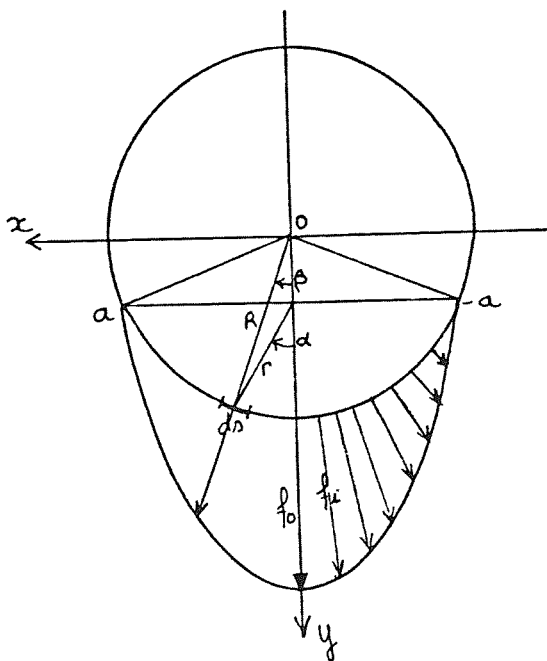
شکل ۵

نیروی احتراق + نیروی حلقه اندازی

توزیع نیرو SIN 150

نمایش جایجایی گره ها

مقیاس: $10\mu = 2\text{mm}$



$$\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

$$\left. \begin{aligned} f_y &= f_0 \cdot \cos \alpha \\ f_x &= f_0 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{aligned} \right\}$$

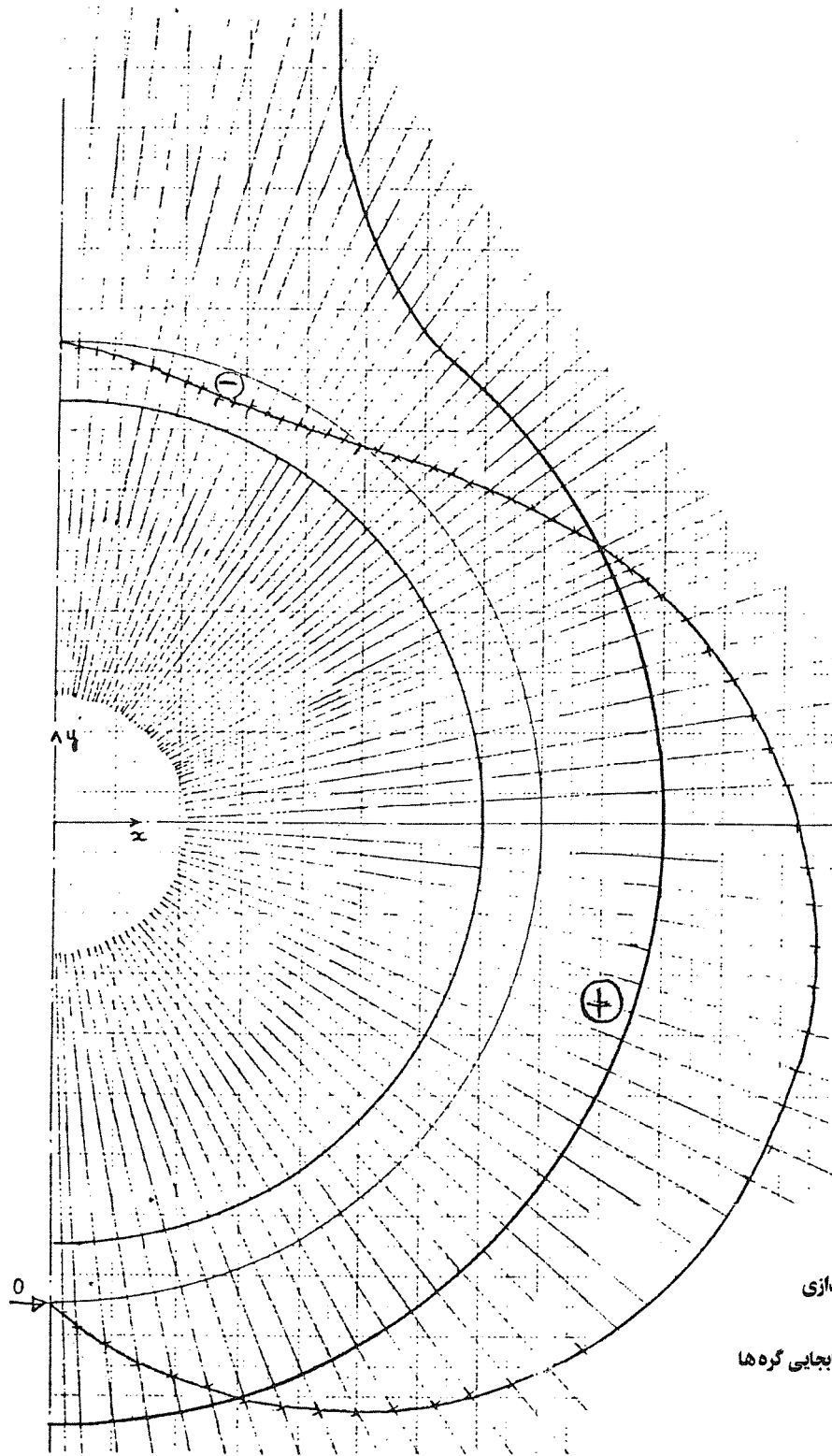
بر واحد سطح

شکل ۶ توزیع سینوسی نیروی \vec{F}

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \int \vec{f} \cdot ds \\ \vec{F} &= \int (f_y \cdot \vec{y} + f_x \cdot \vec{x}) ds \\ F &= \int_{-a}^a f_y \cdot ds \quad \text{avec } R d\beta = ds \\ F &= 2 \int_0^a f_0 \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot ds = 2 \int_0^a f_0 \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot R \cdot d\beta \\ r \sin \alpha &= R \sin \beta \\ r \cos \alpha \cdot d\alpha + \sin \alpha dr &= R \cos \beta \cdot d\beta \\ F &= 2 \int_0^a f_0 \cos \alpha [r \cos \alpha \cdot d\alpha + \sin \alpha dr] \quad \text{تابع } \alpha \text{ و } r \end{aligned}$$

اگر به يك متغير مثلاً β تبدیل کنیم بدین صورت در می آید:

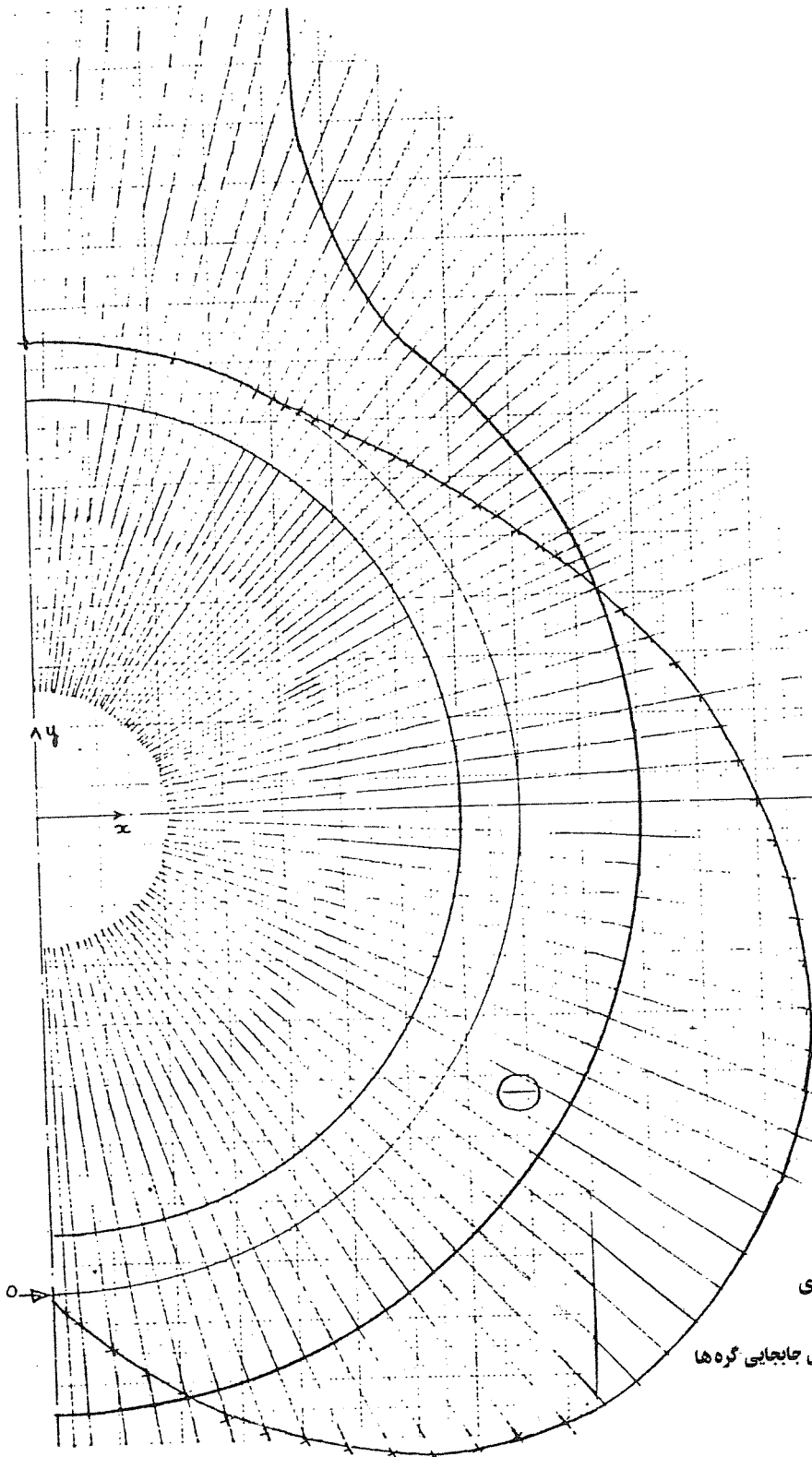
$$F = 2 f_0 R \int_0^{\beta_m} \frac{R \cos^2 \beta - a \cos \beta}{\sqrt{a^2 + R^2 - 2 a R \cos \beta}} d\beta$$



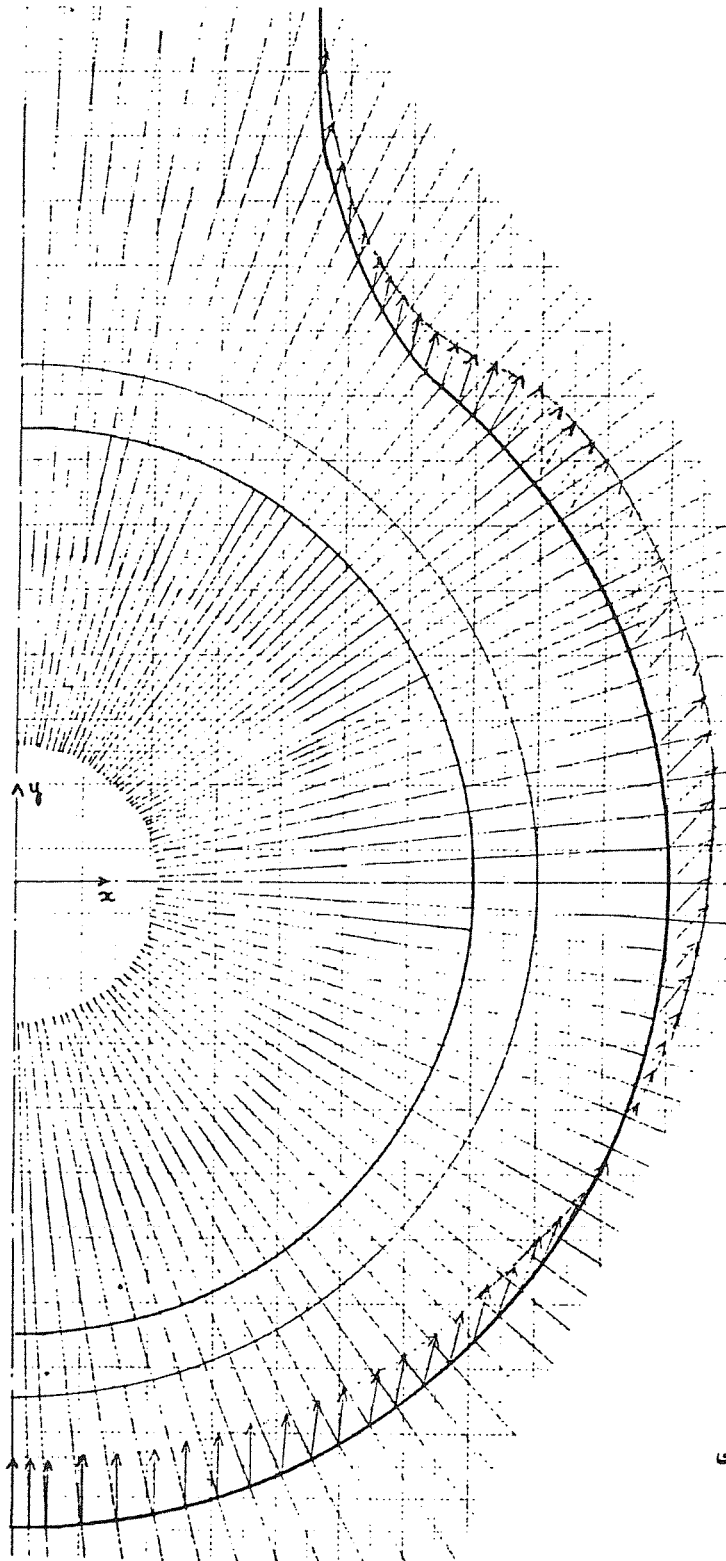
شکل ۷

نیروی احتراق + حلقه اندازی
 توزیع نیرو SIN 150
 نمایش مؤلفه مماسی جایجایی گره ها
 مقیاس $1\mu = 1\text{mm}$

شکل ۸



نیروی لختی + حلقه اندازی
توزیع SIN 150
نمایش مولفه های مماسی جایجایی گره ها
مقیاس: $1\mu=10\text{mm}$



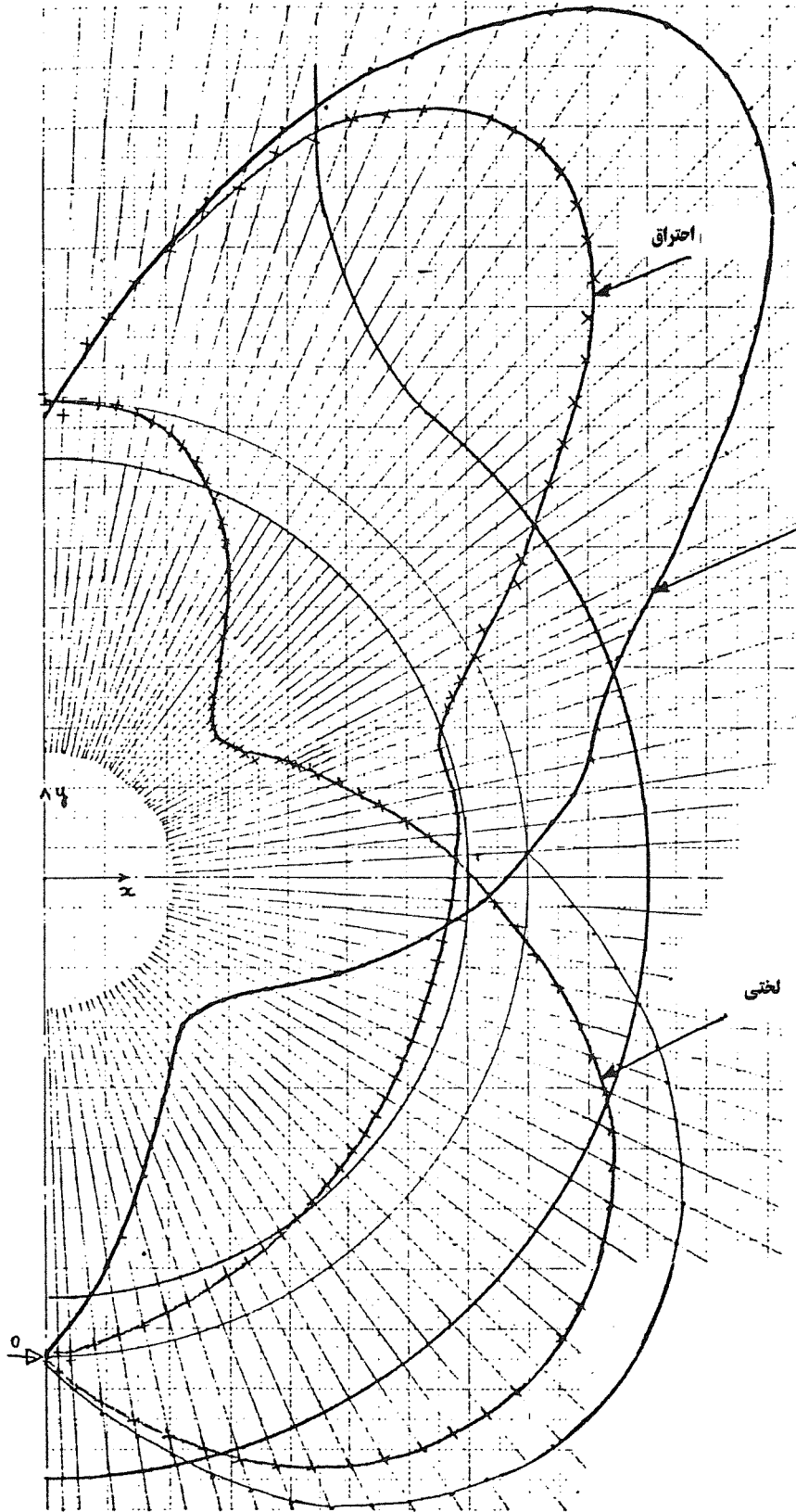
شکل ۹

نیروی احتراق + حلقه اندازی

توزیع SIN 150

نمایش تغییر شکل مقطع پیرامونی

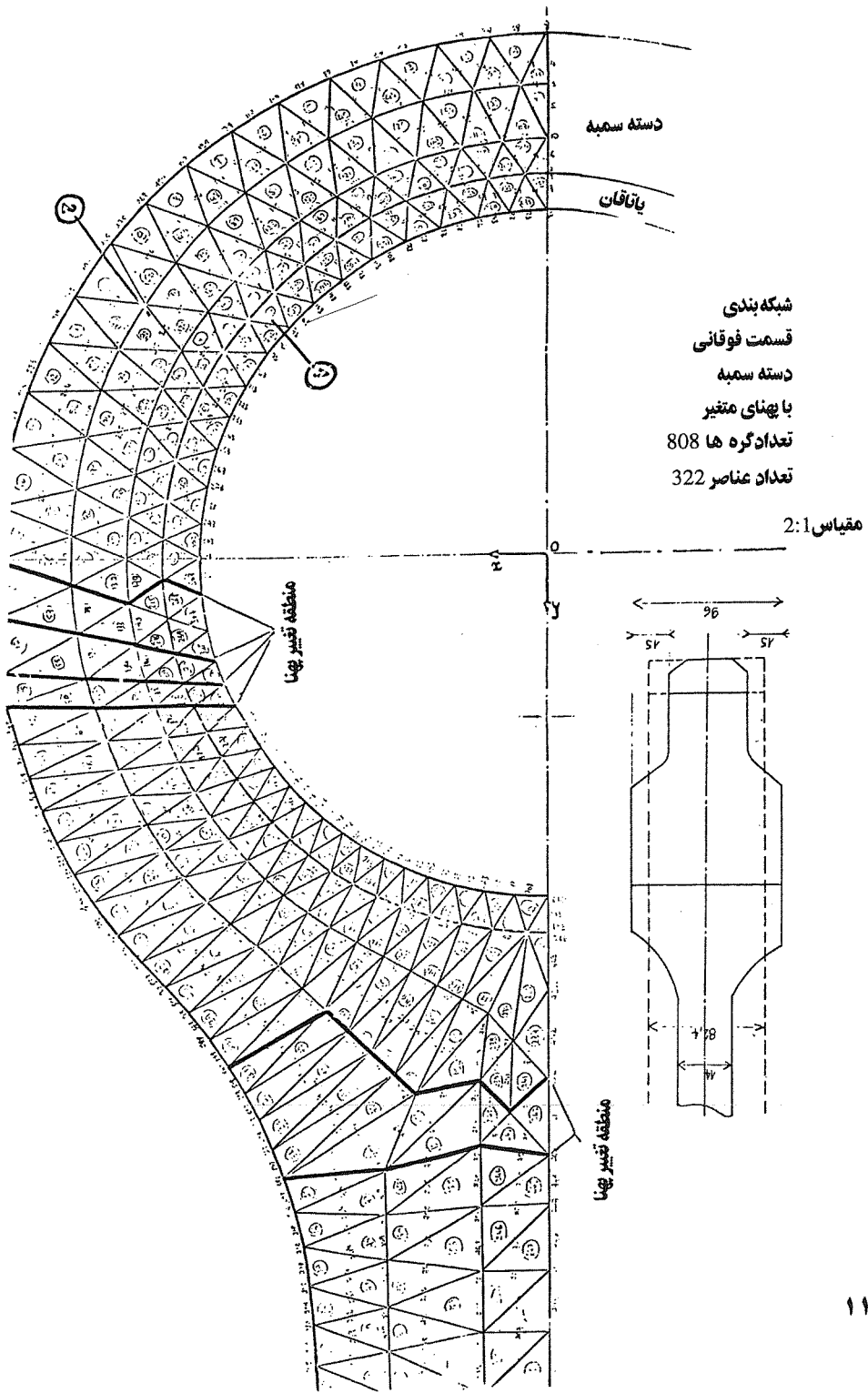
مقیاس: $10\mu = 2mm$



شکل ۱۰

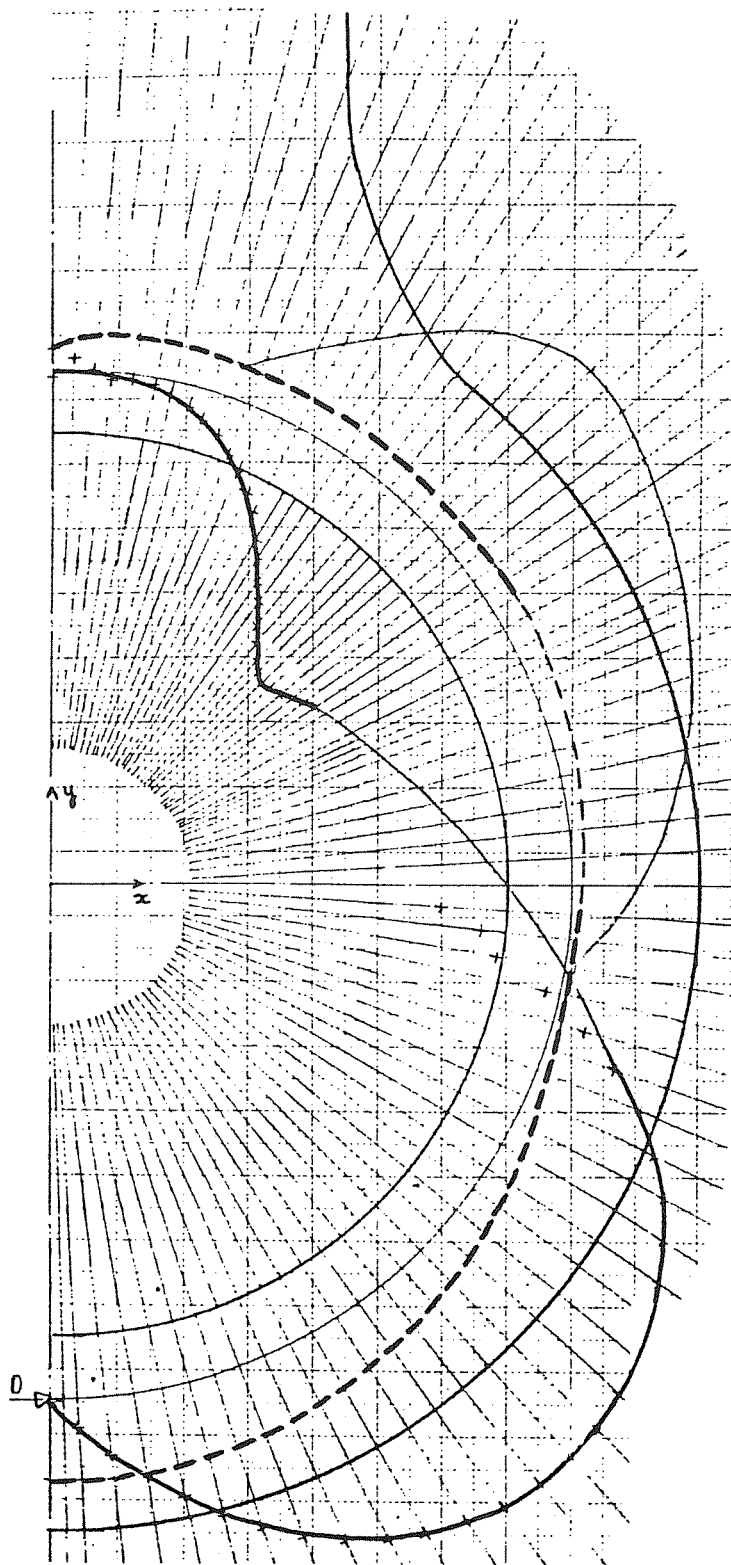
معیار
ویژه

معیار ویژه
تغییرات تنشهای مماسی
بین نیروهای
احتراق و لختی با توزیع SIN 150
مقیاس: $1 \text{ N/mm}^2 = 2 \text{ mm}$



شکل ۱۱

شکل ۱۲



نیروی لختی + حلقه اندازی

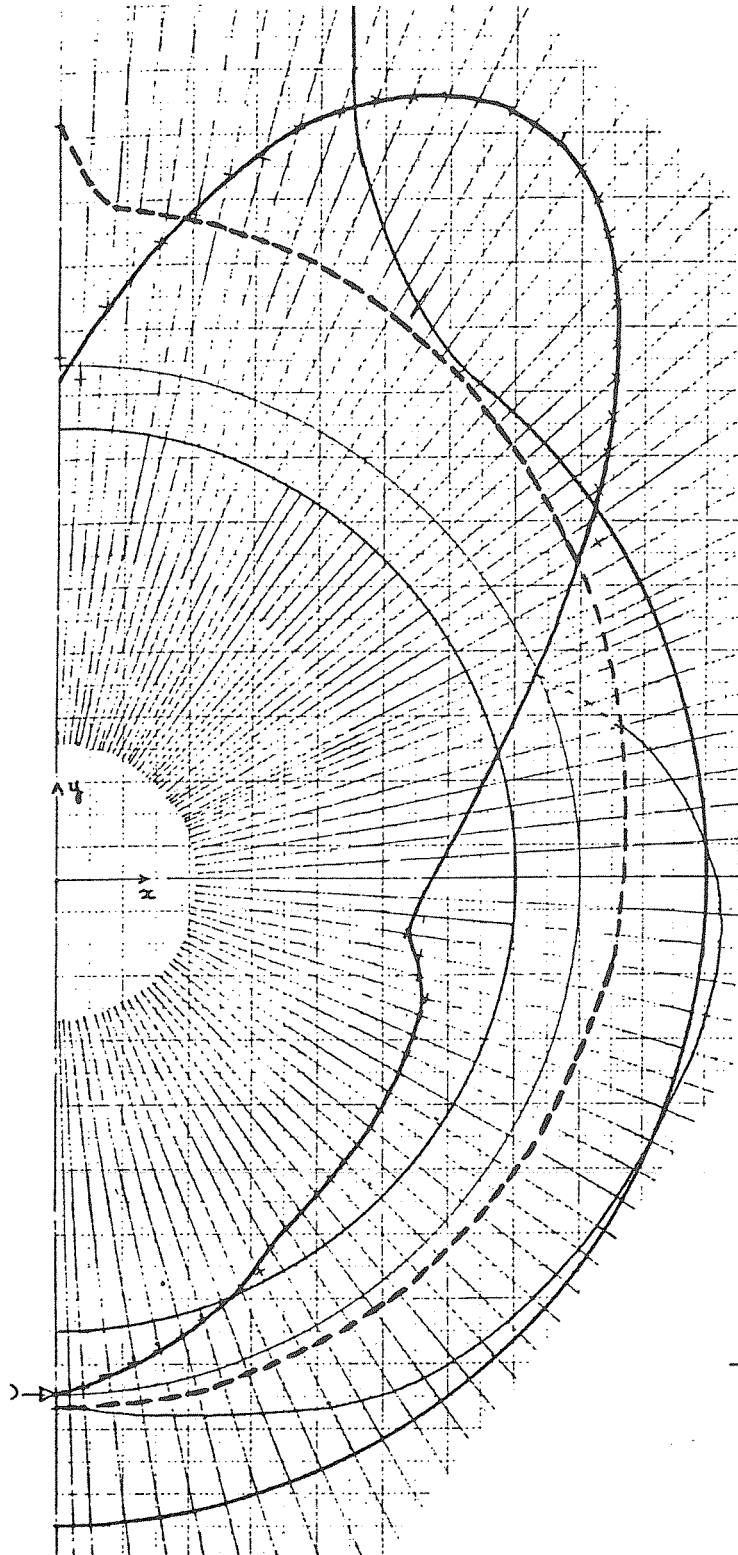
توزیع نیرو SIN 150

تنشهای مماسی

تنشهای عمودی $\times 0.15$

پهنای متغیر

مقیاس $1\text{N/mm}^2 = 2\text{mm}$



شکل ۱۳

نیروی احتراق + حلقه اندازی

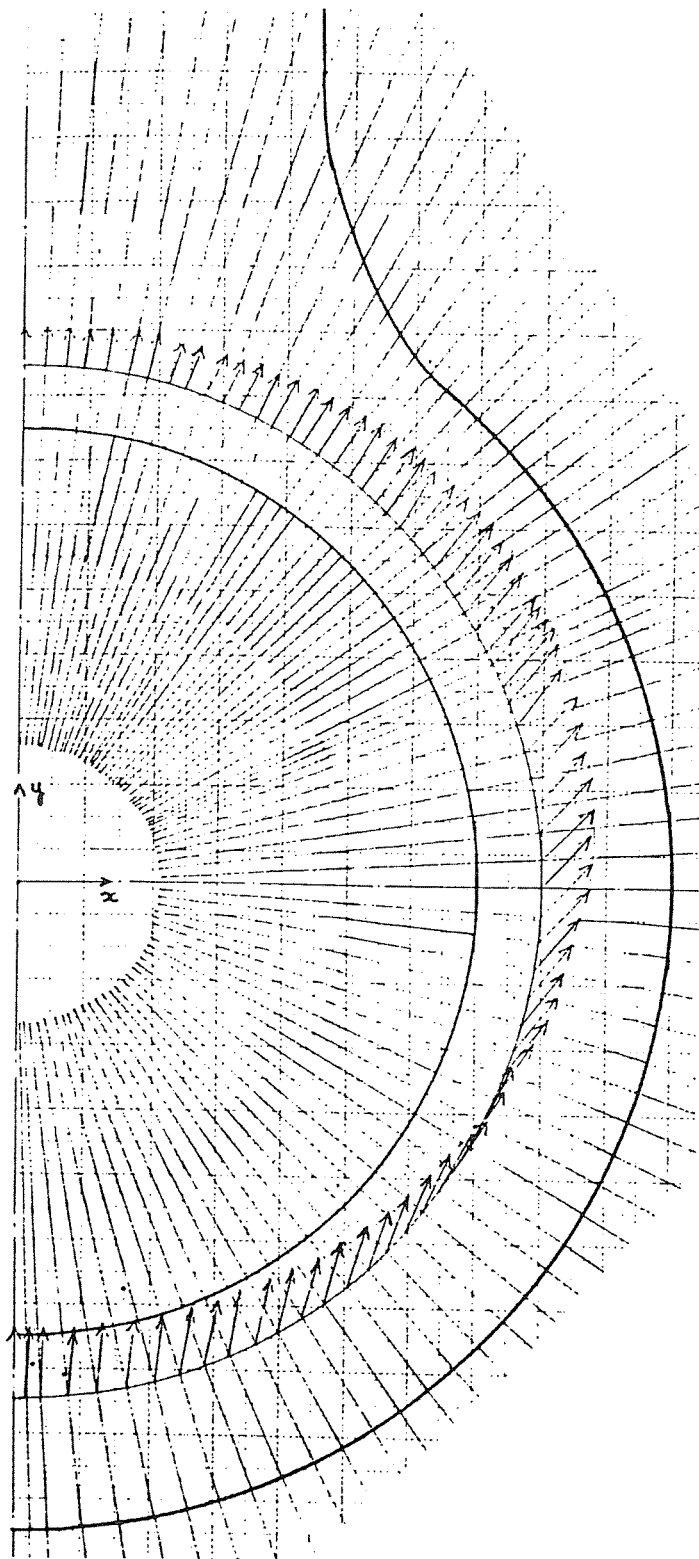
توزیع نیرو SIN 150

تشیهای مماسی

تشیهای عمودی ۰٫۱۵ x

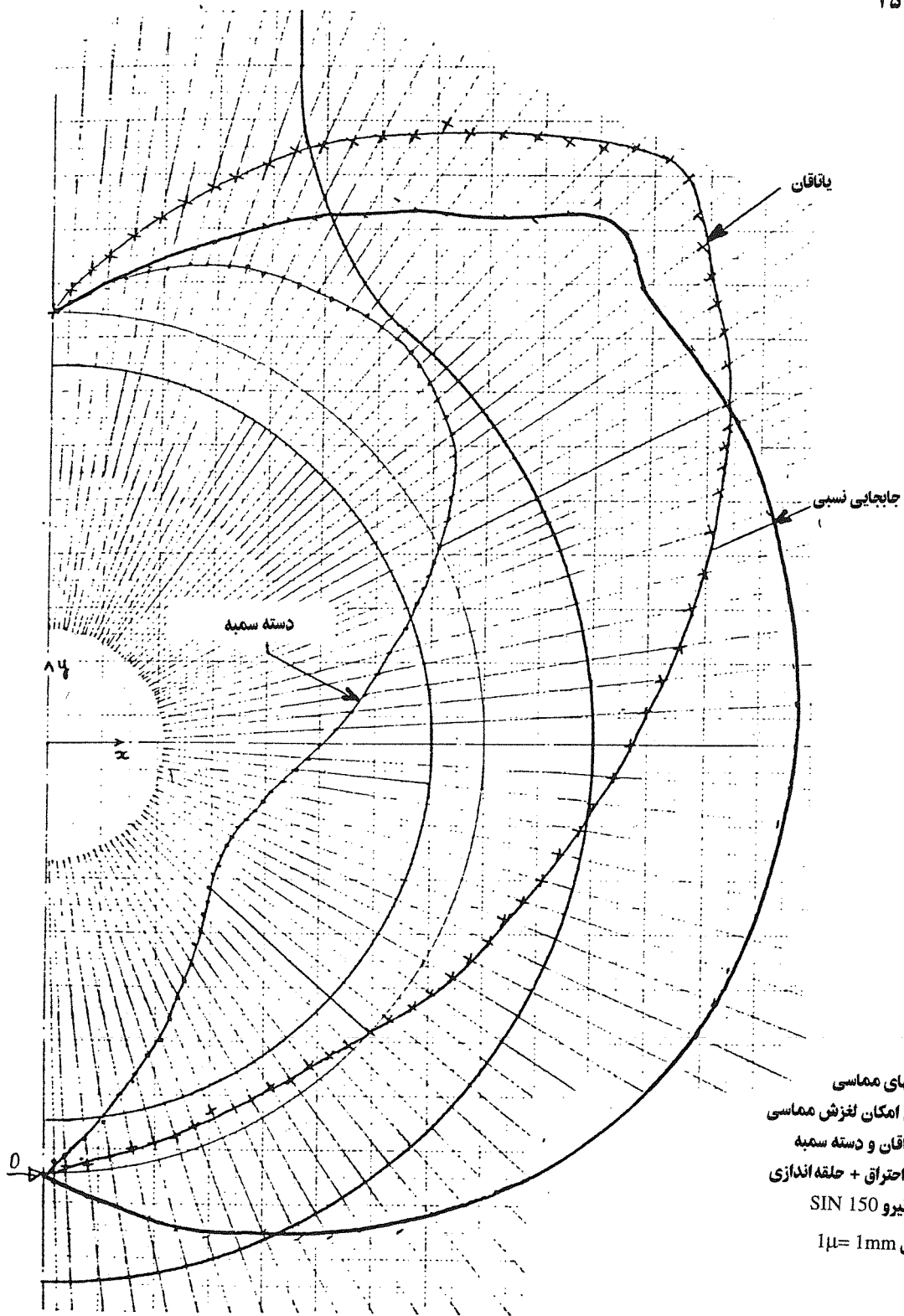
پهنای متغیر

مقیاس $1N/mm^2 = 2mm$

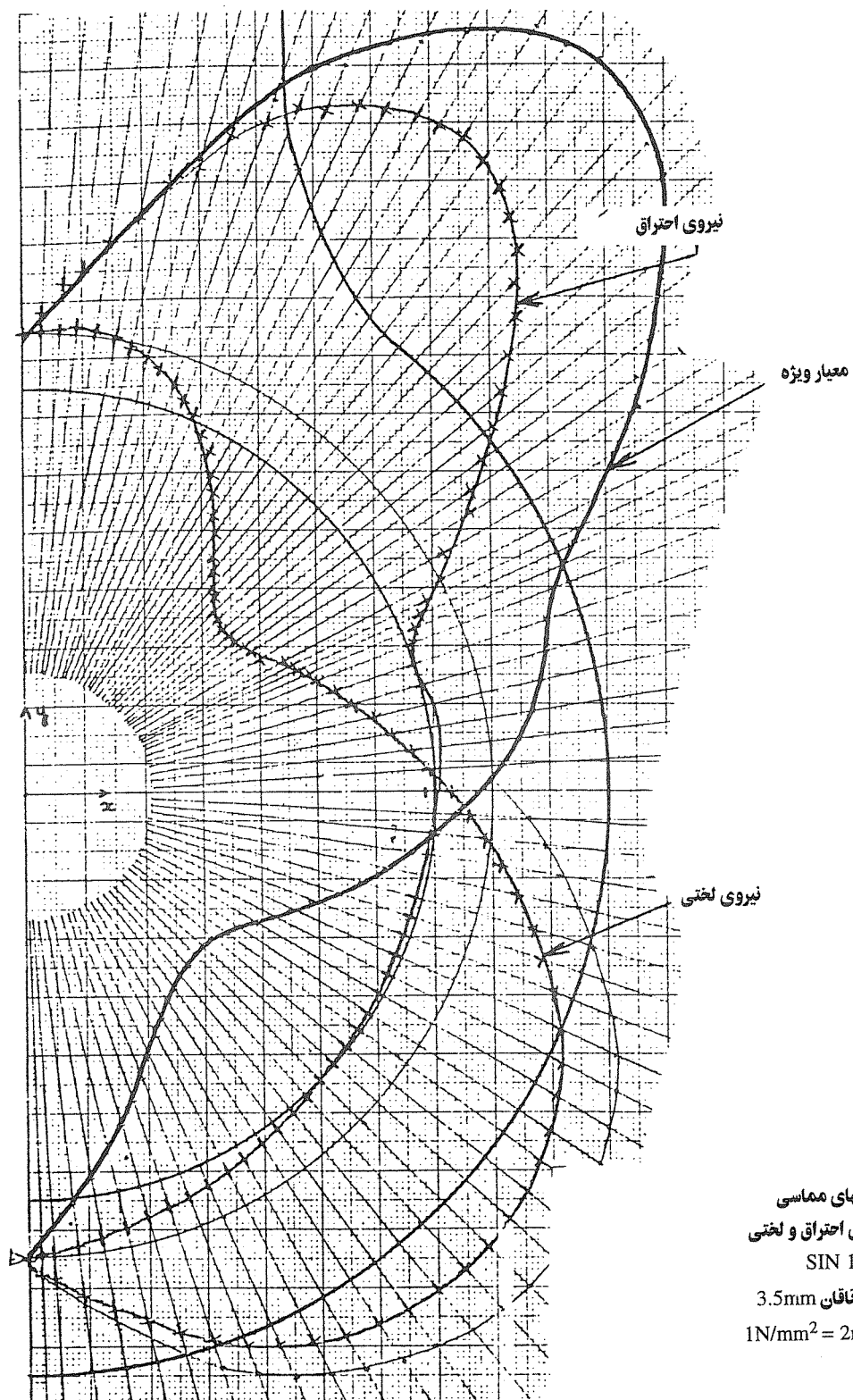


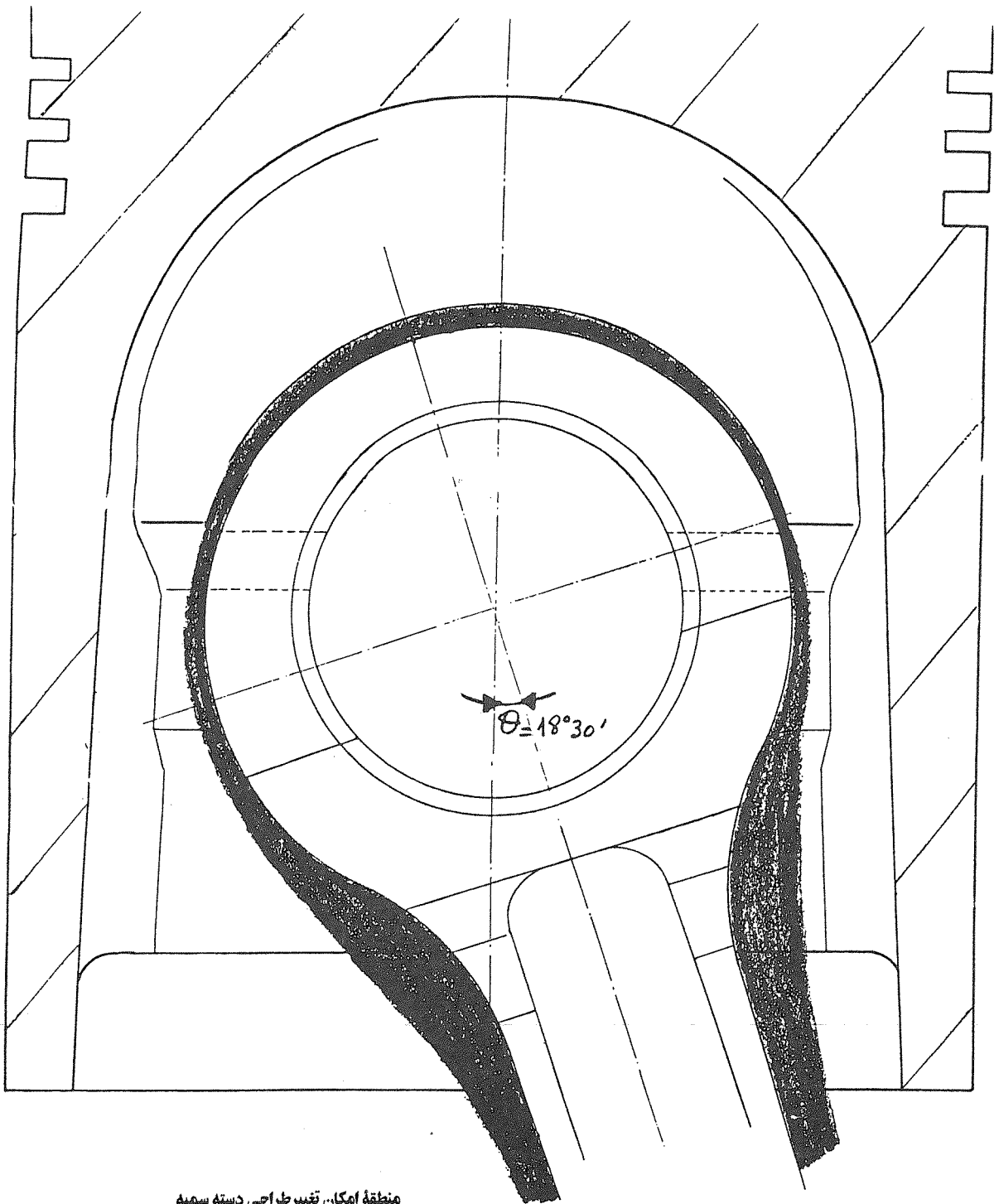
شکل ۱۴

نیروی احتراق + حلقه اندازی
 توزیع نیرو SIN 150
 نمایش جایجایی گره‌ها
 پهنای متغیر
 مقیاس: $10\mu = 2\text{mm}$



جابجاییهای مماسی
 با فرض امکان لغزش مماسی
 بین یاقاقان و دسته سمبده
 نیروی احتراق + حلقه اندازی
 توزیع نیرو SIN 150
 مقیاس $1\mu = 1\text{mm}$

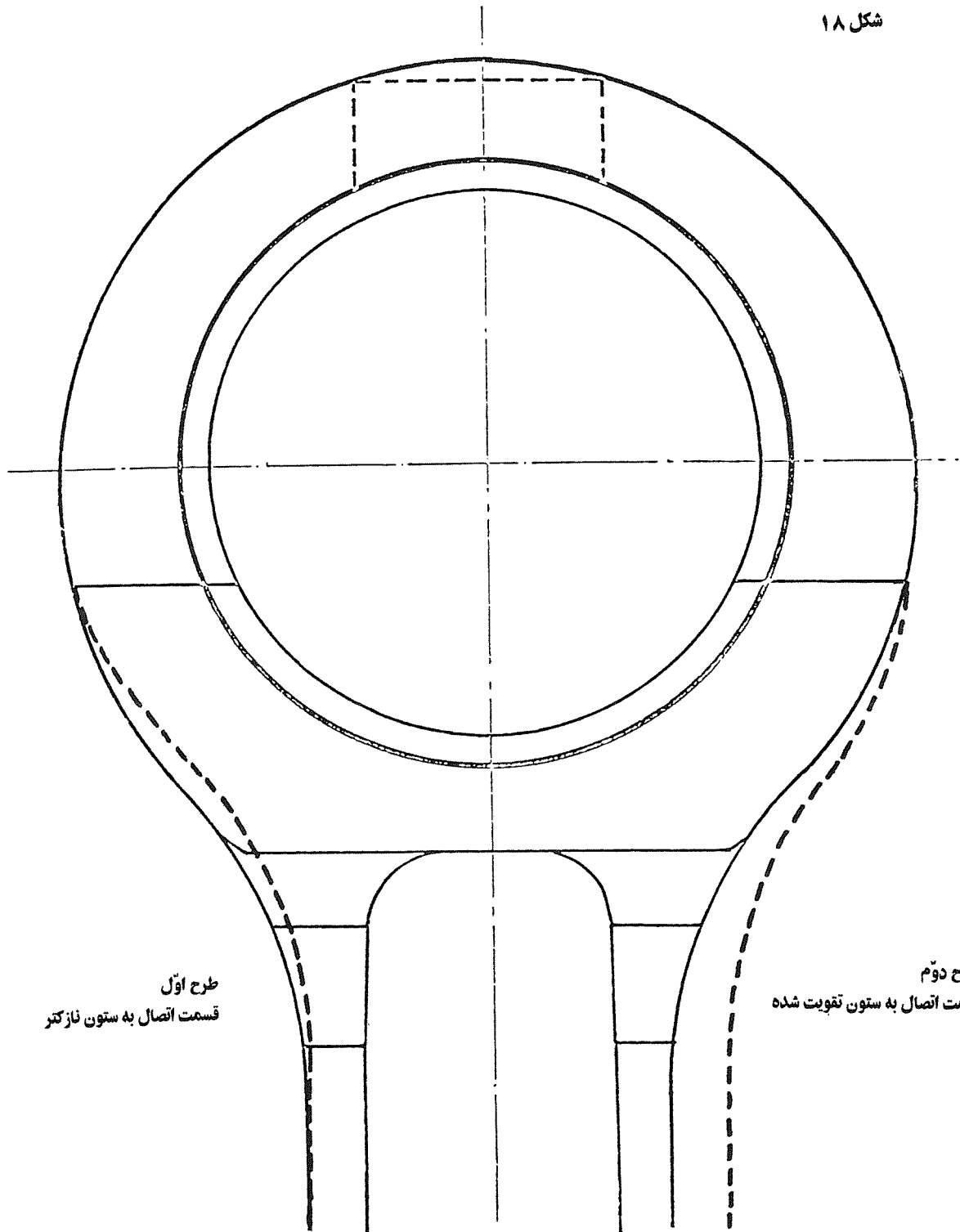




منطقه امکان تغییر طراحی دسته سمیه

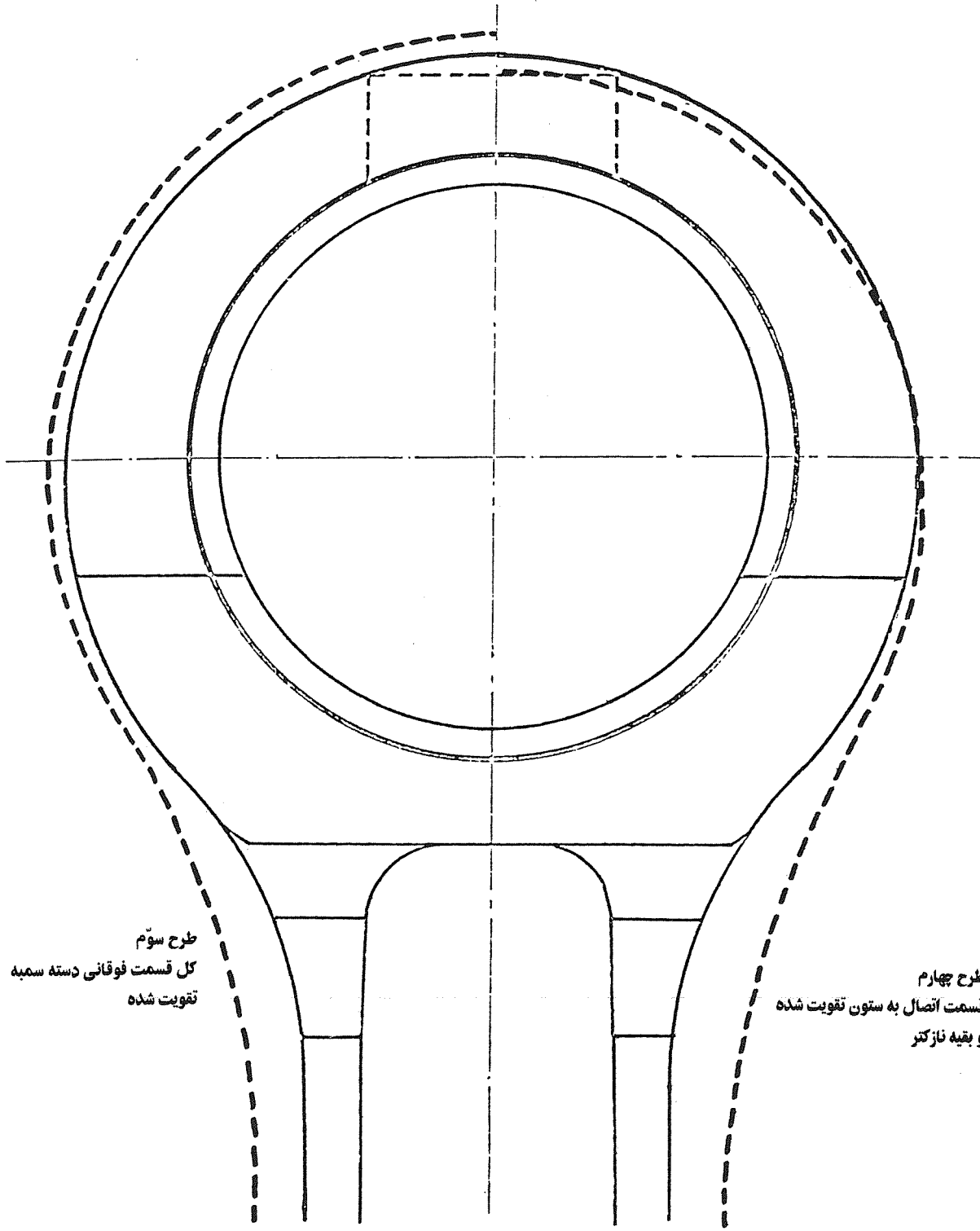
شکل ۱۷

شکل ۱۸



طرح اول
قسمت اتصال به ستون نازکتر

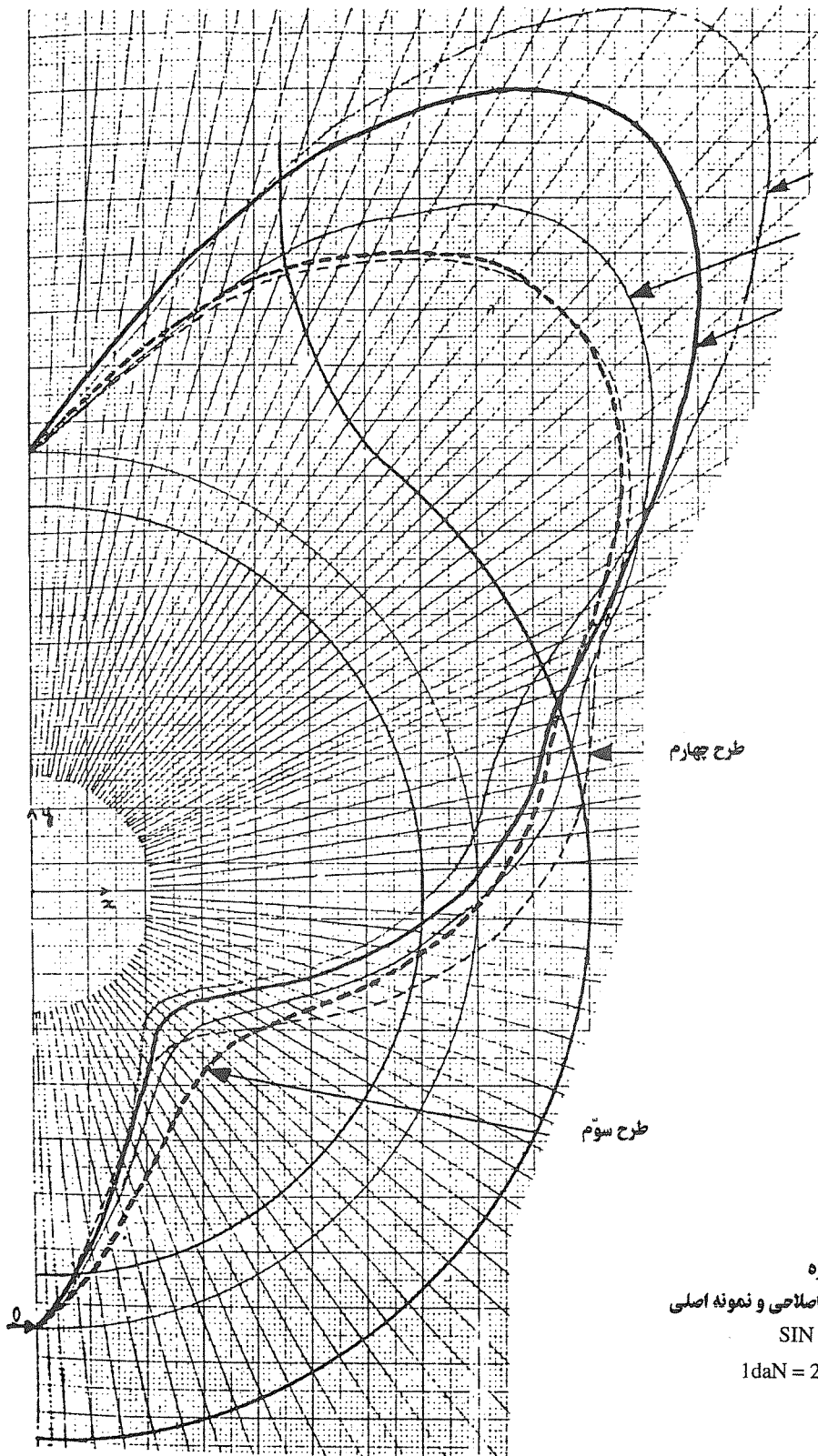
طرح دوم
قسمت اتصال به ستون تقویت شده



طرح سوم
کل قسمت فوقانی دسته سمبه
تقویت شده

طرح چهارم
قسمت اتصال به ستون تقویت شده
و بقیه نازکتر

شکل ۱۹



طرح اول
 طرح دوم
 بدون تغییر

طرح چهارم

طرح سوم

شکل ۲۰

مقایسه معیار ویژه
 برای چهار طرح اصلاحی و نمونه اصلی
 توزیع نیرو SIN 150
 مقیاس: 1 daN = 20 mm