JMRA

مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک،
سال اول، شماره اول، بهار ۸۸، ۳۸_۳۱

بررسی پارامترهای موثر بر تنش و جابجایی در ورقهای موجدار متقارن محوری

رضا سلامی ناصریان[۱]، وحید کدخدائی[۲]

(تاریخ دریافت: ۸۷/۳/۱- تاریخ پذیرش: ۸۷/۹/۲)

چکیده: در این مقاله ورقهای موجدار متقارن محوری تحت فشار، با روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به این صورت که نصف سطح مقطع این ورقها در نظر گرفته شده، سپس بصورت مثلثی المان بندی و روی آن فشار در نظر گرفته شده است. در ادامه با استفاده از معادلات حاصل و نرم افزار ویژوال بیسیک یک برنامه رایانه‌ای تهیه شده است که مشخصات ورق مورد نظر مانند قطر، ضخامت، جنس، فشار و شکل سطح مقطع جسم به صورت فایل اتوکد را به عنوان ورودی دریافت کرده و مقادیر تنش و جابجایی حداکثر را محاسبه می نماید. در نهایت مقادیر محاسبه شده توسط برنامه فوق با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه و مشخص می‌شود که نتایج این تحقیق از دقت قابل قبولی برخوردار است. سپس پارامترهای مختلفی که بر مقدار تنش و جابجایی تاثیر دارند، تغییر داده شده اند و نتایج این تغییرات بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: روش المان محدود، متقارن محوری، ورق موجدار

Study of Effective Parameters on Stress and Displacement of Axisymmetric Corrugated Diaphragms

Reza Salami Naserian, Vahid Kadkhodaei

Abstract: In this paper, the axisymmetric corrugated diaphragm using finite element method will be discussed, so that half of these diaphragms' cross sections and later the applied pressure will be considered. Following this, using the consequent equations and visual basic software, a computer program will be provided which receives the diaphragms' particulars such as diameter, thickness, pressure and the form of object's cross section as AutoCAD file and then it measures the maximal stress and displacement. Finally, the calculated values will be compared with the experimental values and Theoretical results using the above program and then it will become clear that the results of this research enjoy the acceptable precision. Then, the various parameters which have an influence on the displacement and stress are changed and the results of these changes will be investigated.

Keywords: Finite Element Method, Axisymmetric, Corrugated Diaphragm

---

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان (rezasalamin@gmail.com)
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان (vk_sama@yahoo.com)

۱. مقدمه

ورقهای موجدار متقارن محوری امروزه در صنعت کاربرد فراوانی دارند. دیافراگمها که خود نوعی از این ورقها می‌باشند [۱]، در میکروماشینها [۲]، میکروپمپها [۴ و ۳] و بخصوص در میکروفونها [۷ـ۵] بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی این گونه ورقها بخاطر شکل فیزیکی خود قابلیت تغییر شکل و جابجایی مورد نظر را برای استفاده در حسگرها دارند. به همین دلیل این قطعات موارد استفاده زیادی در انواع حسگرها از قبیل فشارسنجها [۸] و حسگرهای صوتی [۹] دارند. برای تحلیل این قطعات، روشهای مختلفی تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰] که روش المان محدود [۷ و ۶ و ۲] نیز یکی از این روشها است که به دلیل دقت بالا می تواند انتخاب خوبی برای تحلیل ورقهای موجدار متقارن محوری باشد.

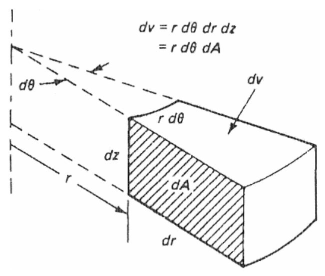
در برخی مقالات بدلیل بررسی چندین شکل و جنس، لازم است با توجه به روش مورد استفاده، برنامه‌ای رایانه‌ای تهیه و استفاده شود [۱۰]. در اینجا نیز نهایتاً توسط روش المان محدود و نرم افزار ویژوال بیسیک، برنامه‌ای نوشته می‌شود که تنش و جابجایی حداکثر را برحسب فشار وارد بر ورق مشخص می کند که می توان با استفاده از نتایج این مقاله، این گونه قطعات را بررسی و طراحی کرد.

۲. تئوری

با توجه به تقارن این گونه اجسام حول یک محور، تنشها و کرنشها به دوران θ بستگی نخواهند داشت، بنابراین می توان این گونه مسائل را مسائلی دو بعدی در صفحه r-z در نظر گرفت.

اگر یک جزء کوچک در نظر گرفته شود (شکل۱) ، انرژی پتانسیل را می توان بصورت رابطهٔ (۱) در نظر گرفت [۱۱]:

$$\Pi = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\int_A \varepsilon^T D r dA d\theta - \int_0^{2\pi}\int_A \delta^T f_b r dA d\theta - \int_0^{2\pi}\int_L \varepsilon^T f_b r dA d\theta - \sum \delta_i^T P_i \qquad (۱)$$



شکل ۱. یک جزء کوچک از ورق موجدار متقارن محوری

در صورتی که $drdz$ برابر سطح جزء بوده و p یک نیروی گسترده بر روی محیط یک دایره روی سطح جانبی جسم است. لازم به توضیح است که در این حالت کلیه متغیرها مستقل از θ می‌باشند. بنابراین رابطه (۱)، به شکل زیر نوشته می شود.

$$\Pi = 2\pi \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\int_A \varepsilon^T D r dA - \\ \int_A \delta^T f_b r dA - \\ \int_A \delta^T f_b r dL \end{pmatrix} \sum \delta_i^T P_i \qquad (۲)$$

که متغیرها بصورت زیر می‌باشند:

$$\delta = \{ u , w \}^T , \qquad f_b = \{ f_{br} , f_{bz} \}^T ,$$
$$f_s = \{ f_{sr} , f_{sz} \}^T , \ P_i = \{ P_{ir} , P_{iz} \}^T \qquad (۳)$$

در این حالت رابطهٔ تغییر شکل نسبی و تغییر مکان به‌شکل زیر می‌باشد [۱۱]:

$$\varepsilon = \{ \varepsilon_r , \varepsilon_z , \gamma_{rz} , \varepsilon_\theta \}^T = \left\{ \frac{\partial u}{\partial r} , \frac{\partial w}{\partial z} , \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} , \frac{u}{r} \right\}^T \qquad (۴)$$

سه مؤلفه اول تانسور کرنش مطابق تعریف‌های معمول است. تنها مؤلفه چهارم دارای قالبی دیگر است. این مؤلفه مطابق رابطه زیر قابل استخراج می باشد:

$$\varepsilon = \frac{\Delta(rd\theta)}{rd\theta} = \frac{(r+u)\ d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{ud\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r} \qquad (۵)$$

تانسور تنش و روابط تنش - تغییر شکل نسبی به شکل زیر است :

$$\sigma = \{ \sigma_r , \sigma_z , \sigma_{rz} , \sigma_\theta \}^T \qquad (۶)$$

$$\sigma = D\varepsilon \qquad (۷)$$

در این حالت D یک ماتریس (۴ × ۴) است که به فرم زیر نوشته می‌شود [۱۱]:

$$D = \frac{E(1-v)}{(1+v)\ (1-2v)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{v}{1-v} & 0 & \frac{v}{1-v} \\ \frac{v}{1-v} & 1 & 0 & \frac{v}{1-v} \\ 0 & 0 & \frac{1-2v}{2(1-v)} & 0 \\ \frac{v}{1-v} & \frac{v}{1-v} & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

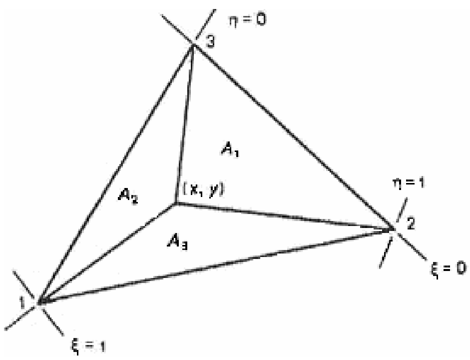
E و v در رابطه فوق به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشند.

در این قسمت سطح مقطع جسم به المانهای مثلثی شکل تقسیم می‌شود. سطح تقسیم شده، سطحی است که از دوران آن حول محور z، جسم حاصل می گردد. اگر یک المان مثلثی مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شود، آنگاه «توابع شکل»[۱] بصورت زیر تعریف می شوند [۱۲]:

$$N_1 = \xi = \frac{A_1}{A}, \quad N_2 = \eta = \frac{A_2}{A}$$
$$N_3 = 1 - \xi - \eta = \frac{A_3}{A} \qquad (۹)$$

ξ و η در رابطه فوق مختصات محلی می‌باشند که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

1. Shape functions



شکل ۲. نمونه ای از یک المان مثلثی

در صورتی که سه تابع شکل مربوط به سه گره مثلث با N_1، N_2 و N_3 بیان شوند، می‌توان نوشت:

$$\delta^e = N\hat{\delta}^e \tag{۱۰}$$

N و $\hat{\delta}^e$ دو ماتریس هستند که به صورت زیر تعریف می شوند:

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \tag{۱۱}$$

$$\hat{\delta}^e = \left\{ \hat{\delta}_1^e, \hat{\delta}_2^e, \hat{\delta}_3^e, \hat{\delta}_4^e, \hat{\delta}_5^e, \hat{\delta}_6^e \right\} \tag{۱۲}$$

حال اگر از المان مثلثی با تغییر شکل نسبی ثابت استفاده شود، همانند المان مثلثی در حالت دو بعدی توابع شکل از درجه یک خواهند بود و مؤلفه‌های تغییر شکل بصورت زیر می باشند:

$$u = \xi\hat{\delta}_1^e + \eta\hat{\delta}_3^e + (1-\xi-\eta)\hat{\delta}_5^e \tag{۱۳}$$

$$w = \xi\hat{\delta}_2^e + \eta\hat{\delta}_4^e + (1-\xi-\eta)\hat{\delta}_6^e \tag{۱۴}$$

المانها ایزو پارامتریک (همگام) هستند، پس می توان نوشت:

$$r = \xi r_1 + \eta r_2 + (1-\xi-\eta) r_3 \tag{۱۵}$$

$$r = \xi z_1 + \eta z_2 + (1-\xi-\eta) r_3 \tag{۱۶}$$

جهت بدست آوردن مشتقات پاره‌ای مؤلفه‌های تغییر مکان می‌توان از قاعدهٔ مشتقات زنجیره‌ای استفاده نمود. در این صورت:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial r}{\partial \eta} \end{bmatrix} \tag{۱۷}$$

J ماتریس ژاکوپین بوده و رابطه آن بصورت زیر است:

$$J = \begin{bmatrix} r_{13} & z_{13} \\ r_{23} & z_{23} \end{bmatrix} \tag{۱۸}$$

پس دترمینان این ماتریس به این صورت است: $z_{ij} = z_i - z_j$ و $r_{ij} = r_i - r_j$ که در ماتریس فوق:

$$\det J = r_{13}\, z_{23} - r_{23}\, z_{23} \tag{۱۹}$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial r} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \end{Bmatrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial \xi} \\ \frac{\partial w}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial \xi} \\ \frac{\partial w}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial r} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \end{Bmatrix} \tag{۲۰}$$

$$J^{-1} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} z_{23} & -z_{13} \\ -r_{23} & r_{13} \end{bmatrix} \tag{۲۱}$$

رابطه تغییر شکل نسبی - تغییر مکان را می‌توان به صورت ماتریس زیر نوشت:

$$\varepsilon^e = B\hat{\delta}_e \tag{۲۲}$$

در این رابطه ماتریس تغییر شکل نسبی- تغییر مکان جزء یعنی B در اندازه (۶ × ۴) به شکل زیر است [۱۲]:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{z_{23}}{\det J} & 0 & \frac{z_{31}}{\det J} & 0 & \frac{z_{12}}{\det J} & 0 \\ 0 & \frac{r_{32}}{\det J} & 0 & \frac{r_{13}}{\det J} & 0 & \frac{r_{21}}{\det J} \\ \frac{r_{32}}{\det J} & \frac{z_{23}}{\det J} & \frac{r_{13}}{\det J} & \frac{z_{31}}{\det J} & \frac{r_{21}}{\det J} & \frac{z_{12}}{\det J} \\ \frac{N_1}{r} & 0 & \frac{N_2}{r} & 0 & \frac{N_3}{r} & 0 \end{bmatrix} \tag{۲۳}$$

چون در قطعات مورد بررسی نیروهای جرمی بسیار ناچیزند و از طرفی نیروهای متمرکز نداریم، با حذف جملات دوم و چهارم از رابطه (۲)، در نهایت انرژی پتانسیل کلی روی جسم را می توان بصورت جمع انرژیهای پتانسیل اجزاء و به شکل زیر نوشت:

$$\Pi = \sum_e 2\pi \left[\frac{1}{2} \int_e \varepsilon^T D \varepsilon r dA - \int_e \delta^{eT} f_s r dL \right] \tag{۲۴}$$

جملهٔ مربوط به انرژی پتانسیل ناشی از تغییر شکل های نسبی بصورت زیر خواهد بود:

$$U_e = \frac{1}{2} \hat{\delta}^{eT} \left[2\pi \int_e B^T D B r dA \right] \hat{\delta}^e \tag{۲۵}$$

که جملهٔ داخل پرانتز در اصل همان ماتریس سختی جزء است:

$$k_e = 2\pi \int_e B^T D B r dA \tag{۲۶}$$

برای سهولت در محاسبات همیشه مقدار ماتریسهای B و k بطور متوسط در مرکز المان محاسبه می گردند. در مرکز المان می توان نوشت:

$$\bar{r} = \frac{r_1 + r_2 + r_3}{3} \quad \text{و} \quad N_1 = N_2 = N_3 = \frac{1}{3} \tag{۲۷}$$

همچنین برای مرکز المان مثلثی تعریف شود: $\bar{B}$، شعاع مرکز المان مثلثی است. در صورتی که ماتریس $\bar{r}$

$$k_e = 2\pi \bar{r} \bar{B}^T D \bar{B} \int_e d.A \tag{۲۸}$$

$$k_e = 2\pi \bar{r} A_e \bar{B}^T D \bar{B} \tag{۲۹}$$

برابر حجم جزء حاصل از دوران المان مثلثی باشد، داریم: $2\pi\bar{r}A_e$ و همچنین:

$$A_e = \frac{1}{2}\left|\det J\right| \quad (۳۰)$$

بطور مشابه می‌توان مقادیر نیروهای سطحی را بطور متوسط در مرکز جزء بدست آورد. قابل ذکر است که برای بدست آمدن دقت بیشتر، اجزاء نزدیک به محور تقارن کوچکتر انتخاب می شوند.

اگر دو مؤلفه نیروی سطحی روی لبه ۱-۲ المان مثلثی (شکل ۲) باشد، آنگاه [۱۲]: $f_{sz}\, f_{sr}$ اگر

$$2\pi \int_{le} \delta^{eT} f_s r dL = \delta^{eT} f_s^e = 2r \int_{le} \delta^{eT} N^T f_s \left[N_1 r_1 + N_2 r_2\right] dl = \quad (۳۱)$$

$$2\pi \delta^{eT} f_s \int N^T (N_1 r_1 + N_2 r_2) dl$$

با اعمال بارهای سطحی (فشار) و اعمال شرایط مرزی و تغییر ماتریس سختی و حذف سطر و ستونهای قابل حذف و به حداقل رسانیدن انرژی پتانسیل سیستم، در نهایت نتیجه ها بصورت یک دستگاه معادلات بصورت زیر خواهد شد:

$$[K] \times [\delta] = [F] \quad (۳۲)$$

و اینکه شرایط مرزی تنها برای مرزهای سطح دوران کننده در نظر گرفته می‌شود. در معادلات فوق ماتریس δ در اصل ماتریس کل جابجائیهای گره‌ها است که از اسمبل کردن ماتریسهای جابجائی تمام المانها حاصل می‌شود و با حل دستگاه فوق بدست خواهد آمد. برای حل دستگاه معادلات فوق روشهای مختلفی وجود دارد که در اینجا از روش گوس- جردن برای حل استفاده شده است، زیرا با این روش مدت زمان کوتاهتری برای رسیدن به جواب لازم است. در ادامه، از رابطه زیر، کرنش و سپس تنش محاسبه می شود:

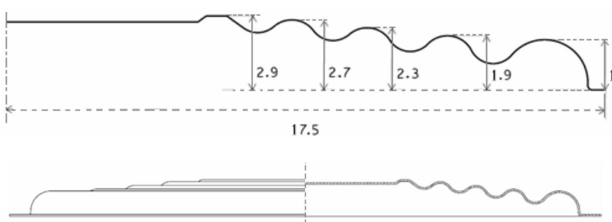
$$\varepsilon = B \hat{\delta}^{e} \rightarrow \sigma = D\, \varepsilon \quad (۳۳)$$

۳. بررسی دقت نتایج

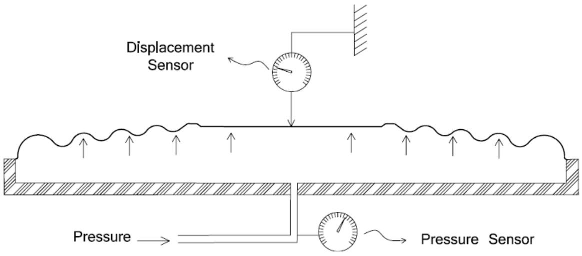
۳-۱. نتایج تجربی

برای بررسی دقت جواب‌های روش تئوری ذکر شده چندین نمونه ورق موجدار متقارن محوری انتخاب شده و در آزمایشگاه مورد تست قرار گرفته است که نمونه‌ای از آن در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

این ورق با جنس نیکل و ضخامت mm ۰/۳ تحت فشارهای مختلف قرار گرفت و جابجائی‌های حداکثر که در مرکز ورق ایجاد می شود اندازه‌گیری شد. در شکل (۴)، یک طرح شماتیک از سیستم آزمایشگاهی رسم شده است.



شکل ۳. قطعه انتخابی برای تحلیل با سطح مقطع نشان داده شده با موج دایره‌ای (اندازه‌ها به mm)



شکل ۴. طرح شماتیک سیستم آزمایشگاهی

همانطور که در شکل فوق مشاهده می شود ابتدا ورق موجدار روی دستگاه بسته می‌شود. سپس از قسمت پایین هوا با فشار وارد سیستم می شود که این فشار توسط یک حسگر که در مسیر قرار دارد اندازه گیری می شود. با افزایش فشار، جابجایی حداکثر ورق که در مرکز آن می باشد نیز افزایش پیدا می‌کند.

در مراحل افزایش فشار، مقدار فشار و جابجایی حداکثر ورق از روی حسگرهای فشار و جابجایی که به ترتیب در پایین و بالای سیستم نصب شده اند، خوانده شده است که این مقادیر در جدول (۱) مشاهده می شود.

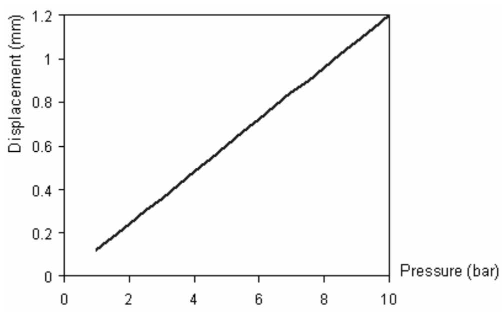
جدول ۱. مقادیر تجربی

جابجایی (mm)	فشار (bar)
0.22	2
0.36	3
0.49	4
0.64	5
0.76	6
0.88	7

۳-۲. نتایج تئوری

برای تسریع و سهولت انجام محاسبات با استفاده از روش المان محدود و نرم افزار ویژوال بیسیک، برنامه ای تهیه شده است که برای المان‌بندی‌ها، فشارها، جنس‌ها و اشکال مختلف موج، مقادیر جابجائی و تنش را بصورت خروجی می دهد .

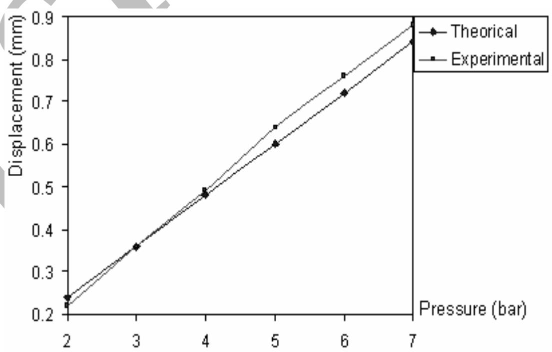
مزیت مهم برنامه نوشته شده با این روش آن است که برای تحلیل هر ورق مورد نظر، فقط کافی است که شکل سطح مقطع و سایر مشخصات ورق به برنامه داده شود تا جابجایی و تنش آن محاسبه شود. در این قسمت، ورق شکل (۳) که در قسمت قبل در آزمایشگاه مورد تست قرار گرفت، این بار توسط روش المان محدود یعنی با استفاده از برنامه رایانه‌ای تهیه شده، تحلیل شد. مقادیر بدست آمده، در شکل (۵)، مشاهده می‌شوند.



شکل ۵. مقادیر حاصل از روش تئوری

۳-۳. مقایسه مقادیر تئوری و تجربی

در بخش‌های ۳-۱ و ۳-۲، ورق شکل (۳) توسط روش تجربی و تئوری مورد تحلیل قرار گرفت که نتایج آنها در جدول (۱) و شکل (۵) آورده شده است. در ادامه برای بررسی میزان تطابق مقادیر بدست آمده از این دو روش، منحنی آنها در شکل (۶) با یکدیگر مقایسه شده اند.

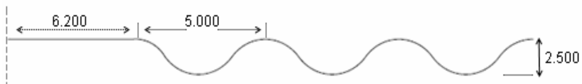


شکل ۶. مقایسه مقادیر تئوری و تجربی

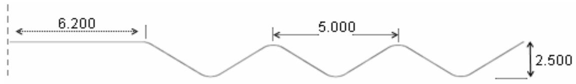
با توجه به مقادیر حاصل از روش المان محدود و مقایسه آنها با مقادیر آزمایشگاهی، مشاهده می شود که نتایج به واقعیت با تقریب خوبی نزدیک است، زیرا میانگین خطا ۴٪ است که البته بخشی از آن مربوط به خطای ابزارهای آزمایشگاهی می‌باشد. پس با توجه به دقت روش المان محدود، نتایج حاصل از تحلیل با این روش قابل استناد است.

۴. تغییر در پارامترهای موثر

در این تحقیق تغییرات زیادی در پارامترهای مختلف ایجاد شده و نتایج حاصل بررسی شده است که در ادامه چند مورد از موثرترین پارامترها به عنوان نمونه بررسی شده‌اند. ابتدا نمودارهای حاصل از تحلیل ورق با تغییر در پارامتر نوع موج شامل، ۳ نوع موج دایره‌ای، مثلثی و ذوزنقه‌ای رسم شده است. موج دایره‌ای، موج مثلثی و موج ذوزنقه‌ای در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) رسم شده است.



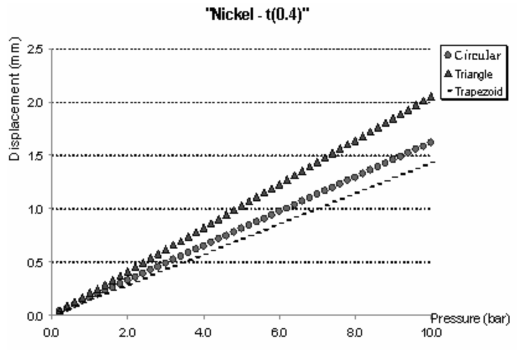
شکل ۷. شکل موج دایره‌ای (اندازه‌ها به mm)



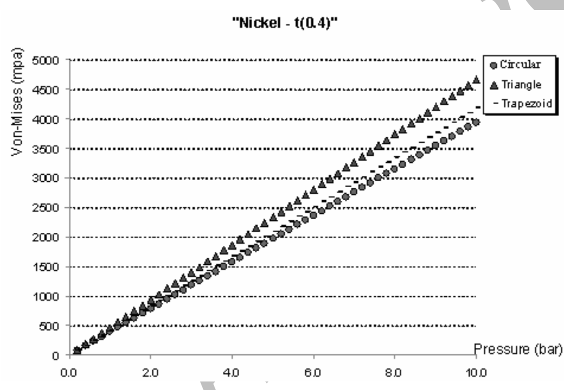
شکل ۸. شکل موج مثلثی (اندازه‌ها به mm)

شکل ۹. شکل موج ذوزنقه‌ای (اندازه‌ها به mm)

در مرحله بعد، تغییر در جنس برای نیکل و فولاد و سپس تغییر در ضخامت ورق بررسی شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). قابل ذکر است که تنش‌ها براساس معیار ون مایزز محاسبه شده است.

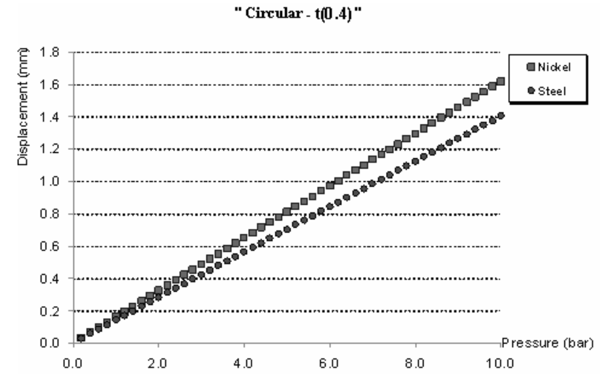


شکل ۱۰. جابجایی- فشار، نیکل با ضخامت ۰/۴ mm (موجهای مختلف)

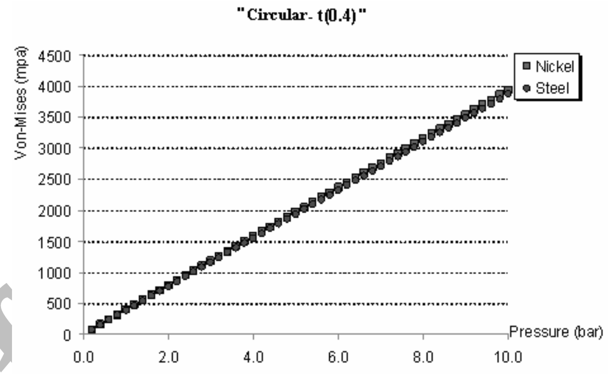


شکل ۱۱. تنش- فشار، نیکل با ضخامت ۰/۴ mm (موجهای مختلف)

همانطور که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می شود موج مثلثی نسبت به دو موج دیگر بررسی شده از جابجایی و تنش بیشتری برخوردار است. با توجه به شکل (۱۲)، ورق با موج دایره ای و جنس نیکل نسبت به همان ورق با جنس فولاد از جابجایی بیشتری برخوردار است. ولی با مقایسه تنش برای همین نمونه‌ها در شکل (۱۳)، مشاهده می شود که تنش آنها تقریباً یکسان است.



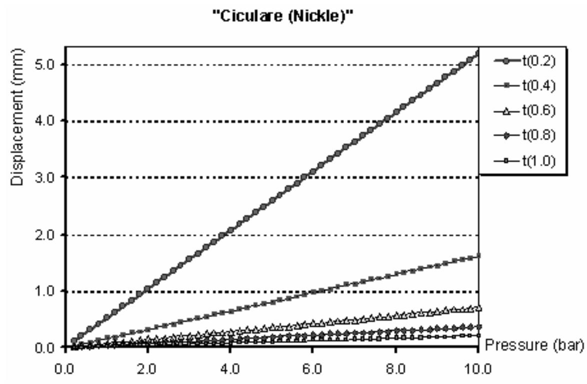
شکل ۱۲. جابجایی- فشار برای موج دایره ای (مقایسه فولاد و نیکل)



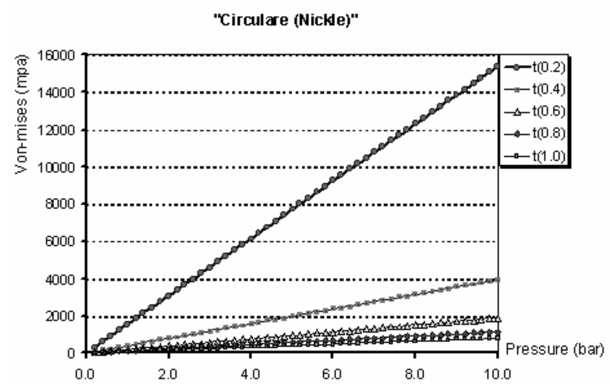
شکل ۱۳. تنش- فشار برای موج دایره‌ای (مقایسه فولاد و نیکل)

با بررسی اثر ضخامت در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، همانطور که انتظار می‌رفت، مشاهده می شود که با افزایش ضخامت ورق، جابجایی و تنش کاهش می‌یابد.

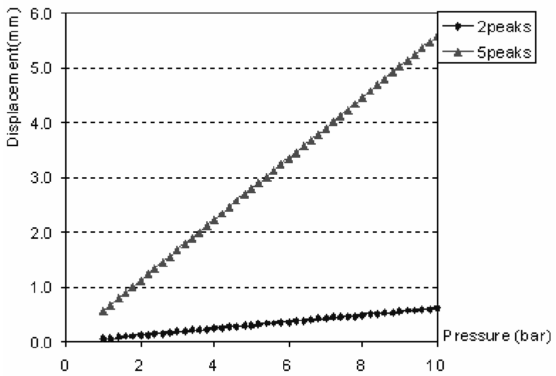
در ادامه برای موج دایره‌ای، پارامترهای تعداد قله های موج و ارتفاع موج تغییر داده شده است. ابتدا ورق با سطح مقطع موجی دایره‌ای شکل با ۲ و ۵ قله تحلیل شده و نتایج در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) رسم شده است.



شکل ۱۴. جابجایی- فشار برای موج دایره ای
(نیکل، ضخامتهای مختلف)



شکل ۱۵. تنش- فشار برای موج دایره ای (نیکل، ضخامتهای مختلف)

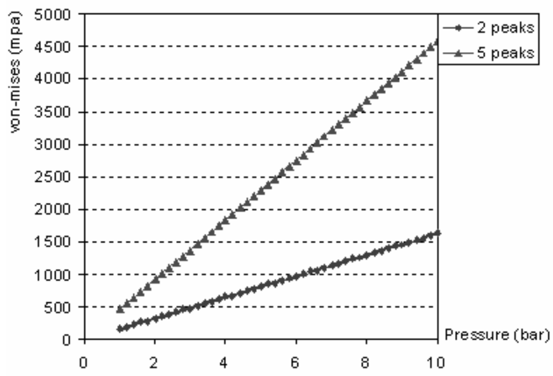


شکل ۱۶. جابجایی- فشار برای موج دایره ای
(فولاد، تعداد قله های مختلف)

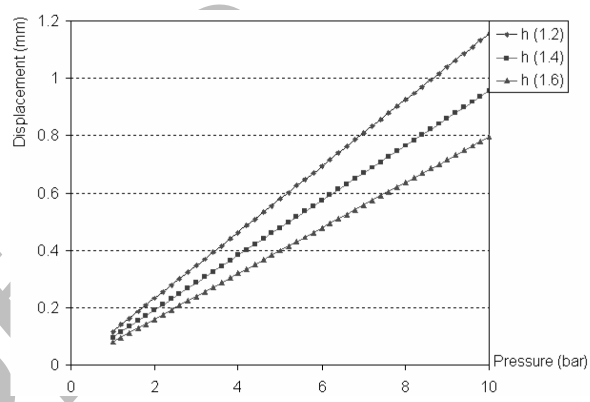
در شکل (۱۶) مشاهده می شود که ایجاد تغییرات در تعداد قله های موج، تاثیر قابل توجهی بر مقدار جابجایی در ورقهای موجدار متقارن محوری دارد. همچنین در شکل (۱۷)، همین شدت تاثیر بر میزان تنش در این ورقها مشاهده می شود، به این صورت که افزایش تعداد قله‌های موج باعث افزایش شدید در میزان جابجایی و تنش در ورق می‌شود.

عامل موثر دیگری که در موجهای دایره‌ای مطرح است، ارتفاع قله‌های موج است. در ادامه، موج دایره ای با ارتفاع ۱٫۲، ۱٫۴ و ۱٫۶ برابر شکل (۷)، مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) رسم شده است.

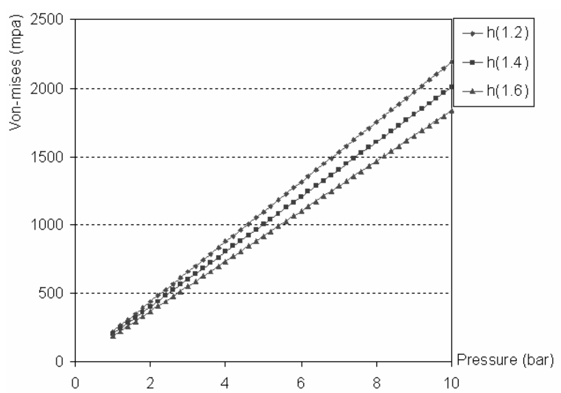
در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود که با افزایش در ارتفاع قله های موج، از مقدار جابجایی در ورقهای موجدار متقارن محوری کاسته می شود. همچنین در شکل (۱۹) نیز مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع قله‌های موج باعث کاهش مقدار تنش در این ورقها می‌شود. همچنین قابل ذکر است، شکل‌های (۱۲) تا (۱۹) که در اینجا برای موج دایره‌ای رسم شده‌اند، برای انواع دیگر موج نیز رسم شده‌اند که به عنوان نمونه در این قسمت موج دایره‌ای آورده شده است.



شکل ۱۷. تنش- فشار برای موج دایره ای
(فولاد، تعداد قله های مختلف)



شکل ۱۸. جابجایی- فشار برای موج دایره ای
(فولاد، ارتفاع موج های مختلف)



شکل ۱۹. تنش- فشار برای موج دایره ای
(فولاد، ارتفاع موجهای های مختلف)

۵. نتیجه‌گیری

با بررسی شکل‌های (۱۰) تا (۱۵) مشاهده می‌شود در شرایطی که جنس ورق ثابت است، بیشترین تاثیر مربوط به تغییر در ضخامت ورق بوده و سپس تغییر در نوع موج از تاثیر قابل توجهی برخوردار است. ولی در مواردی که جنس ورق قابل تغییر باشد، تغییر دادن جنس ورق می‌تواند تاثیر بیشتری در جابجایی ورق نسبت به سایر پارامترها داشته باشد.

همچنین از شکل‌های (۱۶) تا (۱۹) مشخص است که برای یک نوع موج معین مثل موج دایره‌ای، تغییر در تعداد قله‌های موج تاثیر بسیار زیادی در تنش و جابجایی دارد و تغییر در ارتفاع قله‌های موج از تاثیر کمتری نسبت به تغییر در تعداد قله‌های آن برخوردار است.

پس برای طراحی ورقهای موجدار متقارن محوری، استفاده از نتایج این مقاله و ترکیبی از تغییرات در پارامترهای مختلف که بستگی به شرایط طراحی دارد، پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[1] Li, X., Lin, R., Kek, H., Miao, J., and Zou, Q., “Sensitivity-improved silicon condenser microphone with a novel single deeply corrugated diaphragm”, Sensors and Actuators, No. 92, pp. 257-262, 2001.
[2] Soin, N. and Majlis, B. Y., “Development of perfect silicon corrugated diaphragm using anisotropic etching”, Microelectronic Engineering, No. 83, pp.1438-1441 , 2006.
[3] Jang, W. I. and Choi, C. A., “Surface micromachined thermally driven micropump”, Sensors and Actuators, No. 115, pp.151-158, 2004.
[4] Jeong, O. C. and Yang, S. S., “Fabrication and test of a thermopneumatic micropump with a corrugated p+ diaphragms”, Sensors and Actuators, No. 83, pp. 249-255, 2000.
[5] Kressman, R., Klaiber, M. and Hess, G.,” Siliocon condenser microphones with corrugated silicon oxide/nitride electrets membranes”, Sensors and Actuators, No. 100, pp. 301-309, 2002.
[6] Scheeper, P., Donk, A., and Olthuis, W., “A review of silicon microphones”, Sensors and Actuators, Vol. 44, No. 1, pp.1-11, 1994.
[7] Zappe, Z., Obermeier, E., Moller, H., Krotz, G., and Mennozi, “Piezoresistive pressure sensor for high temperature and high pressure applications”, Transducers, Sendai, Japan, pp.346-349, 1999.
[8] Sessler, G., “Acoustic sensors”, Sensors and Actuators, Vol. 25, pp. 323-330, 1991.
[9] Li, X., Lin, R., Kek, H., Miao, J., and Zou, Q., “Sensitivity-improved silicon condenser microphone with a novel single deeply corrugated diaphragm”, Sensors and Actuators, No. 92, pp. 257-262, 2001.
[10] Brauer, M., Dehe, A., Bever, T., Barzen, S., Schmitt, S., Fuldner, M., and Aigner, R., ”Silicon microphone based on surface and Bulk micromachining”, J. Micromech. Microeng, No. 11, pp.319-322, 2001.
[11] Chandrupatla, T., and Belequndu, D., “Introduction to finite element in engineering”, Prentice hall of India, 1991.
[۱۲] صدرنژاد، س. ا.، "مقدمه‌ای بر روش اجزاء محدود"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۰.