



بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک  
دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۲

21<sup>st</sup> Annual International Conference on Mechanical Engineering  
Faculty of Mechanical Engineering K.N.Toosi University of Technology  
7-9 May 2013



گواهی ارائه مقاله

پدیده کواچی می شود مقاله

بررسی پدیده فلاتر و عوامل موثر بر آن برای یک بال به همراه مخزن

نخارش:

بهروز حسینی، سعید ایرانی، سید محمد موسوی ثانی، حسین گل پرور

در بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک که در تاریخ ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۲ به میزبانی دانشگاه

صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و با همکاری گروه پنا بر گزار گردید، ارائه شده است.

دکتر سید علی اکبر موسویان

دبیر کمیته علمی



دکتر علی غفاری

دبیر هیئت



ISME2013-965

## بررسی عددی پدیده فلاتر و عوامل موثر بر آن برای یک بال به همراه مخزن

بهروز حسینی<sup>۱</sup>، سعید ایرانی<sup>۲</sup>، سید محمد موسوی ثانی<sup>۳</sup>، حسین گل‌پرور<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، b\_hassani@um.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، irani@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، m.mousavi.sani@gmail.com

<sup>۴</sup> دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، golparvar80@yahoo.com

### چکیده

در این مقاله ناپایداری آیروالاستیک یک بال نازک فولادی که یک مخزن خارجی به آن متصل است با استفاده از روش عددی بررسی شده است. مدل آیروالاستیک مربوطه با استفاده از نرم‌افزار FLT Analysis بصورت صفحه با اعمال شرایط مرزی تکیه‌گاهی گیردار در ریشه بال و همچنین اتصال مخزن استوانه‌ای شکل به زیر بال طراحی شده است. فاصله مخزن تا لبه گیردار در حالت‌های مختلف متفاوت می‌باشد. مدل آیروالاستیک ساخته شده در نرم‌افزار ناسترن تحلیل فلاتر شده و سرعت فلاتر آن محاسبه شده است و اثرات تغییر فاصله مخزن تا لبه گیردار بر ناپایداری دینامیکی بال بررسی شده است. همچنین پارامترهای مختلف موثر در سرعت ناپایداری مانند ضریب منطری و ضخامت ورق بررسی شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ضریب منطری مقدار سرعت بی‌بعد فلاتر کاهش یافته و با افزایش ضخامت سرعت بی‌بعد فلاتر افزایش می‌یابد.

### واژه‌های کلیدی

آیروالاستیسیت، فلاتر، آنالیز مودال، مخزن خارجی

### مقدمه

با مراجعه به مبدا پرواز در سال ۱۹۰۳ توسط برادران رایت مشاهده می‌شود که از همان آغاز مسائل آیروالاستیسیت خود را نمایان ساخته‌اند. در روز ۸ دسامبر ۱۹۰۳ تنها ۹ روز پیش از پرواز موفق برادران رایت هواپیمای لانگلی و همکاری‌اش به دلیل مشکلات ناشی از آیروالاستیسیت دچار سانحه شد و موفق به پرواز نگردید. اولین مطالعات بر روی مسئله فلاتر در سال ۱۹۱۶ توسط لانچستر و همکاری‌اش در جریان جنگ جهانی اول در مورد مسائل فلاتر بمب افکن هندی باگ انجام گرفته است [۱]. با گسترش سامانه‌های پرنده و تولید هواپیمای جنگی مسائل مهمی فرا روی پژوهشگران و طراحان قرار گرفته است و یکی از مهمترین جنبه‌های این پژوهش‌ها بدست آوردن سرعت فلاتر است. یکی از مواردی که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته تحلیل آیروالاستیک بال به همراه مخزن است. در واقع اثر اتصال یک مخزن خارجی به بال بر روی سرعت فلاتر مورد مطالعه قرار گرفته است. عمده تحلیل‌ها در بررسی ناپایداری آیروالاستیک بال با مخرن بر روی بال هواپیما اف ۱۶ انجام گرفته است از جمله افرادی که در این زمینه کار کرد داوزون بود

وی در سال ۲۰۰۳ با در نظر گرفتن هواپیما بصورت کامل مرز ناپایداری آنرا در نرم افزار ناسترن بررسی کرد [۲]. بنانی در سال ۲۰۰۵ فلاتر بال اف ۱۶ را با در نظر گرفتن مخزن با نرم افزار ناسترن بررسی کرد و با نتایج عددی از روش  $\mu$  مقایسه نمود. وی حاشیه اطمینان مناسب برای سیستم مقاوم برای مرز فلاتر را محاسبه کرد [۳]. تانگ و داوول در سال ۲۰۰۶ یک تحلیل تئوری و تجربی از ناپایداری آیروالاستیک یک بال دلتا را ارائه دادند آنها در راستای تکمیل کار خود با اضافه کردن مخزن به انتهای بال ضمن بررسی اثرات قرارگیری مخرن و محل نصب آن نوسانات چرخه محدود آن را نیز مطالعه کردند [۴]. ظریفیان در سال ۲۰۱۰ در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به راهنمایی حدادپور اثرات تلاطم را با در نظر گرفتن جرم و فنر شبیه‌سازی کردند و سرعت ناپایداری را برای یک بال در جریان تراکم‌ناپذیر بررسی نمودند آنها به این نتیجه رسیدند که فرکانس تلاطم بر روی سرعت فلاتر تاثیر گذاشته و می‌تواند آن را افزایش دهد [۵]. در این مقاله یک بال مستطیلی به همراه مخزن مورد تحلیل فلاتر قرار گرفته و اثرات محل قرارگیری مخزن، جرم مخزن، ضخامت ورق بال و ضریب منطری بال بر روی سرعت فلاتر بررسی شده است.

### مدل‌سازی سازه‌ای

سازه مورد بررسی یک ورق مستطیلی است که یک مخزن استوانه‌ای به زیر آن متصل شده است. اندازه عرض صفحه که همان طول ریشه بال است ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. سایر ابعاد و اندازه‌ها با توجه به بررسی پارامترهای موثر در حالت‌های مختلف، متفاوت بوده و شاهد اندازه‌های متفاوتی برای طول صفحه مستطیلی (که همان دهانه بال می‌باشد) و ضخامت صفحه در حالت‌های مختلف هستیم. جنس صفحه از فولاد می‌باشد که خواص مربوط به آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: خواص ورق فولادی

| دانسیته<br>Kg/m <sup>3</sup> | ضریب پواسون | مدول یانگ<br>GPa | ضخامت<br>mm |
|------------------------------|-------------|------------------|-------------|
| ۷۸۰۰                         | ۰/۳         | ۲۱۰              | ۱           |

شرایط مرزی به صورت گیردار در ریشه در نظر گرفته شده است. مش‌بندی سازه‌ای با استفاده از المان‌های پوسته‌ای چهار ضلعی

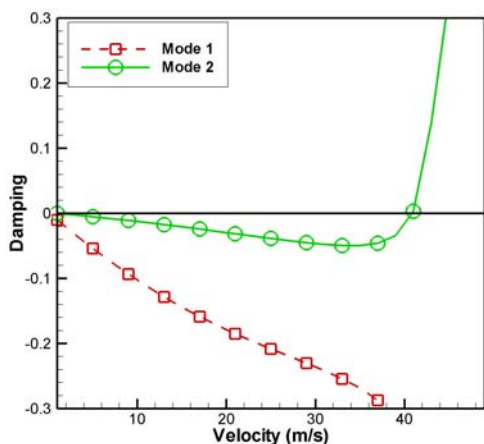
(surface theory) یا همان DLM محاسبه می‌شود. در ادامه برای کاهش مرتبه معادله ۱، این معادله بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$[A - pI]\{u_h\} \quad (2)$$

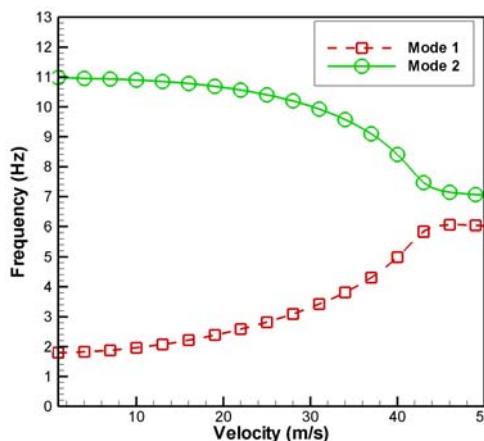
که در آن ماتریس حقیقی A بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{bmatrix} 0 & I \\ \left( k_{hh} - \frac{1}{2} \rho V^2 Q_{hh}^R \right) & \left( B_{hh} - \frac{1}{4} \rho \bar{c} V Q_{hh}^I / k \right) \\ -M_{hh} & -M_{hh} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ریشه‌های حقیقی معادله فوق نشان دهنده مقادیر استهلاک هستند که به ازای مقادیر منفی پایدار و مقادیر مثبت آن ناپایداری سیستم را به دنبال خواهد داشت. در شکل ۲ نمودار استهلاک بر حسب سرعت فلاتر برای مودهای اول و دوم در یک حالت خاص نشان داده شده است. نقطه‌ای که مقدار استهلاک صفر می‌شود مرز ناپایداری سیستم و سرعت در آن نقطه سرعت فلاتر می‌باشد. همچنین در شکل ۳ نمودار فرکانس بر حسب سرعت برای دو مود اول و دوم نشان داده شده است. مقدار سرعت در نقطه‌ای که مقادیر فرکانس در دو مود به هم همگرا می‌شوند اندازه سرعت فلاتر است.

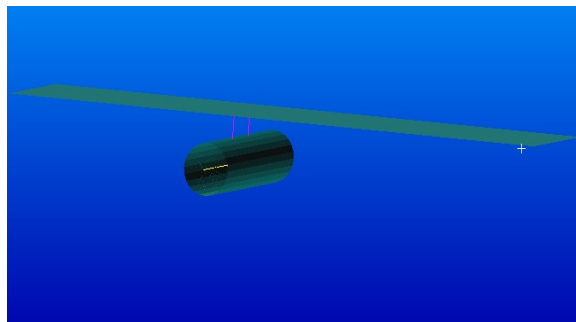


شکل ۲: نمودار استهلاک بر حسب سرعت برای مود اول و دوم



شکل ۳: نمودار فرکانس بر حسب سرعت برای مود اول و دوم

(shell/Quad4) در نرم‌افزار پترن صورت گرفته است. مخزن متصل به بال یک استوانه به شعاع ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد که بصورت افقی در فاصله ۵ سانتی‌متری زیر بال قرار دارد. با توجه به اینکه عرض ورق ۲۰ سانتی‌متر و طول مخزن ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد مخزن به گونه‌ای قرار می‌گیرد که از هر طرف به اندازه ۵ سانتی‌متر از طول مخزن بیرون بال قرار می‌گیرد (شکل ۱). مخزن با استفاده از المان‌های تیر مش‌بندی شده است. اتصال مخزن به بال با استفاده از المان‌های صلب صورت گرفته است.



شکل ۱: نحوه اتصال مخزن به بال

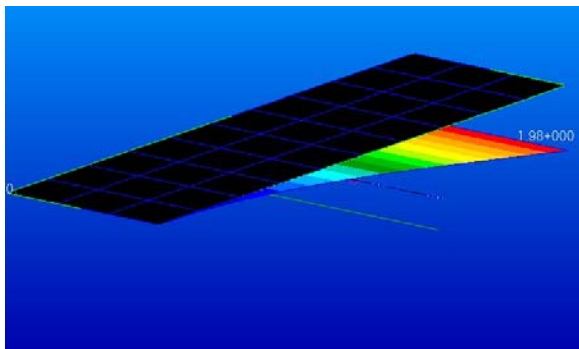
### مدل‌سازی آیرودینامیکی

مدل آیرودینامیکی ایجاد شده برای ورق شامل المان‌های آیرودینامیکی منطبق بر المان‌های سازه‌ای می‌باشد که توسط اسپیلاین‌های صفحه‌ای به هم کوپل شده‌اند. برای کوپل مدل سازه‌ای و آیرودینامیکی مخزن از اسپیلاین تیر استفاده شده است. در آنالیز نرم‌افزاری، معادلات حاکم بر مدل آیرودینامیک به روش PK مورد تحلیل قرار گرفته است. در این روش نیروهای آیرودینامیک بگونه‌ای وارد مساله می‌شوند که با تغییر سختی و پارامترهای استهلاک، فرکانسهای طبیعی سازه را تغییر داده و بسته به خواص سازه (جنس، شکل هندسی، فرکانسهای طبیعی) و خواص جریان بر روی آن (دانسیته جریان، سرعت و ماخ متناظر) پایداری استاتیکی و دینامیکی سازه بال مشخص می‌شود. حلگر این نرم‌افزار معادله حاکم بر حرکت سازه را بصورت زیر در نظر می‌گیرد:

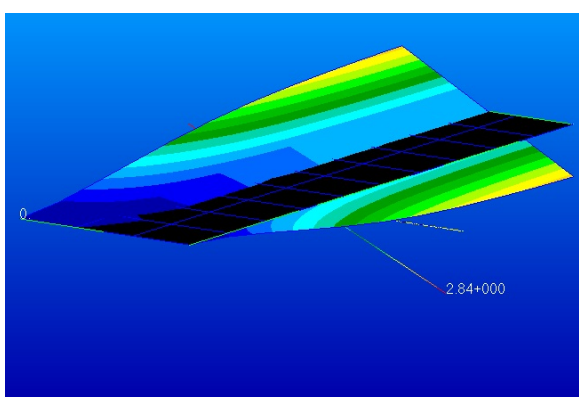
$$\begin{bmatrix} M_{hh} p^2 + \left( B_{hh} - \frac{1}{4} \rho \bar{c} V Q_{hh}^I / k \right) p \\ + \left( k_{hh} - \frac{1}{2} \rho V^2 Q_{hh}^R \right) \end{bmatrix} \{u_h\} = 0 \quad (1)$$

که در معادله فوق  $M_{hh}$  ماتریس جرم،  $p$  مقادیر ویژه،  $B_{hh}$  ماتریس استهلاک،  $\rho$  دانسیته سیال،  $\bar{c}$  طول مرجع (جهت بی‌بعد سازی)،  $V$  سرعت جریان،  $Q_{hh}^I$  ماتریس استهلاک مودال آیرودینامیکی (که تابعی از ماخ جریان و فرکانس‌های کاهیده است)،  $Q_{hh}^R$  ماتریس استهلاک آیرودینامیکی (که تابعی از ماخ جریان و فرکانس‌های کاهیده است)،  $k$  فرکانس کاهیده،  $k_{hh}$  سختی مودال سازه و  $\{u_h\}$  بردار مودال سازه است. لازم به توضیح است که ماتریس  $Q_{hh}$  به روش (Double Lattice subsonic lifting

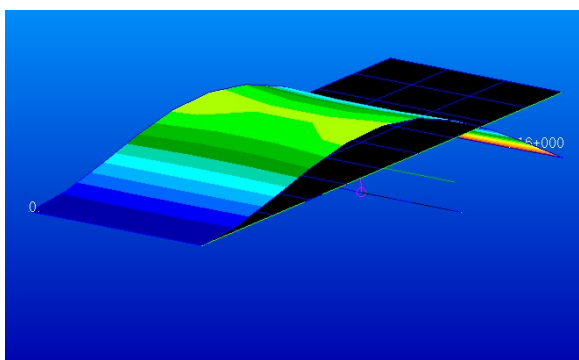
شکل مربوط به مودهای اول تا چهارم در شکل‌های ذیل قابل مشاهده است. لازم به ذکر است برای بی بعد سازی سرعت فلاتر، مقدار اولین فرکانس پیچشی مورد نیاز است.



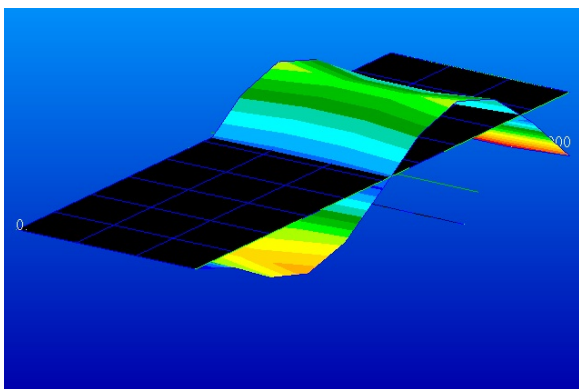
شکل ۴: مود اول



شکل ۵: مود دوم



شکل ۶: مود سوم



شکل ۷: مود چهارم

شرایط آیرودینامیکی حاکم بر مسئله در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: شرایط آیرودینامیکی

| محدوده<br>سرعت<br>m/s | ماخ | دانسسته جریان<br>kg/m <sup>3</sup> | نوع جریان    |
|-----------------------|-----|------------------------------------|--------------|
| ۲-۸۰                  | ۰/۱ | ۱/۰۰                               | تراکم ناپذیر |

در دو قسمت قبل توضیحاتی در مورد نحوه مدل‌سازی مسئله در حالت کلی ارائه شد. در این قسمت تغییراتی که در مدل‌سازی اعمال می‌شود تا اثر پارامترهای مختلف بررسی شود ذکر شده است. برای بررسی اثرات ضریب منظری، دو ضریب منظری ۲/۵ و ۳ بررسی شده است. با توجه به اینکه اندازه ریشه بال ثابت و برابر ۲۰ سانتی‌متر است یک بار دهانه بال ۵۰ و بار دیگر ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی اثرات محل قرار گیری مخزن، مخزن را در فواصل مختلف نسبت به لبه گیردار قرار داده. مقدار این فواصل نسبت‌های مختلفی از دهانه بال می‌باشد. سرعت فلاتر در هر حالت بدست آمده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین در بررسی اثر تغییر ضخامت ورق، یک بار ورق با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و بار دیگر ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر تحت آنالیز فلاتر قرار گرفته است. نهایتاً به بررسی پارامتر بی بعد  $\mu$  (نسبت جرم مخزن به جرم ورق) پرداخته و برای حالتی که ضریب منظری ورق ۲/۵ و ضخامت آن ۱ میلی‌متر است اثر تغییر این پارامتر بی بعد بررسی شده است. برای بررسی اثر تغییر پارامتر بی بعد جرم  $\mu$  بر سرعت فلاتر، عدد بی بعد جرم برای حالت اول وزن مخزن یک دهم وزن ورق می‌باشد  $(\mu=0.1)$  و حالت دوم وزن مخزن برابر وزن ورق می‌باشد  $(\mu=1)$  و حالت سوم وزن مخزن ۴ برابر وزن ورق می‌باشد  $(\mu=4)$ . سه حالت ذکر شده برای حالت‌های مختلف قرارگیری مخزن آنالیز شده است.

### تحلیل فرکانسی

با انجام آنالیز مودال به کمک نرم‌افزار نسترن، فرکانسهای طبیعی سازه به همراه شکل مودهای متناظر با آن استخراج شده است. نتایج بدست آمده حاکی از این است که مود اول سازه بال از نوع خمشی خالص بوده و محل گره‌های آن واقع بر ریشه بال است. در مود دوم رفتار بال تقریباً پیچش خالص است و لذا محل گره‌های آن در راستای طول دهانه بال گسترده شده است. شکل مود سوم نیز بیشتر از نوع خمشی است و به مقدار جزئی رفتار پیچشی نیز در آن قابل مشاهده است. گره‌های مربوط به این مود علاوه بر قسمت ریشه بال، در ناحیه میانی و بصورت مایل قرار دارند. شکل مود چهارم نیز رفتار خمشی داشته محل گره‌های آن در قسمت ریشه و در دو قسمت مجزای دیگر بصورت مایل قرار دارند. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از این تحلیل از نظر همگرایی نیز مورد بررسی قرار گرفته و با کوچکتر شدن المانها نتایج به مقادیر بدست آمده همگرا شده اند.

## اعتبار سنجی

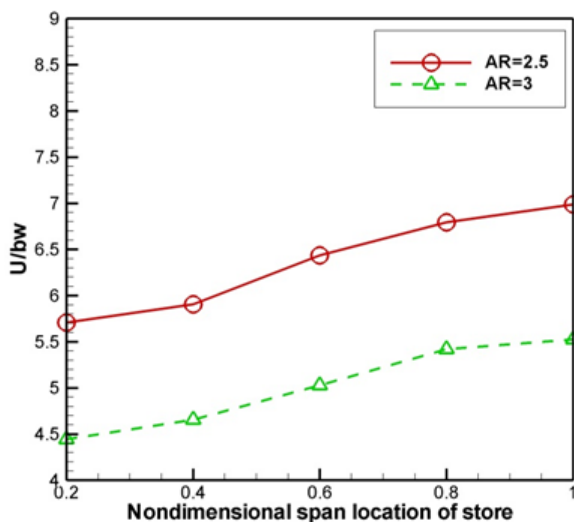
در مرجع [۴] یک بال دلتا شکل به همراه مخزن تحت آنالیزهای مختلف آیرودینامیکی قرار گرفته است. برای مقایسه نتایج، بال دلتا شکل به همراه مخزن در نرم افزار نسترن تحلیل فلاتر قرار شده و نتیجه با مقدار بدست آمده برای سرعت فلاتر در مرجع [۴] مقایسه شده است (جدول ۳). نتایج نشان می‌دهد که روش حاضر از دقت خوبی برخوردار است

جدول ۳: مقایسه نتایج

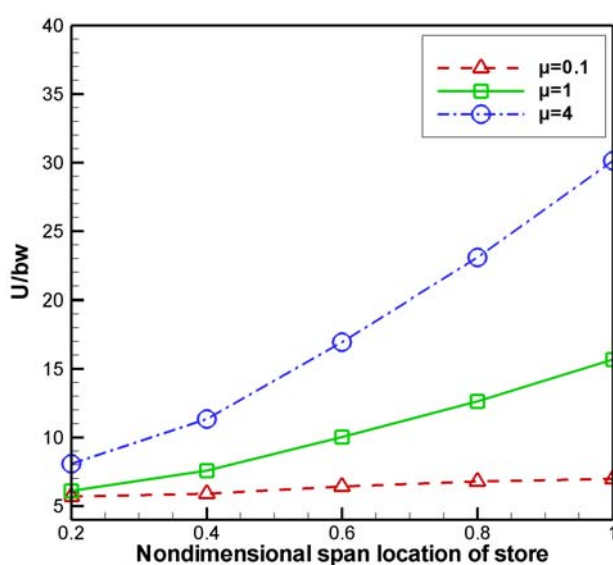
|                     | Present study | Ref [4] |
|---------------------|---------------|---------|
| Flutter speed (m/s) | ۲۴/۹          | ۲۴/۵    |

## نتایج

نتایج ذکر شده مقادیر بی‌بعد سرعت فلاتر را برحسب تغییر پارامترهای مختلف نشان می‌دهد. شایان ذکر است این مقدار بی‌بعد برابر است با سرعت فلاتر تقسیم بر حاصلضرب دهانه بال در مقدار اولین فرکانس پیچشی ( $U/b\omega$ ). با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت ورق از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر در حالیکه جرم مخزن ثابت است و برای فواصل مختلف قرارگیری مخزن سرعت بی‌بعد فلاتر افزایش می‌یابد و ناپایداری دینامیکی در سرعت بالاتری رخ می‌دهد. در شکل ۵، بررسی اثر تغییر ضریب منظری برای یک ورق به ضخامت ۱ میلی‌متر نشان می‌دهد که با افزایش ضریب منظری سرعت بی‌بعد فلاتر کاهش می‌یابد. بررسی تغییر پارامتر بی‌بعد جرم نشان می‌دهد با افزایش مقادیر  $\mu$  سرعت بی‌بعد فلاتر افزایش یافته همچنین برای مقادیر مختلف  $\mu$  با افزایش فاصله مخزن از لبه گیردار مقادیر بی‌بعد سرعت فلاتر افزایش می‌یابد. این روند افزایشی با افزایش مقدار  $\mu$  شیب بیشتری می‌گیرد (شکل ۶).



شکل ۵: اثر تغییر ضریب منظری بر سرعت بی‌بعد فلاتر



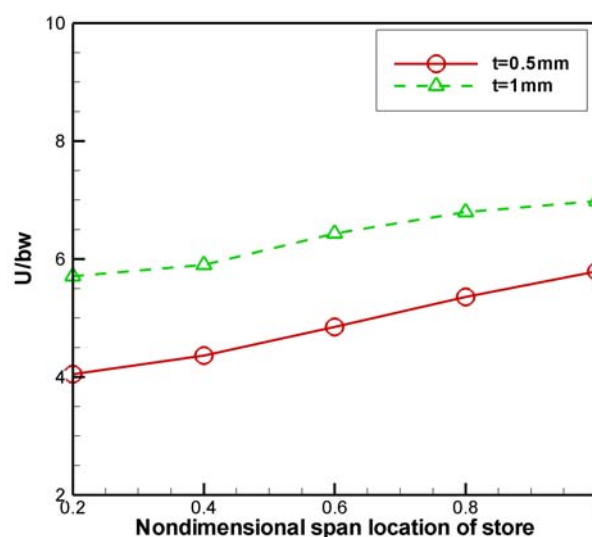
شکل ۶: اثر تغییر جرم مخزن بر سرعت بی‌بعد فلاتر

## نتیجه گیری:

با مشاهده نتایج بدست آمده نتیجه می‌شود که اضافه شدن مخزن به بال باعث پایین آمدن سرعت فلاتر و افزایش ناپایداری دینامیکی در سیستم می‌شود. همچنین هرچه فاصله مخزن از لبه گیردار بیشتر شود سرعت بی‌بعد فلاتر افزایش می‌یابد. افزایش ضریب منظری بال باعث ناپایداری بیشتر سیستم می‌شود. با افزایش ضخامت ورق مجموعه پایدارتر شده و فلاتر در سرعت بالاتری اتفاق می‌افتد. هرچه نسبت جرم مخزن به جرم بال بیشتر باشد سیستم ناپایدارتر می‌شود و هرچه این نسبت بیشتر باشد روند افزایش سرعت فلاتر نسبت به فاصله مخزن از لبه گیردار با شیب بیشتری دنبال می‌شود.

## مراجع

- [1] R. L. Bisplinghoff, and H. Ashley., 1962 *Principles of aeroelasticity*, New York: John Wiley and Sons.



شکل ۴: اثر تغییر ضخامت ورق بر سرعت بی‌بعد فلاتر

- [4] D. Tang, and E. H. Dowell, 2006. "Experimental and theoretical study of gust response for a wing-store model with freeplay," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, pp. 659-684,
- [5] Masterthesis, P. Zarifian, 2010. "The effect of fuel sloshing on the flutter of subsonic wings with an external store," MS Thesis, Sharif university,
- [2] AIAA, 2003. K. S. Dawson, and D. L. Maxwell, "Limit cycle oscillation flight test results for asymmetric store configurations," in 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Norfolk, Virginia, 2003.
- [3] S. Bennani, B. Beuker, J. W. v. Staveren *et al.*, 2005. "Flutter analysis for the F-16A/B in heavy store configuration," *Journal of Aircraft*, vol. 42, no. 6,.