

استخراج منحنی‌های دیسپرزین امواج لمب در یک میکرو-ورق آلومینیوم نیتريد (AlN) با استفاده از تئوری تنش کوپلی سازگار

بهنام قدرتی¹، امین یاقوتیان^{2*}، افشین قنبرزاده²، حمید محمد صدیقی²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز

* اهواز، صندوق پستی 6135743337، a.yaghootian@scu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش معادلات انتشار امواج لمب در یک میکرو ورق همسانگرد بی‌نهایت با در نظر گرفتن اثر تنش‌های کوپلی و با استفاده از تئوری تنش کوپلی سازگار استخراج شده است. اثر اندازه میکرو ورق، با استفاده از پارامتر طول مشخصه، در معادلات مذکور لحاظ شده است که بدین ترتیب می‌توان تأثیر ابعاد مختلف ورق را در نحوه دیسپرزین امواج لمب مشاهده نمود. به دلیل کاربرد میکرو ورق‌های آلومینیوم نیتريد در محرک‌های صوتی سطحی، انتشار امواج لمب در این مواد مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه ابتدا بی‌بعدسازی روابط با استفاده از تعریف پارامترهای بی‌بعد، انجام شده است؛ بنابراین نمودارهای به‌دست‌آمده برای تمام ضخامت‌ها، طول موج‌های انتشاری و اندازه‌های پارامتر طول مشخصه یک میکرو ورق قابل استفاده است؛ سپس بر اساس تقریب شبه استاتیک، نمودارهای دیسپرزین امواج لمب برای دو مود متقارن و پادمقارن اول در میکرو ورقی از جنس آلومینیوم نیتريد ترسیم شده و با نتایج حاصل از تئوری کلاسیک مقایسه شده است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده و داده‌های تجربی صحت روابط را نشان می‌دهد. در نهایت، با توجه به اینکه تعیین پارامتر طول مشخصه نقش اساسی در استفاده از تئوری تنش کوپلی سازگار دارد، روشی برای مشخص نمودن این اندازه با استفاده از نمودارهای دیسپرزین و داده‌های تجربی گزارش شده، پیشنهاد شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 مهر 1394
پذیرش: 19 آذر 1394
ارائه در سایت: 23 دی 1394

کلید واژگان:

تئوری تنش کوپلی سازگار

امواج لمب

پارامتر طول مشخصه

نمودار دیسپرزین

میکرو-ورق آلومینیوم نیتريد

Extraction of dispersion curves for Lamb waves in an aluminium nitride (AlN) micro plate using consistent couple stress theory

Behnam Ghodrati, Amin Yaghootian*, Afshin Ghanbar Zadeh, Hamid Mohammad Sedighi

Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

* P.O.B. 6135743337, Ahvaz, Iran, a.yaghootian@scu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 October 2015
Accepted 10 December 2015
Available Online 13 January 2016

Keywords:
Consistent couple stress theory
Lamb waves
Characteristic length
Dispersion curve
Aluminium nitride micro-plate

ABSTRACT

The equations of Lamb wave propagation in an infinite isotropic micro plate on the basis of consistent coupled stress theory is presented in this study. By employing the characteristic length scale parameter, the effect of micro-plate size is considered, and thereby the effects of different plate dimensions on the dispersion of Lamb waves is illustrated. Lamb wave propagation velocity in aluminum nitride micro-plates has received much interest due to its applications in surface acoustic resonators. In the current work, at first, the dimensionless relations are developed through the definition of dimensionless parameters where the extracted curves can be applied to all thicknesses, propagation wavelengths and characteristic length scale parameters of a micro-plate. In addition, using the quasi-static approximation, the Lamb wave dispersion curves in both symmetric and asymmetric modes for an aluminum nitride micro plate are plotted and compared with the results from the classical theory. The integrity of the present formulation is verified by comparing the obtained results with the experimental data in the literature. Finally, by employing the dispersion curves and the reported experimental data, a novel method has been proposed to determine the size of characteristic length parameter in the consistent coupled stress theory.

1- مقدمه
امروزه میکرو ساختارها به‌خوبی جایگاه خود را در صنایع مختلف و فناوری‌های گوناگون پیدا کرده‌اند. از کاربرد آن‌ها در پیشرفته‌ترین صنایع نظامی و هوافضا [1] گرفته تا مصارفی مانند ارتباطات مخابراتی [2]، شتاب‌سنج‌ها [3] و حس‌گرهای مورد استفاده در صنعت [4] و فناوری‌های نوین بیوشیمیایی و بیوزیستی [5]، می‌توان به اهمیت سیستم‌های میکرو و

1- Micro-nano electromechanical systems (MEMS/NEMS)
2- Surface Acoustic Waves (SAW)

Please cite this article using:

B. Ghodrati, A. Yaghootian, A. Ghanbar Zadeh, H. Mohammad Sedighi, Extraction of dispersion curves for Lamb waves in an aluminium nitride (AlN) micro plate using consistent couple stress theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 248-256, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

وابستگی سرعت انتشار هر مود از موج لمب به فرکانس یا طول موج آن از نمودار دیسپرز استفاده می‌شود. برای رسم این نمودار در مواد همسانگرد از تئوری کلاسیک الاستیسیته [11,9] و در مواد پیزوالکتریک از روش ماتریس [12] و فرمولاسیون تابع گرین [13] استفاده می‌شود؛ اما از آنجا که محرک‌های امواج لمب در بازه فرکانس‌های گیگاهرتزی در ابعاد میکرو یا کوچک‌تر ساخته می‌شوند و در این ابعاد ریزساختار مواد نیز نقش مهمی در تعیین خواص آن‌ها بازی می‌کند، نیاز به روشی که در آن تأثیر این ریزساختارها در نحوه انتشار امواج لمب بررسی گردد احساس می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی مؤید آن است که در ابعاد میکرو و کوچک‌تر خواص مکانیکی مواد با خواصی که آن‌ها در ابعاد معمول از خود نشان می‌دهند تفاوت دارد [14]. این تفاوت به گونه‌ای است که قابل صرف نظر نبوده و باید به روشی در محاسبات مربوط به مدل‌سازی در ابعاد میکرو لحاظ گردد. از آنجا که تئوری کلاسیک قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار ریزساختارها نمی‌باشد تلاش‌های مختلفی برای اصلاح آن صورت گرفت. ویت [15] اولین کسی بود که به تأثیر تنش‌های کوبلی در مواد اشاره کرد. پس از وی برادران کسرات [16] روابط ریاضی برای در نظر گرفتن تأثیر این تنش‌های کوبلی را ارائه کردند به این صورت که علاوه بر سه درجه آزادی انتقالی هر المان از ماده، سه درجه آزادی چرخشی نیز در نظر گرفته می‌شود. پس از آن‌ها محققان در سالیان متمادی به توسعه و بهبود این مدل‌ها در قالب تئوری‌هایی مانند تئوری تنش کوبلی میندلین و تیرستن [17]، کویتز [18]، تئوری تنش کوبلی اصلاح شده یانگ و همکاران [19]، تئوری میکروپولار [20] و تئوری‌های گرادیان کرنش [22,21] پرداختند. یکی از جدیدترین این مدل‌ها، مدل ارائه‌شده توسط حاج اسفندیاری و درگوش [23] است که در آن به دلیل صرف نظر از مؤلفه‌های نرمال تانسور تنش کوبلی در یک المان حجمی از محیط پیوسته، این تانسور پادمقارن می‌گردد و به این دلیل از بخش کروی این تانسور که در تئوری‌های تنش کوبلی ارائه‌شده پیشین به صورت نامعین باقی می‌ماند صرف نظر می‌شود. همچنین معادلات ارائه‌شده توسط این مدل تنها شامل یک پارامتر طول مشخصه جهت در نظر گرفتن تأثیر ریزساختار می‌باشند. این مدل با نام تئوری تنش کوبلی سازگار شناخته می‌شود.

شارما و کومار [24] با استفاده از تئوری تنش کوبلی ارائه‌شده توسط حاج اسفندیاری و درگوش [23] انتشار امواج لمب در یک ورق را مدل‌سازی نمودند و معادله مشخصه‌ای برای نمایش نحوه دیسپرز امواج لمب در آن به دست آوردند، آن‌ها سپس با حل عددی معادله فوق نمودارهای دیسپرز امواج لمب را تنها برای مود پادمقارن و ورقی با جنس استخوان در ابعاد میلی‌متر ارائه کردند.

گودرزی و همکاران [25] با استفاده از تئوری تنش کوبلی نامعین میندلین [17] و تئوری تنش کوبلی سازگار [23] به بررسی میدان الاستودینامیک ناشی از تفرق موج برشی الاستیک برون صفحه‌ای با فرکانس بالا توسط نانو حفره استوانه‌ای محصور در محیط الاستیک بی نهایت پرداختند و نتایج به دست آمده با در نظر گرفتن اثر اندازه را با نتایج حاصل از تئوری کلاسیک مقایسه نمودند.

همچنین یانچو [8] به صورت تجربی به بررسی اثر تغییر پارامترهای مختلف بر عملکرد محرک امواج صوتی حجمی در لایه‌نازک پرداخت و سرعت انتشار مود اول متقارن موج لمب در یک میکرو ورق از جنس آلومینیوم نیتريد را به دست آورد و مشاهده نمود که این سرعت بیشتر از سرعت پیش‌بینی‌شده توسط تئوری کلاسیک است.

استفاده از امواج با طول موج‌های در ابعاد میکرو در دهه‌های اخیر به دلیل خواصی مانند مصرف و اتلاف انرژی پایین و توانایی استفاده در میکرو ساختارها در زمینه‌ی ارتباطات موبایل و بی‌سیم به شدت مورد توجه قرار گرفته است. برای تولید این امواج عموماً از دو ساختار با نام‌های محرک‌های امواج صوتی سطحی¹ و محرک‌های امواج صوتی حجمی در لایه‌نازک² استفاده می‌شود. هر کدام از این ساختارها دارای مزایا و معایبی می‌باشند. از مزایای محرک‌های امواج صوتی سطحی به طور مثال می‌توان به توانایی تولید فرکانس‌های بالا در بازه گیگاهرتزی، کیفیت مناسب ذخیره‌سازی و انتشار انرژی و همچنین هزینه پایین ساخت و از معایب آن می‌توان به ناسازگار بودن با فناوری مدارهای مجتمع³ اشاره کرد. همچنین، در مورد مزایای ساختار محرک‌های امواج صوتی حجمی در لایه‌نازک می‌توان به کیفیت بالا در فرکانس‌های پایین و اتلاف انرژی کمتر نسبت به محرک‌های امواج صوتی سطحی و همچنین سازگار بودن با فناوری مدارهای مجتمع اشاره کرد. از اشکالات اساسی ساختار محرک‌های امواج صوتی حجمی در لایه‌نازک هم می‌توان حساسیت بالای فرکانس به عیوب به وجود آمده هنگام ساخت و عدم تولید فرکانس‌های بالا را نام برد. در نتیجه‌ی تحقیقات صورت گرفته در سالیان اخیر نوع جدیدی از محرک‌ها به نام محرک امواج لمب⁴ معرفی شده است که در آن اصول عملکرد محرک‌های امواج صوتی سطحی با شکل ساختاری محرک‌های امواج صوتی حجمی در لایه‌نازک ترکیب شده و به این ترتیب مزایای هر دو محرک حاصل می‌شوند [7]. این محرک با نام محرک صوتی لایه‌نازک ورقی⁵ نیز شناخته می‌شود [8].

امواج لمب دسته‌ای از امواج هدایت‌شده هستند که در ضخامت ورق‌ها انتشار می‌یابند. از آنجا که این امواج حین انتشار با مرزهای بالایی و پایینی ورق برخورد می‌کنند، بسته به فرکانس یا طول موج، با مودها و سرعت‌های مختلفی انتشار می‌یابند که به این پدیده دیسپرز امواج لمب گفته می‌شود. برای بیان سرعت انتشار این امواج نیز از دو مفهوم سرعت فاز و سرعت گروه استفاده می‌گردد. سرعت فاز به معنای سرعت حرکت یک نقطه ثابت بر روی موج انتشاری بوده و سرعت گروه نیز به معنای سرعت حرکت دسته‌ای از امواج مانند جبهه موج در محیط می‌باشد. اگرچه این خاصیت چند مودی و دیسپرسیو، تولید، کنترل و اندازه‌گیری آن‌ها را در قیاس با امواج حجمی دشوارتر ساخته است اما کاربرد این امواج در زمینه‌هایی مانند آزمون‌های غیر مخرب، تعیین خواص مواد و همچنین میکرو محرک‌های امواج لمب باعث شده است که در چند دهه اخیر بررسی گسترده‌ای بر روی خواص و نحوه انتشار این امواج صورت پذیرد [9].

امروزه پیشرفت‌های حاصل‌شده در رشد غشای آلومینیوم نیتريد در محرک‌های امواج لمب، بررسی نحوه انتشار و به دست آوردن خواص دیسپرسیو این امواج در این ورق‌ها را به موضوعی با اهمیت مبدل ساخته است [10]. محرک‌های امواج لمب آلومینیوم نیتريد با استفاده از پایین‌ترین مود متقارن (S_0) توانایی تولید سرعت فازهای در حدود 10000 متر بر ثانیه را دارند که استفاده از آن‌ها را در کاربردهای فرکانس بالا و با پهنای باند کم سیستم‌های بی‌سیم ایده‌آل می‌سازد. برای نمایش نحوه

1- SAW resonators
2- Thin Film Bulk Acoustic Resonators (FBAR)
3- Integrated Circuit (IC)
4- Lamb Wave Resonator (LWR)
5- Thin Film Plate Acoustic Resonator (FPAR)

در رابطه (7) اعضای قطری ماتریس χ_{ij} بیانگر پیچش خالص حول محور مختصات بوده و اعضای غیر قطری آن بیانگر انحراف از حالت کرویت هستند، این تانسور تأثیر چندانی در تغییر شکل نداشته و به همین دلیل در رابطه انرژی کرنشی منظور نمی‌گردد؛ اما از سوی دیگر در تئوری تنش کوبلی، تانسور انحناء κ_{ij} نقش مهمی را در رابطه انرژی کرنش ایفا می‌کند. بردار دوگانه این تانسور مطابق رابطه (10) به دست می‌آید.

$$\kappa_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} \kappa_{kj} = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} \omega_{k,j} \quad (10)$$

برای یک ماده همسانگرد بخش متقارن تانسور تنش در رابطه (1) مانند تانسور تنش در حالت کلاسیک بوده و به‌صورت رابطه (11) نوشته می‌شود.

$$\sigma_{(ji)} = \nu e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (11)$$

که در آن ν و μ ثوابت لامه می‌باشند.

از آنجاکه تانسور تنش کوبلی پادمتقارن است بردار دوگانه این تانسور را می‌توان به‌صورت رابطه (12) تعریف کرد.

$$\Gamma_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} \Gamma_{kj} \quad (12)$$

برای مواد همسانگرد خطی، اسفندیاری و درگوش [23] نشان دادند که تنش نیرو و تنش کوبلی به ترتیب از روابط (13) و (14) به دست می‌آیند.

$$\sigma_{ji} = \nu e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} + 2\eta \nabla^2 \omega_{ji} \quad (13)$$

$$\Gamma_{ji} = -8\eta \kappa_{ij} = 4\eta (\omega_{i,j} - \omega_{j,i}) \quad (14)$$

در روابط (13) و (14) برای مواد همسانگرد، تنها پارامتر وابسته به اندازه که مابین تئوری کلاسیک و تئوری تنش کوبلی سازگار تفاوت ایجاد می‌کند ثابت $\eta = \mu l^2$ می‌باشد. در اینجا پارامتر l بیانگر اندازه طول مشخصه در ماده بوده که برای هر ماده و هر بعد اندازه (میکرو، نانو و...) مقادیر متفاوتی را به خود می‌گیرد. با صفر فرض کردن این پارامتر، معادلات تنش به‌دست‌آمده به معادلات حالت کلاسیک تبدیل خواهند شد. این پارامتر معمولاً توسط روش‌های مختلف آزمایشگاهی مانند آزمون خمش یا آزمون ضربه در ابعاد مختلف و شرایط کاری گوناگون به کمک دستگاه‌های پیشرفته و میکروسکوپ‌های قدرتمند الکترونی به دست می‌آید. همین امر به دست آوردن پارامتر طول مشخصه را در ریزساختارهای گوناگون به امری زمان‌بر و پرهزینه مبدل ساخته است. در بخش 4-1 نشان داده خواهد شد که چگونه به کمک انتشار امواج لمب و اندازه‌گیری سرعت انتشار این امواج در مواد می‌توان پارامتر طول مشخصه l را با روشی ساده‌تر به دست آورد.

3- مدل سازی انتشار امواج لمب در یک میکرو-ورق بی نهایت

امواج لمب، امواجی از نوع هدایت‌شده هستند که در یک ورق انتشار می‌یابند. معادله حاکم بر حرکت ذرات به‌صورت رابطه (15) نوشته می‌شود [9].

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \ddot{u}_i \quad (15)$$

با جایگذاری مؤلفه تنش از رابطه (11) در رابطه (15)، معادله حاکم بر حرکت ذرات و انتشار موج بر اساس تئوری تنش کوبلی به‌صورت رابطه (16) به دست می‌آید.

$$(\nu + \mu + \eta \nabla^2) u_{k,ki} + (\mu - \eta \nabla^2) \nabla^2 u_i + \rho F_i = \rho \ddot{u}_i \quad (16)$$

که در آن ρ بیانگر چگالی ماده و F بیانگر نیروهای حجمی می‌باشند.

در تحقیق پیش رو پس از یک مرور کلی بر تئوری تنش کوبلی سازگار، معادلات بی‌بعد مربوط به مدل‌سازی مودهای متقارن و پادمتقارن انتشار امواج لمب در یک ورق بی‌نهایت با ضخامت محدود به دست آورده می‌شوند. سپس با استفاده از تقریب شبه استاتیک¹ ماتریس سفتی سخت شده² برای ماده پیزوالکتریک آلومینیوم نیتريد [26] و با کمک روش‌های عددی، معادلات مشخصه به‌دست‌آمده برای یک میکرو ورق از جنس آلومینیوم نیتريد با جهت‌گیری در راستای c^3 حل شده و نمودارهای دیسپرز برای مودهای متقارن اول (S_0) و پادمتقارن اول (A_0) رسم می‌گردند. سپس نتایج به‌دست‌آمده با کمک رابطه به‌دست‌آمده توسط شارما [24] و نتایج تجربی یانچو [8] صحت سنجی شده و در نهایت روشی برای تعیین طول مشخصه مورد استفاده در تئوری تنش کوبلی بر اساس سرعت انتشار امواج لمب در ورق پیشنهاد می‌گردد.

2- تئوری تنش کوبلی سازگار

بر اساس تئوری ارائه‌شده توسط حاج اسفندیاری و درگوش [23] برای یک ماده پیوسته تنش‌های ایجاد شده به‌وسیله نیروها و کوبل‌های سطحی در یک المان حجمی را می‌توان به کمک تانسورهای پادمتقارن تنش نیرو و تنش کوبلی به ترتیب به‌صورت روابط (1) و (2) نشان داد.

$$\sigma_{ji} = \sigma_{(ji)} + \sigma_{[ji]} \quad (1)$$

$$\Gamma_{ji} = \Gamma_{(ji)} + \Gamma_{[ji]} \quad (2)$$

که در آن‌ها $\sigma_{(ji)}$ و $\Gamma_{(ji)}$ بیانگر بخش متقارن و $\sigma_{[ji]}$ و $\Gamma_{[ji]}$ بیانگر بخش پادمتقارن به ترتیب تانسور تنش نیرو و تنش کوبلی می‌باشند.

با در نظر گرفتن تغییر شکل کوچک در یک حجم واحد از ماده پیوسته، تانسور گرادیان جابجایی را می‌توان به‌وسیله مجموع دو بخش متقارن و پادمتقارن به‌صورت رابطه (3) نمایش داد.

$$u_{i,j} = e_{ij} + \omega_{ij} \quad (3)$$

که در آن:

$$e_{ij} = u_{(i,j)} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

$$\omega_{ij} = u_{[i,j]} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i}) \quad (5)$$

در رابطه (3)، $u_{i,i}$ بیانگر مؤلفه‌های جابجایی در جهت‌های اصلی و در تغییر شکل‌های کوچک، e_{ij} برابر تانسور کرنش و ω_{ij} برابر تانسور چرخش می‌باشند. همچنین بردار دوگانه⁴ تانسور چرخش نیز از رابطه (6) به دست می‌آید.

$$\omega_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} \omega_{kj} = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} u_{k,j} \quad (6)$$

در رابطه (6) بیانگر تانسور جایگشت⁵ می‌باشد.

همانند تانسور گرادیان جابجایی، تانسور گرادیان چرخش را نیز می‌توان به‌صورت جمع دو بخش متقارن و پادمتقارن مطابق رابطه (7) نمایش داد.

$$\omega_{i,j} = \chi_{ij} + \kappa_{ij} \quad (7)$$

که در آن:

$$\chi_{ij} = \omega_{(i,j)} = \frac{1}{2} (\omega_{i,j} + \omega_{j,i}) \quad (8)$$

$$\kappa_{ij} = \omega_{[i,j]} = \frac{1}{2} (\omega_{i,j} - \omega_{j,i}) \quad (9)$$

1- Quasi-static approximation
2- Piezoelectrically stiffened stiffness matrix
3- C-oriented aluminium nitride
4- Dual vector
5- Permutation tensor

ضرایب ماتریس سفتی ماده به دست می‌آیند [9].

$$c_L = \sqrt{\frac{\nu + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (23)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (24)$$

که در آن C_{11} و C_{44} ثوابت ماتریس سفتی ماده همسانگرد می‌باشند. شارما [24] نشان داد که بازنویسی رابطه (16) بر اساس توابع پتانسیل به صورت روابط (25) و (26) خواهد بود.

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (25)$$

$$\nabla^2 \psi - l^2 \nabla^4 \psi = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (26)$$

توابع ϕ و ψ برای انتشار امواج در جهت x به صورت روابط (27) و (28) حدس زده می‌شوند:

$$\phi = f(z) e^{i\xi(x-c_p t)} \quad (27)$$

$$\psi = g(z) e^{i\xi(x-c_p t)} \quad (28)$$

در روابط فوق c_p برابر با سرعت فاز انتشار امواج لمب، ξ بیانگر عدد موج و $i = \sqrt{-1}$ می‌باشد.

با جایگذاری روابط (27) و (28) در روابط (25) و (26) و حل آن‌ها توابع ϕ و ψ به صورت روابط (29) و (30) به دست می‌آیند.

$$\phi = (A_1 \cos \alpha z + A_2 \sin \alpha z) e^{i\xi(x-c_p t)} \quad (29)$$

$$\psi = (A_3 \cos \beta z + A_4 \sin \beta z + A_5 \cos \gamma z + A_6 \sin \gamma z) e^{i\xi(x-c_p t)} \quad (30)$$

سپس با استفاده از روابط (18) و (19) جابجایی‌های افقی و قائم به صورت روابط (31) و (32) به دست می‌آیند.

$$u_1 = [(A_1 \cos \alpha z + A_2 \sin \alpha z) - (-A_3 \beta \sin \beta z + A_4 \beta \cos \beta z - A_5 \gamma \sin \gamma z + A_6 \gamma \cos \gamma z)] e^{i\xi(x-c_p t)} \quad (31)$$

$$u_3 = [(-A_1 \alpha \sin \alpha z + A_2 \alpha \cos \alpha z) + (A_3 \cos \beta z + A_4 \sin \beta z + A_5 \cos \gamma z + A_6 \sin \gamma z)] e^{i\xi(x-c_p t)} \quad (32)$$

همچنین ضرایب α, β, γ از حل همزمان روابط (33) تا (35) به دست می‌آیند.

$$\alpha^2 = \xi^2 \left(\frac{c_p^2}{c_L^2} - 1 \right) \quad (33)$$

$$(\beta^2 + \gamma^2) = - \left(2\xi^2 + \frac{1}{l^2} \right) \quad (34)$$

$$\beta^2 \gamma^2 = \frac{\xi^2}{l^2} \left(1 + \xi^2 l^2 - \frac{c_p^2}{c_T^2} \right) \quad (35)$$

برخلاف روابط و نتایج ارائه شده توسط شارما [24]، در این تحقیق برای سادگی و جلوگیری از خطاهای محاسباتی و همچنین قابلیت تعمیم نتایج برای ورق‌های با ضخامت‌های مختلف و طول موج انتشاری گوناگون، تلاش شد که معادلات به صورت بی‌بعد ارائه شوند، بدین منظور ابتدا پارامترهای بی‌بعد موردنظر مطابق رابطه (36) تعریف می‌گردد.

$$\bar{\alpha} = \frac{h}{l}, \bar{c}_p = \frac{c_p}{c_T}, \bar{c}_L = \frac{c_L}{c_T} \quad (36)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega h}{c_T}, \bar{\xi} = \xi h = \frac{\omega}{c_p h}, \bar{\alpha} = \alpha h, \bar{\beta} = \beta h, \bar{\gamma} = \gamma h$$

در روابط فوق ω برابر با فرکانس زاویه‌ای امواج است. معادلات (37) تا (39) در صورتی پاسخ غیر بدیهی دارند که دترمینان

حال برای به دست آوردن روابط مربوط به دیسپرز امواج لمب در یک ورق بی‌نهایت همگن و همسانگرد، هندسه مسئله به صورت "شکل 1" در نظر گرفته شده است. مرکز مختصات کارتزین در میانه ضخامت ورق در نظر گرفته شده است به طوری که صفحه $x-y$ صفحه میانی ورق بوده و محور z عمود بر آن باشد. سطوح $z = \pm h$ سطوح بدون نیرو و تنش هستند و فرض می‌شود که انتشار امواج در جهت x است.

یکی از روش‌های حل معادله حرکت (رابطه 16) استفاده از توابع پتانسیل برای تجزیه میدان جابجایی u به دو میدان است که یکی از آن‌ها مربوط به امواج طولی و دیگری مربوط به امواج عرضی است. با توجه به اینکه هر میدان برداری را می‌توان به دو بخش چرخشی و اتساعی تجزیه کرد، بنابراین بردار جابجایی $\vec{u} = (u_1, 0, u_3)$ به صورت رابطه (17) بیان می‌شود.

$$\vec{u} = \nabla \phi + \nabla \times \vec{\psi}, \quad \nabla \cdot \vec{\psi} = 0 \quad (17)$$

که ϕ ، تابع اسکالر پتانسیل سرعت امواج طولی و $\vec{\psi} = (0, \psi, 0)$ تابع پتانسیل برداری سرعت امواج عرضی در جامدات می‌باشند.

از آنجاکه فرض می‌شود که امواج لمب در صفحه $x-z$ انتشار می‌یابند، بنابراین رفتار امواج مستقل از جهت y بوده و داریم $u_2 = 0, \partial/\partial y = 0$. با استفاده از تجزیه میدان جابجایی هلمهولتز، جابجایی در راستاهای x و z مطابق روابط (18) و (19) به دست می‌آید [9].

$$u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (18)$$

$$u_3 = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (19)$$

با جایگذاری روابط (18) و (19) در رابطه‌های (13) و (14)، تنش‌های حاصل از نیروها و کوپل روی سطح ورق مطابق روابط (20) تا (22) به دست می‌آیند.

$$\sigma_{zx} = \mu \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} \right) + \eta \left(\frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 \psi}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2 \partial z^2} \right) \quad (20)$$

$$\sigma_{zz} = \mu \left(\frac{c_L^2}{c_T^2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) - 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right) \quad (21)$$

$$\Gamma_{zy} = -2\eta \left(\frac{\partial^3 \psi}{\partial z^3} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial z \partial x^2} \right) \quad (22)$$

که در آن c_L و c_T بیانگر سرعت انتشار امواج طولی و عرضی در ماده همسانگرد بوده که طبق روابط (23) و (24) با استفاده از ثوابت لامه و یا

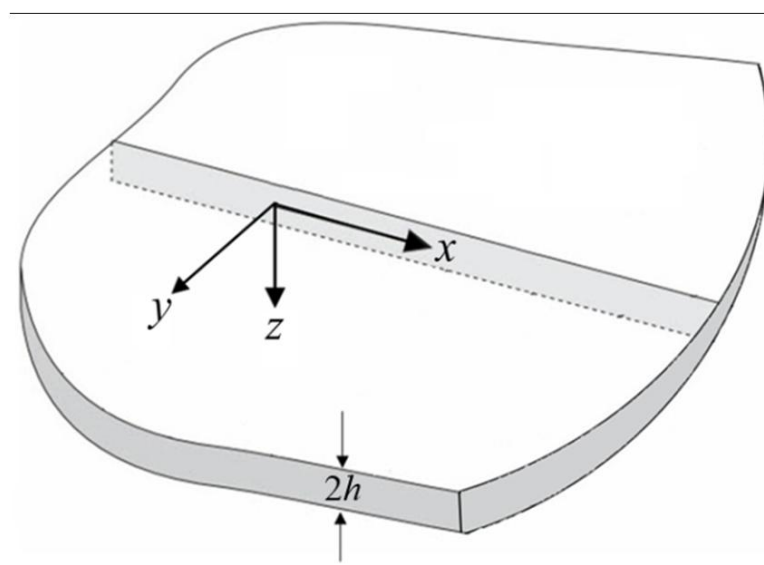


Fig. 1 Geometry of an infinite micro-plate

شکل 1 هندسه میکرو ورق بی‌نهایت

دست می‌آیند.

$$p^2 = \left(\frac{\omega^2}{c_L}\right)^2 - \xi^2 \quad (43)$$

$$q^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - \xi^2 \quad (44)$$

در ابتدا صحت بی‌بعدسازی معادلات (37-39) بررسی شد که نتایج آن در جدول 1 آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ورق‌های با ضخامت و طول مشخصه گوناگون، در نسبت‌های یکسان $2h/l$ و $2h/\lambda$ ، نتایج یکسانی در مقایسه با معادلات با بعد [24] به دست می‌آید.

در شکل‌های 2 تا 5 نتایج حاصل از حل عددی معادلات دیسپرز امواج لمب به ترتیب برای سرعت فاز مود اول متقارن S_0 و پادمقارن A_0 و سرعت گروه مود اول پادمقارن A_0 و متقارن S_0 با استفاده از تئوری‌های تنش کوبلی سازگار و کلاسیک الاستیسیته ترسیم شده است. در این منحنی‌ها محور افقی، نسبت بی‌بعد ضخامت به طول موج $2h/\lambda$ می‌باشد.

جدول 1 مقایسه سرعت فاز (c_p) به دست آمده از معادلات با بعد [24] و بی‌بعد حاضر برحسب (m/s) برای حالت $2h/l = 2, 2h/\lambda = 0.5$

نتایج حاضر c_p	c_p [24]	l (μm)	λ (μm)	$2h$ (μm)
10480	10480	1	4	2
10480	10480	2	8	4
10480	10480	3	12	6

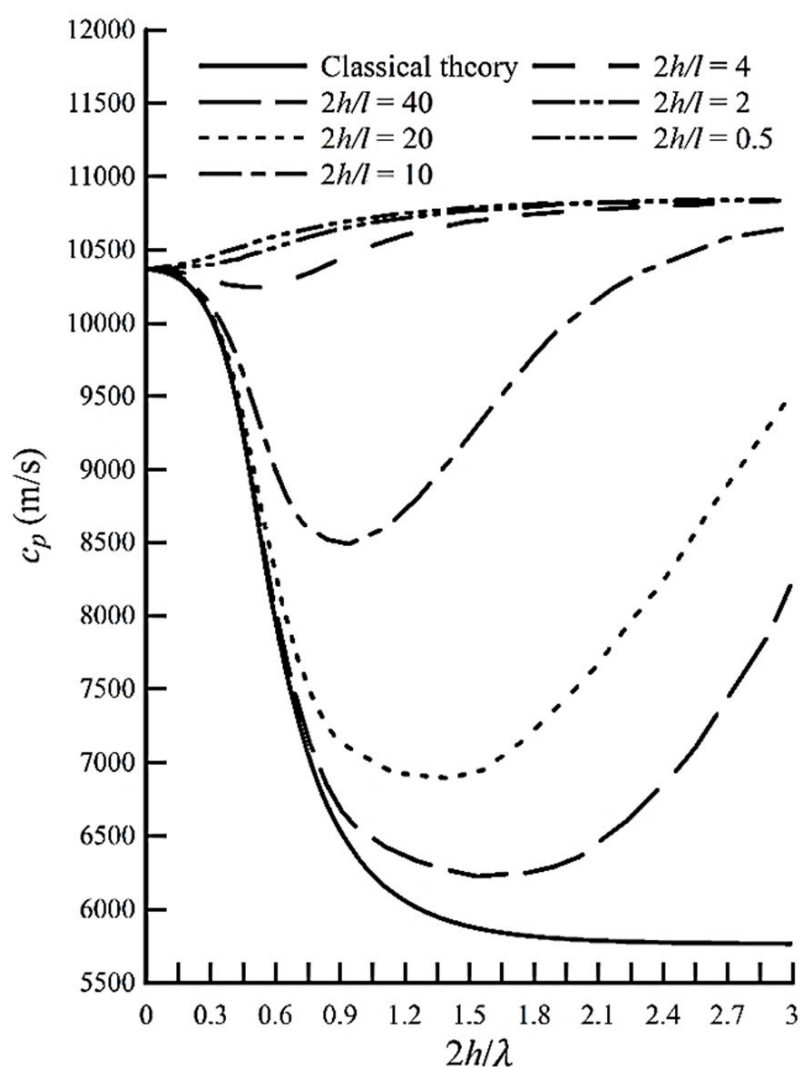


Fig. 2 Dispersion curve of phase velocity for first symmetric mode in different thickness to characteristic length ratios

شکل 2 نمودار دیسپرز سرعت فاز برای مود اول متقارن در نسبت‌های مختلف ضخامت به پارامتر طول مشخصه

ماتریس ضرایب A_1 تا A_6 برابر صفر باشد. حال برای به دست آوردن مودهای متقارن و پادمقارن معادله مشخصه انتشار امواج لمب، روابط (31) و (32) مربوط به مؤلفه‌های جابجایی در نظر گرفته می‌شوند. حرکت موج در صورتی متقارن (نسبت به صفحه میانی ورق)، خواهد بود که مؤلفه حرکت در جهت x یعنی u_1 تنها شامل کسینوس بوده و در صورتی پادمقارن خواهد بود که u_1 تنها شامل سینوس باشد. برعکس این امر برای مؤلفه حرکت در راستای z یعنی u_3 وجود دارد [9]؛ بنابراین برای یافتن معادله مشخصه انتشار امواج لمب با استفاده از ماتریس ضرایب a_{ij} مطابق رابطه (40) برای مودهای پادمقارن دترمینان ضرایب A_2, A_3, A_5 و برای مودهای متقارن دترمینان ضرایب A_1, A_4, A_6 برابر صفر قرار داده می‌شوند و معادله به دست آمده برای هر مود با کمک روش‌های عددی حل شده و نمودارهای دیسپرز سرعت فاز امواج لمب در میکرو ورق آلومینیوم نیتريد به دست می‌آیند.

$$[a_{ij}]_{6 \times 6} [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6]^T = 0 \quad (40)$$

مقادیر مربوط به a_{ij} با توجه به روابط (37) تا (39) به راحتی قابل به دست آوردن هستند. همچنین نمودار دیسپرز سرعت گروه را می‌توان با استفاده از مقادیر سرعت فاز و از طریق رابطه (41) استخراج نمود [9]:

$$c_g = c_p^2 \left[c_p - \omega \frac{dc_p}{d\omega} \right]^{-1} \quad (41)$$

4- نتایج عددی و بحث

در این تحقیق برای مدل‌سازی انتشار امواج لمب در یک ورق بی‌نهایت از خواص ماده پیزوالکتریک آلومینیوم نیتريد با جهت‌گیری در راستای c استفاده شده است. به دلیل تقارن شش‌وجهی و ساختار 6mm آلومینیوم نیتريد، انتشار امواج لمب در صفحه $x-z$ ورقی با این جنس همانند ماده همسانگرد خواهد بود [27]. با استفاده از خواص به دست آمده توسط مک نیل [28] برای آلومینیوم نیتريد و با استفاده از تقریب شبه استاتیک برای مواد پیزوالکتریک که در آن ثوابت ماتریس سفتی توسط اضافه کردن مقادیری برحسب ثوابت پیزوالکتریک و دی‌الکتریک ماده افزایش می‌یابند، ماتریس سفتی به صورت پیزوالکتریک سخت شده برای آلومینیوم نیتريد به دست می‌آید، هرچند که تأثیر این ثوابت پیزوالکتریک و دی‌الکتریک بر روی مقادیر ماتریس سختی بسیار ناچیز است و تغییر چندانی در مقادیر سرعت‌های طولی و عرضی ایجاد نمی‌کنند [26]. به کمک این ماتریس و استفاده از روابط (23) و (24) سرعت‌های طولی و عرضی انتشار موج در ورق برابر با $c_L = 11225$ m/s و $c_T = 6220$ m/s به دست می‌آیند. پس از مشخص شدن سرعت‌های طولی و عرضی، معادلات به دست آمده برای مودهای متقارن و پادمقارن (روابط 37-39) در شش حالت مختلف از نسبت ضخامت ورق به پارامتر طول مشخصه آن حل شده و منحنی‌های دیسپرز برای مود متقارن اول S_0 و مود پادمقارن اول A_0 ترسیم شده است؛ سپس این نتایج با منحنی‌های دیسپرز به دست آمده از تئوری کلاسیک الاستیسیته مقایسه می‌شوند. برای رسم نمودارهای دیسپرز امواج لمب با استفاده از تئوری کلاسیک الاستیسیته از رابطه (42) معروف به رابطه فرکانسی ریلی-لمب استفاده می‌گردد [9]:

$$\frac{\text{tg } qh}{\text{tg } ph} = - \left[\frac{4\xi^2 pq}{(q^2 - \xi^2)} \right]^{\pm 1} \quad (42)$$

در رابطه (42) علامت + برای مودهای متقارن و علامت - برای مودهای پادمقارن است که در آن p و q مطابق روابط (43) و (44) به

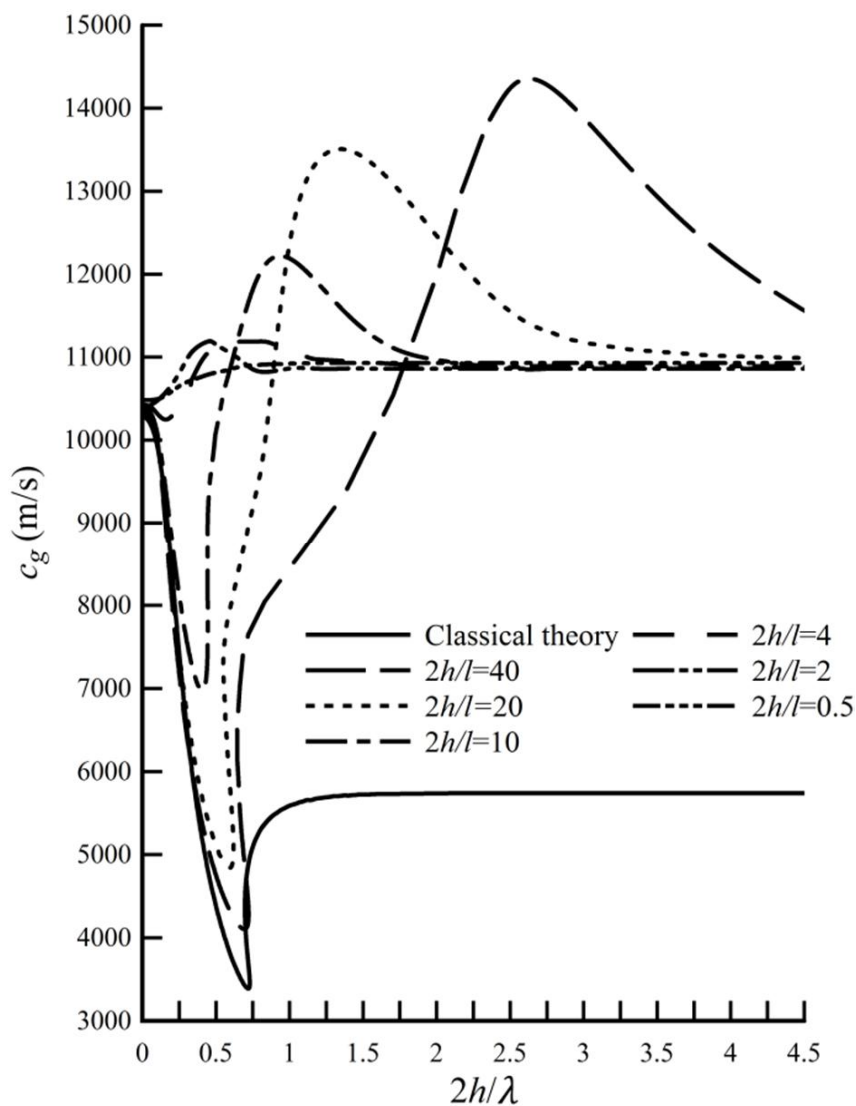


Fig. 5 Dispersion curve of group velocity for first symmetric mode in different thickness to characteristic length ratios

شکل 5 نمودار دیسپرز سرعت گروه برای مود اول متقارن در نسبت‌های مختلف ضخامت به پارامتر طول مشخصه

به دلیل سرعت بالای انتشار مود اول متقارن امواج لمب در ورق‌ها در نسبت‌های پایین $2h/\lambda$ ، این مود بیشترین استفاده را در محرک‌های صوتی سطحی دارد، از این رو نمودار دیسپرز این مود از اهمیت بالاتری نسبت به سایر مودها برخوردار است. همان‌طور که در "شکل 2" قابل مشاهده است با کاهش نسبت $2h/l$ نمودار دیسپرز از حالت کلاسیک فاصله گرفته و به سمت سرعت‌های فاز بالاتر منحرف می‌گردد به گونه‌ای که با افزایش نسبت $2h/\lambda$ نرخ افزایش این اختلاف نیز بیشتر می‌شود. نمودارهای رسم شده برای نسبت‌های متفاوت $2h/l$ تا یک نسبت معین همگی دارای یک نقطه مینیمم هستند که در یک نسبت $2h/\lambda$ خاص رخ می‌دهد و پس از این نقطه نمودار به صورت صعودی درمی‌آید و به سمت سرعتی در حدود سرعت موج طولی c_L که از این به بعد به آن سرعت نهایی گفته می‌شود همگرا می‌شود. در محاسبات عددی انجام شده برای ماده آلومینیوم نیتريد این سرعت برابر 10835 m/s به دست آمد. همچنین از "شکل 2" می‌توان دریافت که با کاهش هرچه بیشتر نسبت $2h/l$ ، مینیمم‌ها به سمت نسبت‌های کمتر $2h/\lambda$ حرکت می‌کنند و هم‌زمان از میزان تقعر نمودارها کاسته می‌شود تا جایی که از یک نسبت $2h/l$ خاص به بعد نمودارها صرفاً به صورت صعودی بوده و فاقد مینیمم می‌باشند. برای ماده آلومینیوم نیتريد این نسبت خاص برابر با $2h/l = 2.3$ به دست آمد. لازم به ذکر است که در شکل‌های 2 و 5 نسبت‌های ضخامت به طول موج بیشتر از $2h/\lambda = 1$ صرفاً برای نمایش نحوه تغییر نمودارها و تقعر آن‌ها ترسیم شده و در عمل انتشار امواج لمب در این شرایط امکان‌پذیر نمی‌باشد. در جدول 2 نتایج به دست آمده برای مقادیر سرعت فاز مود S_0 در $2h/\lambda = 0.166$ بر اساس آزمایش تجربی یانچو [8]

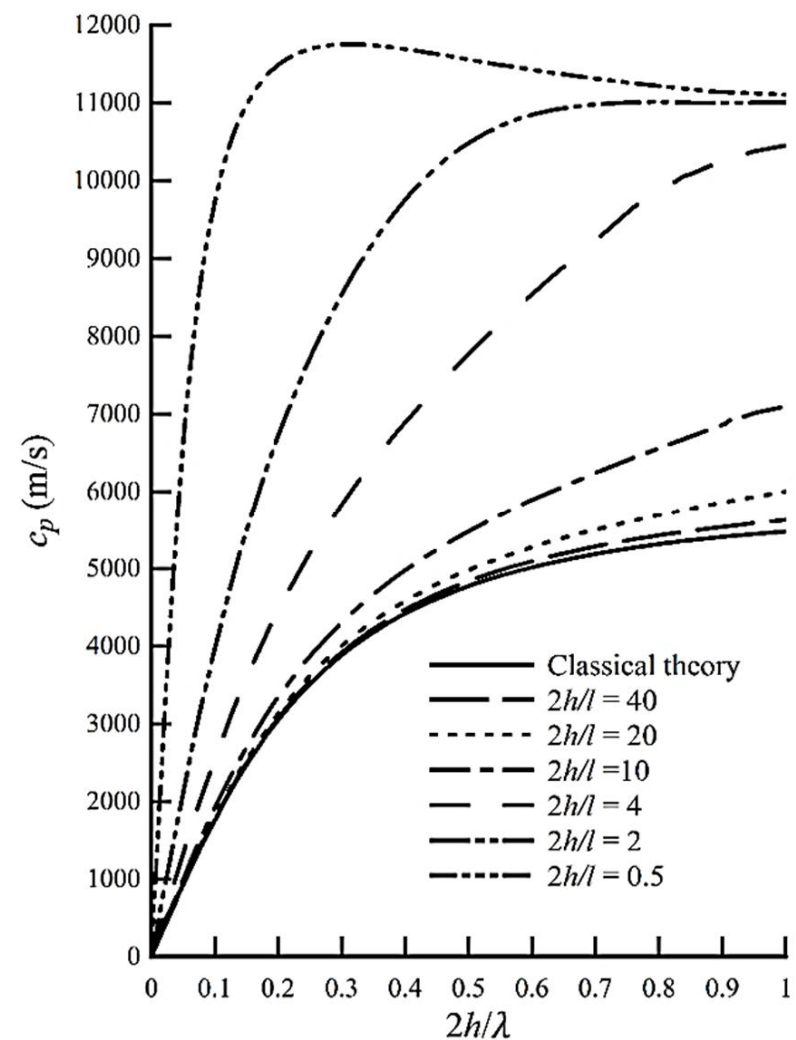


Fig. 3 Dispersion curve of phase velocity for first anti-symmetric mode in different thickness to characteristic length ratios

شکل 3 نمودار دیسپرز سرعت فاز برای مود اول پادمقارن در نسبت‌های مختلف ضخامت به پارامتر طول مشخصه

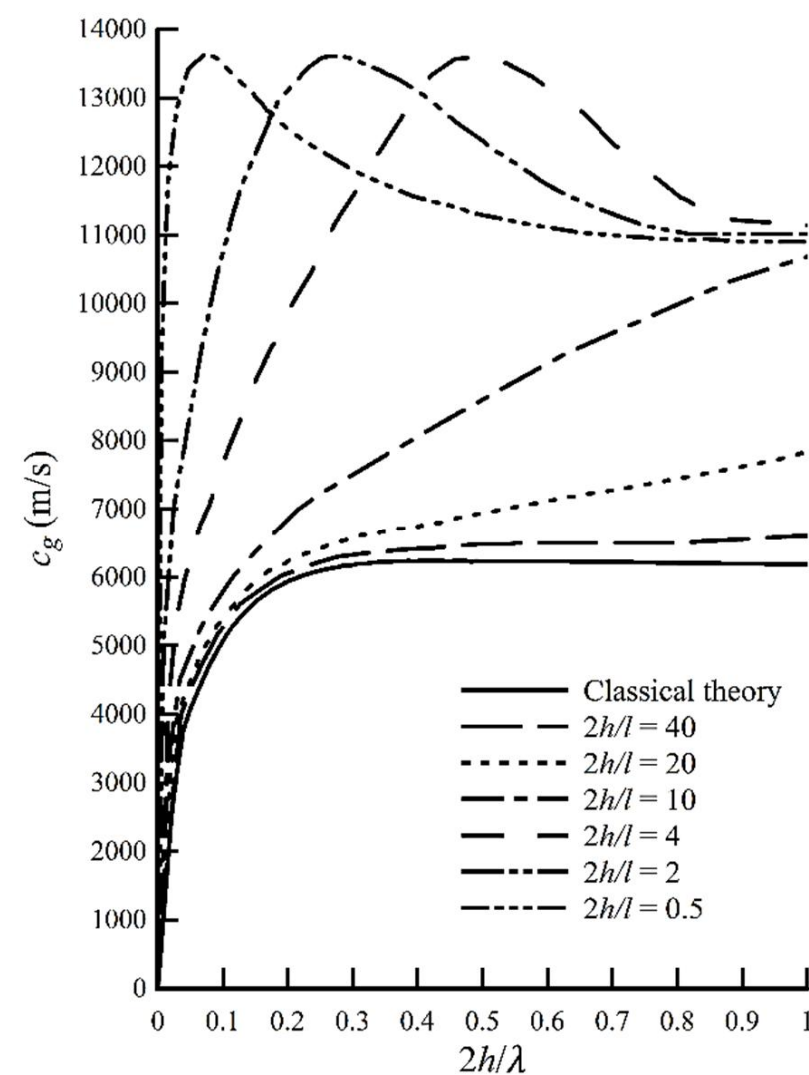


Fig. 4 Dispersion curve of group velocity for first anti-symmetric mode in different thickness to characteristic length ratios

شکل 4 نمودار دیسپرز سرعت گروه برای مود اول پادمقارن در نسبت‌های مختلف ضخامت به پارامتر طول مشخصه

سرعت انتشار امواج با افزایش سختی ماده افزایش می‌یابد، پس می‌توان نتیجه گرفت که تئوری تنش کوبلی سازگار با رابطه‌ای مستقیم بسته به اندازه پارامتر طول مشخصه سختی بیشتری را برای ماده پیش‌بینی می‌کند.

1-4- تعیین پارامتر طول مشخصه

یکی از مهم‌ترین و در عین حال مشکل‌ترین مسائل در استفاده از انواع تئوری‌های تنش کوبلی تعیین پارامتر طول مشخصه است. تحقیقات زیادی در زمینه‌ی اندازه‌گیری این پارامتر به‌صورت تجربی با روش‌هایی مانند آزمون میکرو خمش، میکرو پیچش و میکرو ضربه با استفاده از تئوری‌هایی مانند گرادیان کرنش [31,30] و تئوری میکروپولار [14] انجام شده است که در همه آن‌ها در نهایت این نتیجه حاصل شده است که در مواد مختلف خواص به‌دست‌آمده در ابعاد میکرو سخت‌تر از خواص پیش‌بینی شده توسط تئوری‌های کلاسیک می‌باشند. بنا بر مطالعات انجام‌شده تاکنون، نتایج تجربی مبتنی بر تئوری تنش کوبلی سازگار برای تعیین پارامتر طول مشخصه با روش‌های نام برده شده ارائه نگردیده است، از این‌رو در این قسمت ضمن مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای سرعت فاز انتشار امواج لمب با نتایج تجربی ارائه‌شده توسط یانچو، روشی برای تعیین پارامتر طول مشخصه در ورق بر اساس نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد شده است.

طبق نتایج عملی به‌دست‌آمده توسط یانچو [8] برای یک ورق آلومینیوم نیتريد با ضخامت $2 \mu\text{m}$ و نسبت $2h/\lambda = 0.166$ ، سرعت فاز مود اول متقارن S_0 برابر با 10485 m/s به دست آمد. همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود با کاهش نسبت $2h/\lambda$ مقادیر سرعت به‌دست‌آمده از تئوری تنش کوبلی به مقدار حاصل از آزمایش یانچو نزدیک‌تر می‌شوند به‌طوری‌که در مقدار $2h/\lambda = 0.5$ کمترین اختلاف مشاهده می‌گردد. واضح است که هرچه مقدار $2h/\lambda$ به صفر نزدیک شود جواب به مقدار عملی نزدیک‌تر خواهد شد؛ اما مشخصاً پارامتر طول مشخصه را نمی‌توان بر این اساس تعیین نمود؛ زیرا با هرچه کمتر شدن نسبت $2h/\lambda$ ، پارامتر طول مشخصه l تا حدی نامعین و غیرقابل قبول بزرگ‌تر خواهد شد؛ بنابراین نیاز است تا اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج در میکرو ورق در فرکانس‌های متفاوتی انجام شود تا بتوان با قطعیت بیشتری اندازه پارامتر طول مشخصه را معین نمود.

مزیت این روش نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری پارامتر طول مشخصه مانند آزمون ضربه میکرو و یا آزمون خمش میکرو که پارامتر طول مشخصه را تنها به‌صورت محلی محاسبه می‌کنند این است که در این روش پارامتر طول مشخصه به‌صورت میانگینی از اندازه این پارامتر در کل ساختار به دست می‌آید. بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده تاکنون هیچ نتیجه تجربی در زمینه‌ی اندازه‌گیری پارامتر طول مشخصه در ماده آلومینیوم نیتريد بر اساس تئوری تنش کوبلی ارائه نشده است. با توجه به اینکه نتایج

با نتیجه حاصل از تئوری کلاسیک و نتایج حاصل از تئوری تنش کوبلی سازگار برای نسبت‌های مختلف ضخامت به پارامتر طول مشخصه $2h/l$ با یکدیگر مقایسه شده است.

"شکل 3" نمایانگر نمودار دیسپرز مود پادمتقارن اول A_0 در ورق آلومینیوم نیتريد برای نسبت‌های مختلف $2h/l$ می‌باشد. همان‌طور که از این شکل برمی‌آید شرایطی مشابه نمودارهای مود S_0 بر نمودارهای مود A_0 نیز حاکم است با این تفاوت که در این مود نقطه مینیمم وجود ندارد و برای نسبت‌های $2h/l$ نزدیک به 2 و پایین‌تر مقادیر سرعت فاز با سرعت بیشتری از سرعت‌های کلاسیک دور شده و به مقدار سرعت نهایی که در این مود هم برابر 10835 m/s به دست آمده است، همگرا می‌گردند.

نمودار دیسپرز سرعت گروه به‌دست‌آمده از رابطه (41) برای مود اول پادمتقارن و متقارن در نسبت‌های مختلف $2h/l$ در شکل‌های 4 و 5 ترسیم شده است. در "شکل 4" با کاهش نسبت $2h/l$ به مقادیر نزدیک به 2 مشاهده می‌شود که در مقادیر پایین نسبت $2h/\lambda$ نمودارها پس از یک صعود شدید تا مقادیر بالاتر از سرعت c_L ، کاهش یافته و به سمت سرعت نهایی 10835 m/s همگرا می‌شوند. همین همگرا شدن برای نسبت‌های بالای $2h/l$ نیز رخ می‌دهد با این تفاوت که در این مقادیر از صعود شدید اولیه خبری نیست و نمودارها مانند نمودار حاصل از تئوری کلاسیک با شیب ملایمی به سرعت نهایی همگرا می‌شوند.

در "شکل 5" نمودارها رفتاری مانند نمودارهای رسم شده برای سرعت فاز مود اول متقارن در "شکل 2" از خود نشان می‌دهند، با این تفاوت که تا مقادیر $2h/l$ برابر با 4 نمودارها پس از رسیدن به نقطه مینیمم خود صعودی شده و پس از رسیدن به یک نقطه ماکزیمم به سمت سرعت نهایی 10835 m/s همگرا می‌شوند؛ اما در نسبت‌های $2h/l$ کوچک‌تر از 4 دیده می‌شود که نمودارها فاقد نقطه مینیمم بوده و پس از یک صعود اندک به مقدار سرعت نهایی همگرا می‌گردند.

در رابطه با علت همگرا شدن نمودارهای فوق به یک سرعت خاص با توجه به اینکه در تئوری کلاسیک سرعت انتشار امواج لمب با افزایش فرکانس و یا ضخامت ورق به سرعت انتشار امواج ریلی همگرا می‌گردد [9] و همچنین بر اساس پژوهش انجام‌شده توسط اتوسن و همکاران [29] که در آن بیان می‌شود در تئوری تنش کوبلی، برخلاف تئوری کلاسیک سرعت موج ریلی دیسپرسیو بوده و با افزایش فرکانس و همچنین پارامتر طول مشخصه افزایش می‌یابد؛ لذا سرعت نهایی به‌دست‌آمده در نتایج این پژوهش می‌تواند به دلیل همگرا شدن سرعت امواج به مقداری در حدود سرعت ریلی در فرکانس‌های بالا، بر اساس مقادیر حاصل از تئوری تنش کوبلی باشد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های 2 تا 5 می‌توان به این نتیجه کلی رسید که سرعت‌های به‌دست‌آمده توسط تئوری تنش کوبلی سازگار از سرعت‌های پیش‌بینی‌شده در حالت کلاسیک بیشتر می‌باشند و از آنجا که

جدول 2 مقایسه سرعت فازهای مود S_0 به‌دست‌آمده از تئوری تنش کوبلی سازگار و تئوری کلاسیک الاستیسیته با مشاهده تجربی در $2h/\lambda = 0.166$ بر حسب (m/s)

Table 2 Comparison of mode S_0 phase velocities obtained using consistent couple stress theory and classical theory with experimental results in $2h/\lambda = 0.166$

سرعت فاز	تئوری کلاسیک	مشاهده تجربی [8]	$2h/l$						
			40	20	10	4	2	0.5	2.3*
c_p (m/s)	10287	10485	10295	10299	10310	10345	10381	10402	10370

* مقداری که پس از آن منحنی سرعت فاز مود متقارن اول S_0 صعودی بوده و فاقد مینیمم می‌باشد.

κ_{ij}	تانسور انحناء
λ	طول موج (m)
μ	ثابت لامه
ν	ثابت لامه
ξ	عدد موج (m ⁻¹)
ρ	چگالی (kgm ⁻³)
σ_{ji}	تانسور تنش نیرو
ϕ	تابع اسکالر پتانسیل سرعت امواج طولی
χ_{ij}	تانسور پیچش
$\vec{\psi}$	تابع پتانسیل برداری سرعت امواج عرضی
ω_{ij}	تانسور چرخش
ω	فرکانس زاویه‌ای (Rads ⁻¹)

7- مراجع

- [1] G. Ma, F. Han, P. You, L. Zhang, X. Yan, Experimental study of a low-g micromachined electrostatically suspended accelerometer for space applications, *Microsystem Technologies*, Vol. 21, No. 1, pp. 29-39, 2015.
- [2] A. Amar, D. Bahloul, F. Gagnon, A. Kouki, MEMS filter's design and modeling based on width-extensional mode plate resonator for wireless applications, *Microsystem Technologies*, Vol. 21, No. 7, pp. 1567-1576, 2015.
- [3] S. Gonseth, F. Rudolf, C. Eichenberger, D. Durrant, P. Airey, Miniaturized high-performance MEMS accelerometer detector, *CEAS Space Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 263-270, 2015.
- [4] M. B. Nagaraju, S. Sridaran, A. R. Lingley, J. D. Larson, B. P. Otis, R. C. Ruby, Comparison of acoustic wave pressure sensors for TPMS applications, *Proceedings of Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum (FCS) Joint Conference*, Denver: IEEE, pp. 205-208, 2015.
- [5] S. Bhattacharya, J. Jang, L. Yang, D. Akin, R. Bashir, Biomems and nanotechnology-based approaches for rapid detection of biological entities, *Journal of Rapid Methods & Automation in Microbiology*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-32, 2007.
- [6] A. Uranga, J. Verd, N. Barniol, CMOS-MEMS resonators: from devices to applications, *Microelectronic Engineering*, Vol. 132, No. 1, pp. 58-73, 2015.
- [7] V. Yantchev, I. Katardjiev, Thin film Lamb wave resonators in frequency control and sensing applications: a review, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 043001, 2013.
- [8] V. Yantchev, I. Katardjiev, Micromachined thin film plate acoustic resonators utilizing the lowest order symmetric lamb wave mode, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 54, No. 1, pp. 87-95, 2007.
- [9] J. L. Rose, *Ultrasonic waves in solid media*, pp. 77-106, Cambridge: Cambridge university press, 2004.
- [10] C. M. Lin, V. Yantchev, Y. Y. Chen, V. V. Felmetzger, A. P. Pisano, Characteristics of AlN Lamb wave resonators with various bottom electrode configurations, *Proceedings of Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Joint Conference*, San Fransisco: IEEE, pp. 1-5, 2011.
- [11] H. Lamb, On waves in an elastic plate, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character*, Vol. 93, No. 648, pp. 114-128, 1917.
- [12] E. L. Adler, Matrix methods applied to acoustic waves in multilayers, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 37, No. 6, pp. 485-490, 1990.
- [13] S. Joshi, Y. Jin, Excitation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates, *applied physics*, Vol. 69, No. 12, pp. 8018-8024, 1991.
- [14] A. W. McFarland, J. S. Colton, Role of material microstructure in plate stiffness with relevance to microcantilever sensors, *Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 1060-1067, 2005.

تجربی در مورد انتشار امواج لمب در نسبت‌های $2h/\lambda$ نزدیک به 1 وجود ندارد و برای نسبت‌های $2h/\lambda$ پایین نیز با شرایط موردنظر این پژوهش بسیار محدود است، روش مذکور برای تعیین پارامتر طول مشخصه را می‌توان در آینده با انجام آزمایش‌های بیشتر مورد بررسی قرار داد تا بتوان به‌صورت قطعی‌تری در مورد اندازه پارامتر طول مشخصه بر اساس تئوری تنش کوبلی اظهارنظر کرد.

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

تئوری تنش کوبلی سازگار این قابلیت را دارد که به کمک تنها یک پارامتر طول مشخصه تأثیر ریزساختار مواد در معادلات مربوط به انتشار امواج لمب در میکرو ورق‌ها را بررسی کند. در این تحقیق با استفاده از این تئوری معادلات مشخصه بی‌بعد برای انتشار امواج لمب در مودهای متقارن و پادمقارن به دست آمده که پس از حل به کمک روش‌های عددی نمودارهای دیسپرز برای مقادیر مختلف نسبت بی‌بعد ضخامت به پارامتر طول مشخصه و با استفاده از خواص ماده آلومینیوم نیتريد رسم شده است. برخلاف پژوهش‌های پیشین بی‌بعد بودن روابط موجب می‌شود که نمودارهای به‌دست‌آمده برای انواع نسبت‌های ضخامت به طول موج و ضخامت به طول مشخصه قابل استفاده باشند. در نتایج به‌دست‌آمده مشاهده گردید که تئوری تنش کوبلی سازگار بر اساس اندازه‌ی پارامتر طول مشخصه نسبت به تئوری کلاسیک سختی بیشتری برای ماده پیش‌بینی می‌کند، به‌گونه‌ای که در یک ورق با ضخامت ثابت با افزایش نسبت ضخامت به طول مشخصه نتایج به تئوری کلاسیک نزدیک شده و با کاهش این مقدار، سرعت انتشار امواج در ورق به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، این افزایش به‌نحوی است که در مقادیر بالای نسبت ضخامت ورق به طول موج انتشاری، سرعت انتشار امواج به مقداری در حدود سرعت موج طولی در تئوری کلاسیک همگرا می‌گردد؛ همچنین به‌وسیله اندازه‌گیری تجربی سرعت‌های فاز یا گروه امواج لمب در فرکانس‌های مختلف و مقایسه با منحنی‌های دیسپرز رسم شده، روشی برای یافتن پارامتر طول مشخصه در تئوری تنش کوبلی سازگار با استفاده از داده‌های تجربی ارائه گردید که می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه آزمایش‌ها در تعیین دقیق‌تر خواص میکرو ورق‌ها با استفاده از انتشار امواج لمب مؤثر باشد.

6- فهرست علائم

c_g	سرعت گروه (m/s)
c_p	سرعت فاز (m/s)
c_L	سرعت انتشار موج طولی در ماده همسانگرد (m/s)
c_T	سرعت انتشار موج عرضی در ماده همسانگرد (m/s)
C_{ij}	تانسور سفتی ماده همسانگرد
e_{ij}	تانسور کرنش
F	برآیند نیروهای حجمی (N)
h	نصف ضخامت ورق (m)
l	اندازه طول مشخصه (m)

علائم یونانی

Γ_{ji}	تانسور تنش کوبلی
η	ثابت ماده همسانگرد در تئوری تنش کوبلی

- stress model, *Meccanica*, Vol. 49, No. 5, pp. 1083-1090, 2014.
- [25] A. Goodarzi, H. Mohammadi Shodja, B. Hashemian, The effect of couple-stresses on the elastodynamic field of a diffracted wave by an embedded nano-cavity in an infinite medium, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 1-9, 2015. (in Persian فارسی)
- [26] B. A. Auld, *Acoustic fields and waves in solids*, Vol. 1, pp. 298-305, New York: Wiley, 1973.
- [27] F. D. Pietrantonio, M. Benetti, D. Cannata, R. Beccherelli, E. Verona, Guided lamb wave electroacoustic devices on micromachined AlN/Al plates, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 57, No. 5, pp. 1175-1182, 2010.
- [28] L. E. McNeil, M. Grimsditch, R. H. French, Vibrational spectroscopy of aluminum nitride, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 76, No. 5, pp. 1132-1136, 1993.
- [29] N. S. Ottosen, M. Ristinmaa, C. Ljung, Rayleigh waves obtained by the indeterminate couple-stress theory, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 19, No. 6, pp. 929-947, 2000.
- [30] J. Gomez, C. Basaran, Determination of strain gradient plasticity length scale for microelectronics solder alloys, *Journal of electronic packaging*, Vol. 129, No. 2, pp. 120-128, 2007.
- [31] M. Zhao, W. S. Slaughter, M. Li, S. X. Mao, Material length scale controlled nanoindentation size effects due to strain gradient plasticity, *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 15, pp. 4461-4469, 2003.
- [15] W. Voigt, *Theoretical studies in the elastic behavior of crystals*, pp. 3-52, Göttingen: Gesellschaft der Wissenschaften, 1892. (in German)
- [16] E. Cosserat, F. Cosserat, *Theory of Deformable Bodies*, pp. 953-1173, Paris: Hermann et Fils, 1909. (in French)
- [17] R. Mindlin, H. Tiersten, Effects of couple-stresses in linear elasticity, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, Vol. 11, No. 1, pp. 415-448, 1962.
- [18] W. T. Koiter, Couple-stresses in the theory of elasticity, *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, Vol. 67, No. 1, pp. 17-44, 1964.
- [19] F. Yang, A. Chong, D. Lam, P. Tong, Couple stress based strain gradient theory for elasticity, *Solids and Structures*, Vol. 39, No. 10, pp. 2731-2743, 2002.
- [20] A. C. Eringen, *Theory of micropolar elasticity*, pp. 621-729, New York: Academic Press, 1968.
- [21] R. D. Mindlin, Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity, *Solids and Structures*, Vol. 1, No. 4, pp. 417-438, 1965.
- [22] R. D. Mindlin, N. N. Eshel, On first strain-gradient theories in linear elasticity, *Solids and Structures*, Vol. 4, No. 1, pp. 109-124, 1968.
- [23] A. R. Hadjesfandiari, G. F. Dargush, Couple stress theory for solids, *Solids and Structures*, Vol. 48, No. 18, pp. 2496-2510, 2011.
- [24] V. Sharma, S. Kumar, Velocity dispersion in an elastic plate with microstructure: effects of characteristic length in a couple