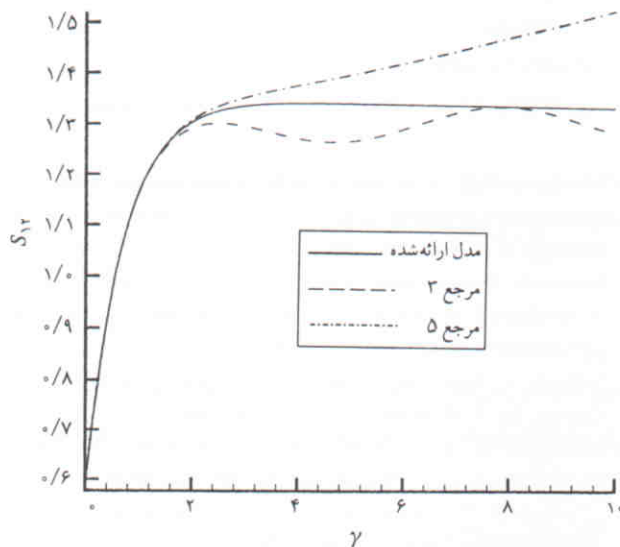


شکل ۲. مؤلفه برشی تنش کوشی برحسب تغییر مکان برشی برای ماده‌ی بی سخت‌شوندگی سینماتیک ( $k=1$  و  $h_{\alpha}=0/1$ ).



شکل ۳. مؤلفه‌ی برشی تنش کوشی برحسب تغییر مکان برشی برای ماده‌ی بی سخت‌شوندگی سینماتیک و همسان‌گرد ( $c=2/57$ ؛  $k_s=2/25$ ؛  $h_{\alpha}=0/1$ ).

با جاگذاری مؤلفه‌های تنش زمینه در معیار تسلیم ۱۱، مؤلفه‌های قائم و برشی تنش کوشی محاسبه می‌شوند.

### نتیجه‌گیری

براساس مدل مشخصه‌ی ارائه شده، تغییر شکل برشی ساده در یک ماده‌ی سخت‌شونده‌ی سینماتیک و همسان‌گرد تحلیل شده است. شکل‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده‌ی مؤلفه‌های قائم و برشی تنش کوشی برحسب تغییر مکان برشی برای یک ماده‌ی سخت‌شونده‌ی سینماتیک، با استفاده از هر دو نرخ جاومن و زارمبا هستند. چنان‌که ملاحظه می‌شود، با استفاده از دو نرخ مختلف در مدل مشخصه‌ی ارائه شده

$$\dot{\alpha} = \frac{2}{3} h_{\alpha} (\ln V)^z + \Omega \alpha - \alpha \Omega \quad (44)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۷ و مؤلفه‌های به دست آمده از روابط سینماتیک برش ساده، مؤلفه‌های نرخ زارمبای تانسور کرنش لگاریتمی  $(\ln V)_{ij}^z$  چنین محاسبه می‌شوند:

$$(\ln V)_{ij}^z = \frac{\dot{\gamma}}{(\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2)^{3/2}} \begin{bmatrix} \gamma \sqrt{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} - \dot{\epsilon} e_1 & 2\sqrt{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} + 2\dot{\gamma} e_1 \\ 2\sqrt{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} + 2\dot{\gamma} e_1 & -\gamma \sqrt{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} + \dot{\epsilon} e_1 \end{bmatrix} \quad (45)$$

از جاگذاری روابط ۲۷ و ۴۵ در معادله‌ی مشخصه‌ی ۴۴، دستگاه معادلات دیفرانسیل زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{\alpha}_{11} = \frac{2}{3} \frac{h_{\alpha} \dot{\gamma}}{(\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2)^{3/2}} (\gamma \sqrt{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} - \dot{\epsilon} e_1) + \frac{4}{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} \dot{\gamma} \alpha_{12} = -\dot{\alpha}_{22} \quad (46)$$

$$\dot{\alpha}_{12} = \frac{2}{3} \frac{h_{\alpha} \dot{\gamma}}{(\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2)^{3/2}} (2\sqrt{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} + 2\dot{\gamma} e_1) + 2\dot{\gamma} \frac{\alpha_{22} - \alpha_{11}}{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} \quad (47)$$

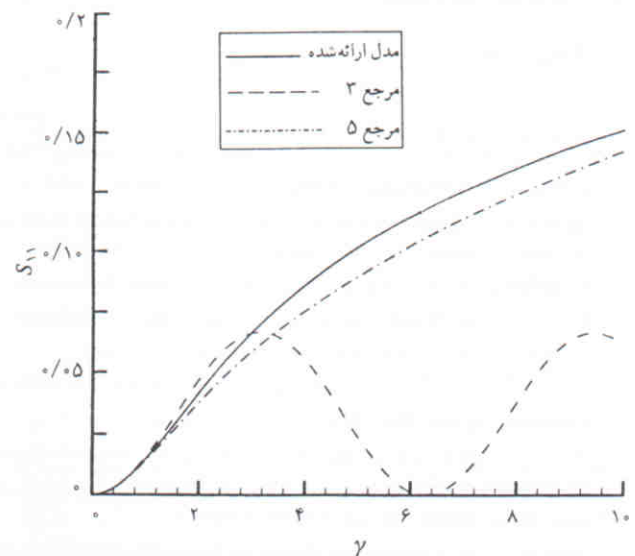
با فرض صفر بودن تنش اولیه، معادلات را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\alpha'_{11} = -\alpha'_{22} = \frac{4}{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} \alpha_{12} + \frac{2}{3} \frac{h_{\alpha}}{(\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2)^{3/2}} (\gamma \sqrt{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} - \dot{\epsilon} e_1) \quad (48)$$

$$\alpha'_{12} = -\frac{4}{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} \alpha_{11} + \frac{2}{3} \frac{h_{\alpha}}{(\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2)^{3/2}} (2\sqrt{\dot{\epsilon} + \dot{\gamma}^2} + \dot{\epsilon} e_1) \quad (49)$$

$\alpha'_{11}$  و  $\alpha'_{12}$  در رابطه‌ی ۴۱ تعریف شده‌اند.

مشابه حالت قبل، با حل معادلات ۴۸ و ۴۹ از طریق روش عددی رانج-کوتا، مؤلفه‌های تنش زمینه‌ی  $\alpha_{11}$  و  $\alpha_{22}$  به دست می‌آیند.



شکل ۴. مؤلفه‌ی قائم تنش کوشی برحسب تغییر مکان برشی برای ماده‌ی بی سخت‌شوندگی سینماتیک ( $k=1$  و  $h_{\alpha}=0/1$ ).

یعنی سرعت عمود بر هر جداره‌ی صلب برابر صفر است. شرط مرزی دوم عبارت است از:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

یعنی اثر حرکت جسم در بی‌نهایت ناچیز است.

به این ترتیب در جریان غیرلزج غیر قابل تراکم می‌توان از معادله‌ی لاپلاس میدان جریان (سرعت) را برای پتانسیل سرعت به دست آورد. پس از محاسبه‌ی میدان سرعت، از معادله‌ی برنولی میدان فشار به دست می‌آید. روابط نشان داده شده در بالا معادلات کلی هستند که می‌توانند در حالات خاص دوبعدی، سه‌بعدی و با در نظر گرفتن اثر ضخامت یا بدون آن به کار روند.

### مدل کردن اثر زمین

یکی از موارد مهم در حل هر مسئله به‌روش پتانسیل، انتخاب نوع تکینگی‌ها و نحوه‌ی ارضای شرط مرزی است. انواع مختلف این حالات برای جریان پتانسیل از روی بالواره‌ی بی‌خارج از اثر سطح موجود است.<sup>[6]</sup> در این نوشتار روش فوق را به حالتی که اثرات زمین را در بر گیرد بسط خواهیم داد. تفاوت اصلی روش حاضر با روش‌های مرسوم آن است که مرزهای صلب علاوه بر سطح بال، سطح زمین را نیز شامل می‌شود. به این ترتیب به نظر می‌رسد که برای مدل کردن اثر زمین باید شرط مرزی ۲ بر روی سطح زمین نیز ارضا شود. روش دیگر آن است که به جای زمین از تصویر بال اصلی نسبت به زمین استفاده شود. در این صورت مسئله به جای حل جریان از روی بال در مجاورت زمین، به حل جریان از روی دو بال تبدیل خواهد شد. دو حالت فوق در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

در صورت استفاده از روش تصویر، شرط مرزی ۲ به‌طور خودکار روی زمین ارضا شده و فقط لازم است بر روی سطح بالواره و تصویر آن اعمال شود. در این حالت، سطح بالواره و تصویر آن به  $N$  قسمت (المان

اثر سطحی) می‌نامیم، جزو اطلاعات طبقه‌بندی شده است و دسترسی به آنها غیر ممکن است.<sup>[۹]</sup>

پس از این ایده‌ی اولیه، محققان متعددی در برخی از کشورهای جهان شروع به بررسی این اثر و نحوه‌ی استفاده از آن کردند.<sup>[۱۰]</sup> به‌دلیل جدید بودن این ایده در خارج از روسیه، تحقیقات نظری و تجربی انجام شده پیرامون طراحی چنین وسایلی بسیار محدود و بیشتر در حد طراحی مفهومی<sup>۸</sup> است. دسترسی به اطلاعات طرح‌های روسی نیز به‌دلیل محرمانه بودن غیر ممکن است. شناخت اثر زمین و بررسی‌های نظری و تجربی انجام شده در این زمینه نیز به‌طور عمده به‌منظور بررسی تغییرات خواص آیرودینامیکی در هنگام فرود و برخاست هواپیماها انجام گرفته است. از آنجا که در این موارد اثر متغیرهایی چون صلب نبودن سطح آزاد و اثرات موج لحاظ نشده است، نتایج حاصله به‌طور مستقیم در طرح دریایمای اثر سطحی کاربرد ندارند. از این رو بر آن شدیم تا در این تحقیق اثرات نوع مدل‌سازی سطح آزاد، اثر شکل مقطع و متغیرهای هندسی آن، و نیز اثرات موج را که تاکنون به‌دقت بررسی نشده‌اند، تعیین کنیم.

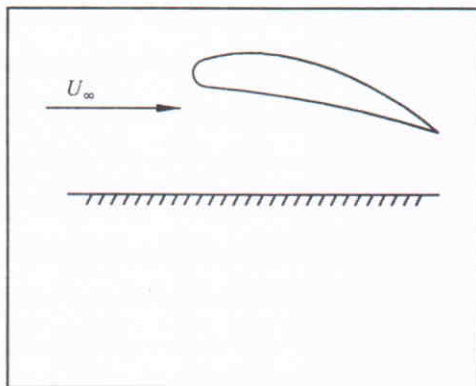
### معادلات حاکم در جریان پتانسیل

در صورتی که جریان سیال را غیر قابل تراکم و غیر چرخشی فرض کنیم، معادله‌ی پیوستگی جریان به معادله‌ی لاپلاس برای پتانسیل سرعت تبدیل می‌شود که عبارت است از:

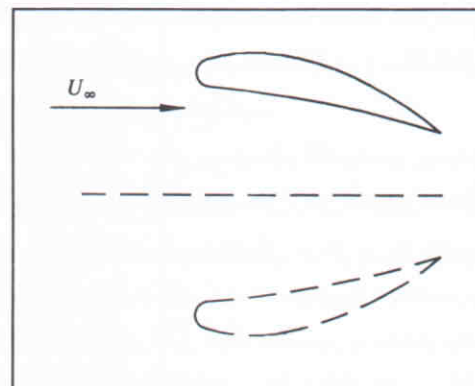
$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

که در آن  $\phi$  پتانسیل سرعت است و مقدار سرعت در هر نقطه برابر گرادیان آن است. حل معادله‌ی فوق در هر میدان جریان نیاز به دو شرط مرزی دارد. شرط مرزی روی دیواره در حالت کلی با فرض آن که مبدأ مختصات به جسم متصل باشد، عبارت است از:

$$n \cdot \nabla \phi = 0 \quad (2)$$



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) مدل‌سازی زمین به‌روش تصویر؛ ب) مدل‌سازی زمین به روش توزیع تکینگی بر روی آن.

چشمه<sup>۹</sup> است. در ادامه پاسخ‌های حاصل از دو روش فوق با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

البته باید توجه داشت که روش تصویر، در مدل‌کردن زمین یک محدودیت مهم دارد و آن عدم امکان بسط روش فوق برای حالاتی با سطح غیریکنواخت است. در این موارد بهتر است از روش توزیع چشمه بر روی سطح استفاده شود. به‌عنوان مثالی از این کاربرد می‌توانیم از حرکت دریایمی‌اثر سطحی در مجاورت سطح آزاد موج‌دار دریا نام ببریم، در بخش بعدی به بررسی اثر سطح آب و اثر شکل موج بر نیروهای آیرودینامیکی می‌پردازیم.

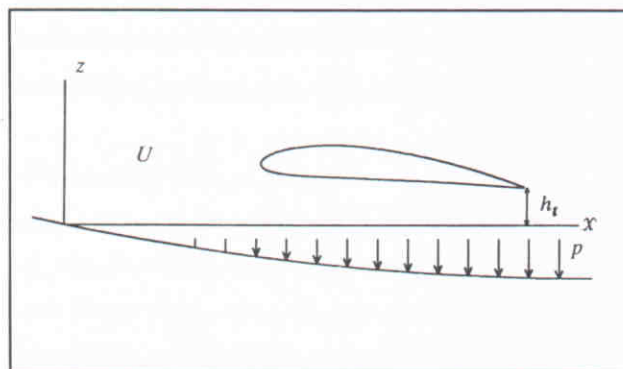
### اثر سطح آزاد

از آن‌جا که آب یک جسم صلب نیست، در اثر اعمال فشار، سطح آزاد آن مطابق شکل ۲ از حالت مسطح و افقی خارج خواهد شد. برای بررسی نظری این امر، از روش توزیع چشمه بر روی سطح آزاد که در بخش قبل بیان شد، استفاده می‌کنیم. در این روش پس از یافتن توزیع فشار بر روی سطح آزاد می‌توان ارتفاع آن را در هر نقطه از رابطی برنولی به دست آورد. با توزیع مجدد چشمه بر روی این سطح آزاد جدید و تکرار مراحل قبلی شکل نهایی سطح آزاد به دست می‌آید.

### اثر سطح موج‌دار

از موارد دیگری که در بررسی حرکت یک بال در مجاورت سطح آب حائز اهمیت است، اثر وجود موج و نیز شکل آن بر خواص آیرودینامیکی آن است. شکل موج‌های سطح آب در حالت کلی بسیار پیچیده‌اند ولی در این بررسی فرض می‌کنیم با یک تابع سینوسی که دامنه و طول موج مشخصی دارد بتوانیم آن را نشان دهیم (شکل ۳).

برای بررسی اثر موج بر خواص آیرودینامیکی بالواره‌یی که در مجاورت آن حرکت می‌کند، مجدداً از روش توزیع چشمه بر روی سطح زمین استفاده می‌کنیم. پس از یافتن توزیع گردابه‌ها با استفاده از



شکل ۲. فرض زمین به صورت سطح آزاد.

یا پانل) مساوی یا نامساوی (که در این بررسی از توزیع کسینوسی استفاده شده است) تقسیم می‌شود. شماره‌گذاری از گره پایینی لبه‌ی فرار شروع، و تا گره بالایی آن ادامه می‌یابد. بر روی هر پانل یک توزیع گردابه‌ی خطی فرض می‌شود.

سرعت القاشده در هر نقطه‌ی کنترل ناشی از توزیع گردابه روی بالواره‌ی اصلی و تصویر و نیز سرعت القاشده از طرف جریان آزاد است. با محاسبه‌ی این سرعت‌ها و قراردادن آنها در شرط مرزی ۲ معادله‌ی حاصله عبارت است از:

$$\sum_{j=1}^n \left[ (u, w)_{ij} + (u, w)_{ij}^{image} + (U_{\infty}, 0) \right] \cdot n_i = 0 \quad (4)$$

اگر قدرت گردابه در ابتدای هر پانل با قدرت گردابه در انتهای پانل قبل مساوی در نظر گرفته شود،  $N+1$  مجهول حاصل می‌شود که در واقع مقدار قدرت گردابه‌ها در لبه‌ی پانل‌ها یعنی  $(\gamma_j, \gamma_{j+1}, \dots)$  هستند. در این صورت رابطه‌ی بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{j=1}^n (A_{ij} \gamma_j + A_{i, N+1} \gamma_{iN}) = -(U_{\infty}, 0) \cdot n_i \quad (5)$$

معادله‌ی بالا منجر به  $N$  معادله (تعداد پانل‌ها) و  $N+1$  مجهول (شدت گردابه‌ها در نقاط گره‌ی) می‌شود. این اختلاف به آن دلیل است که ما ارتباط بین مقادیر گردابه در نقاط ابتدا و انتها یعنی نقاط بالایی و پایینی لبه‌ی فرار را برآورد نکرده‌ایم. این ارتباط می‌تواند توسط قانون کوتا انجام گیرد. قانون کوتا در حالت دوبعدی عبارت است از:  $\gamma_{TE} = 0$  یا  $\gamma_U = \gamma_L$  که  $U$  و  $L$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نقاط انتهایی بالایی و پایینی هستند.<sup>[۶]</sup> با اعمال این شرط رابطه‌ی ۵ توسط هر روش استاندارد حل ماتریس قابل حل است. با پیدا کردن قدرت گردابه‌ها در گره‌ها می‌توان سرعت مماس بر هر نقطه‌ی کنترل را از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$u_{tj} = (u_{t\infty})_j + (\gamma_j + \gamma_{j+1}) / 4 \quad (6)$$

و آنگاه مقدار ضریب فشار برابر است با:

$$C_p = 1 - (u_t / u_{\infty})^2 \quad (7)$$

مقدار ضریب برابر است با:

$$C_L = - \frac{1}{C} \oint_L C_p(x, z) n_z(x, z) dl \quad (8)$$

که در آن انتگرال‌گیری روی طول محیط بالواره انجام می‌شود. موقعیت مرکز فشار بالواره نسبت به لبه‌ی فرار آن برابر است با:

$$X_{CP} = - \frac{1}{C_L} \oint_L x C_p(x, z) n_z(x, z) dl \quad (9)$$

در صورتی که از روش تصویر برای مدل‌کردن اثر زمین استفاده نشود، باید توزیع تکینگی مناسبی بر روی سطح زمین انجام داد. ساده‌ترین شکل تکینگی مناسب برای توزیع بر روی زمین توزیع

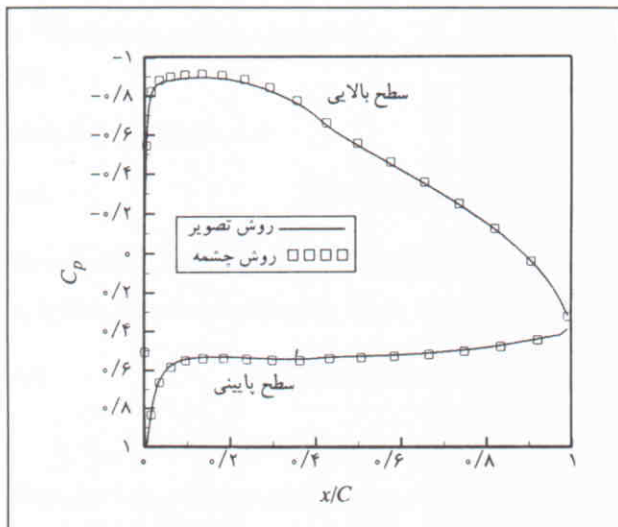
پانل استفاده شده است. توزیع نقاط بر روی بالواره‌های انتخاب شده به صورت کسینوسی است.

دومین مقایسه‌ی انجام شده، مقایسه با نتایج حل دقیق چند بالواره‌ی دوبعدی ژوکوفسکی غیرمتقارن در مجاورت زمین است.<sup>[۴]</sup> جدول ۱ نشان‌دهنده‌ی مقایسه‌ی نتایج حاصله (به‌ازای انتخاب ۹۰ پانل) است. با افزایش تعداد پانل‌ها تطابق نتایج روش حاضر با حل دقیق به‌مراتب بهبود می‌یابد. مقایسه‌ها در فاصله  $C/H=3/486$  و زاویه‌ی حمله‌ی ۵/۲ درجه انجام شده است.

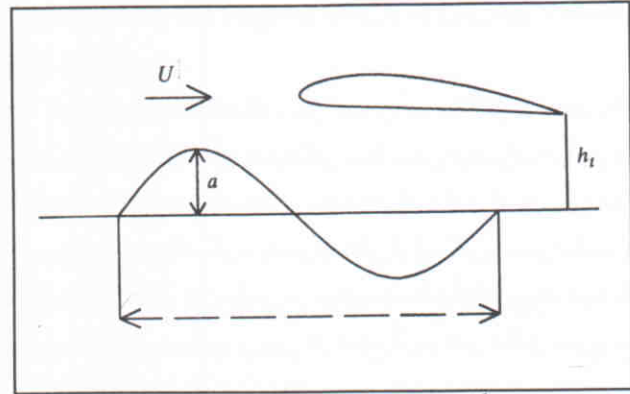
به‌منظور بررسی تجربی اثر زمین، آزمایش‌هایی بر روی یک بال با مقطع  $NACA4418$  انجام شده است. مقطع مورد آزمایش از یونولیت ساخته شد و در مقابل جریان هوای حاصل از یک فن سانتریفوژ که قطر دهانه‌ی کانال خروجی آن برابر ۸۰ سانتی‌متر بود قرار گرفت. طول وتر مدل آزمایش ۱ متر بود که به‌صورت دوبعدی مورد آزمایش قرار گرفت. زاویه‌ی حمله‌ی مورد آزمایش، ۱۰/۶ درجه، عدد رینولدز آزمایش (بر مبنای طول وتر بال) برابر ۷۰۰,۰۰۰ و فاصله‌های نسبی مورد آزمایش (فاصله‌ی لبه‌ی فرار بال از زمین) ۰/۰۵ و ۰/۱۰ بوده‌اند. اندازه‌گیری ضریب برآ با استفاده از توزیع فشار سطح بال انجام شده است. به این منظور مجراهایی بر روی سطح بال ایجاد شده و فشار اندازه‌گیری شده توسط شیلنگ‌هایی به یک مانومتر ۲۰ شاخه که به همین منظور ساخته شده، انتقال یافته است. طبق نتایج به دست آمده،

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج روش حاضر با روش حل دقیق.<sup>[۴]</sup>

بالواره‌ی ج	بالواره‌ی ب	بالواره‌ی الف	
۰/۰۱۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	کوژی
۰/۱۳۷	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	ضخامت
۰/۹۴۳	۰/۷۵۹	۰/۷۶۱	روش حل دقیق ( $C_L$ )
۰/۹۵۲	۰/۷۷۰	۰/۷۸۰	روش حاضر ( $C_L$ )



شکل ۴. مقایسه‌ی روش تصویر و روش توزیع چشمه بر روی سطح زمین.



شکل ۳. فرض زمین به صورت سطح موج‌دار.

قضیه‌ی کلونین<sup>[۶]</sup>، از طریق معادله‌ی غیردائم برنولی، توزیع فشار به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{P-P_\infty}{\rho} = 0.5U_\infty^2 - 0.5(\nabla\phi + \vec{U}_\infty)^2 - \frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (10)$$

ضریب فشار را نیز می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$C_P = \frac{P-P_\infty}{0.5\rho U_\infty^2} = 1 - \left| \frac{(\nabla\phi + \vec{U}_\infty)}{U_\infty} \right|^2 - \frac{2}{U_\infty^2} \frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (11)$$

با داشتن ضریب فشار و با استفاده از رابطه‌ی ۸، مقدار ضریب برآ به دست می‌آید.

### مقایسه‌ی روش‌های مدل کردن زمین

به‌منظور مقایسه‌ی دو روش ارائه شده، نتایج حاصل از مقایسه‌ی توزیع فشار بالواره‌ی  $NACA4412$  در زاویه‌ی حمله‌ی ۳ درجه و فاصله‌ی نسبی ۱۰ درصد از سطح زمین به دو روش ذکر شده در شکل ۴ نشان داده شده است. در کلیه‌ی قسمت‌های این نوشتار منظور از فاصله‌ی نسبی، نسبت فاصله‌ی لبه‌ی فرار ۱۰ بالواره از سطح یا خط متوسط پروفیل سطح به طول وتر بال<sup>۱۱</sup> است.  $A$  معرف روش توزیع خطی گردابه بر سطح بالواره و تصویر آن، و  $B$  معرف روشی است که در آن توزیع خطی گردابه بر سطح بالواره و توزیع چشمه بر سطح زمین استفاده شده است. مطابق این شکل، اختلاف بین دو روش بسیار ناچیز است و بنابراین هر دو روش برای مدل کردن اثر زمین قابل استفاده‌اند.

### مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و تجربی

به‌منظور بررسی صحت عملکرد روش ارائه شده، ابتدا نتایج حاصل از حل دقیق یک بالواره‌ی ژوکوفسکی<sup>۱۲</sup> با ضخامت ۱۵ درصد در زاویه حمله ۵ درجه با روش حاضر مقایسه شده است. مطابق نتایج به دست آمده، با انتخاب ۹۰ پانل اختلاف بین دو روش کمتر از ۱/۳ درصد بوده است. بنابراین در تمام محاسبات ارائه شده در این بخش از همین تعداد

ضریب برای حاصل از روش نظری در دو ارتفاع فوق، به ترتیب ۱/۶۱ و ۱/۴۸ و مقادیر متناظر حاصل از آزمایش ۱/۵ و ۱/۴ بوده‌اند. با استفاده از نتایج فوق به نظر می‌رسد از روش ارائه شده می‌توان در بررسی نحوه تغییرات ضرایب آیرودینامیکی در مجاورت سطح و چگونگی تأثیر شکل مقطع بال بر این خواص استفاده کرد.

### اثر سطح آزاد

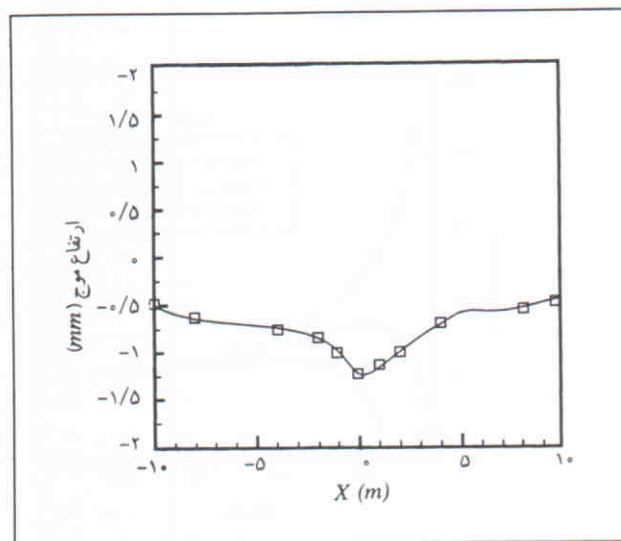
در شکل ۵ نتایج حاصل از اعمال روش ارائه شده بر یک مقطع  $NACA4412$  که در زاویه‌ی حمله‌ی ۸ درجه و فاصله‌ی نسبی ۰/۱ از سطح با عدد فرود  $10 (Fn = \sqrt{U/gC})$  حرکت می‌کند نشان داده شده است. چنان که در این شکل نشان داده شده، تغییر شکل سطح آزاد آب در مقایسه با ابعاد بال ناچیز است. محاسبات ضریب برای در این حالت نشان می‌دهد که به علت فشار نسبتاً ناچیز زیربال و توزیع آن در منطقه‌ی وسیع، تغییرات خواص آیرودینامیکی به هیچ‌وجه قابل رؤیت نیستند. از این رو در کلیه‌ی محاسبات بعدی از تغییر شکل سطح آزاد صرف‌نظر شده و آن را به صورت صلب فرض می‌کنیم.

### اثر متغیرهای هندسی مقطع بال

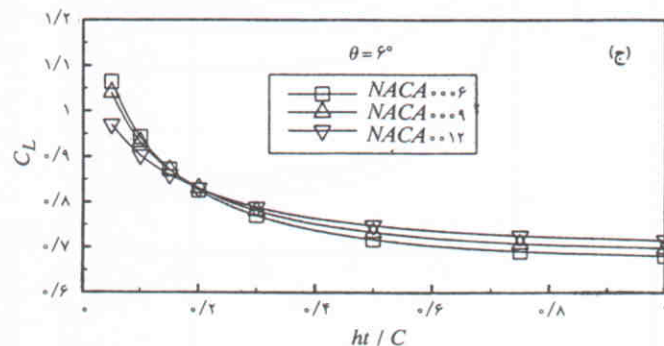
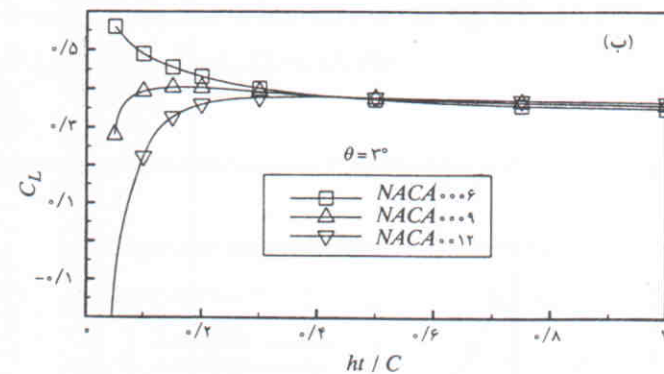
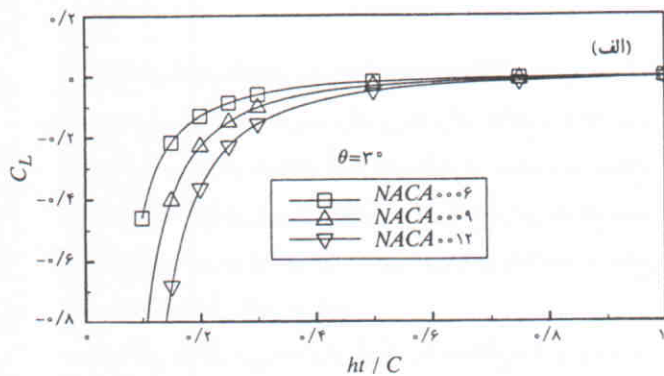
به منظور بررسی اثرات متغیرهای هندسی، چند مقطع بال با خواص هندسی (کوژی و ضخامت) متفاوت، انتخاب شده‌اند. محدوده‌ی ارتفاع نسبی مورد بررسی از ۰/۰۵ تا ۱ در زوایای حمله‌ی ۰ و ۳ و ۶ درجه است.

در شکل ۶ ضریب برای بالواره‌های  $NACA0006$ ،  $NACA0009$  و  $NACA0012$  به ترتیب در زوایای حمله‌ی ۰، ۳ و ۶ درجه رسم شده است. اولین موضوع قابل توجه در این منحنی‌ها، کاهش ضریب برای بالواره‌های ضخیم‌تر با زوایای حمله‌ی کم به هنگام کاهش فاصله از سطح است. به نظر می‌رسد دلیل این امر شکل خاص محفظه‌ی (کانال) ایجاد شده در زیر بالواره در زوایای حمله‌ی کم است. با عبور هوا از محفظه‌ی ونتوری<sup>۱۳</sup> مانند زیربال، مقدار فشار در موقعیتی که به سطح نزدیک‌تر است، کاهش یافته و باعث کم شدن ضریب برای می‌شود. چنان که مشاهده می‌شود، این امر، هنگامی که فاصله از سطح زمین کم است، می‌تواند باعث ایجاد نیروی قابل توجهی (به سمت زمین) شود.

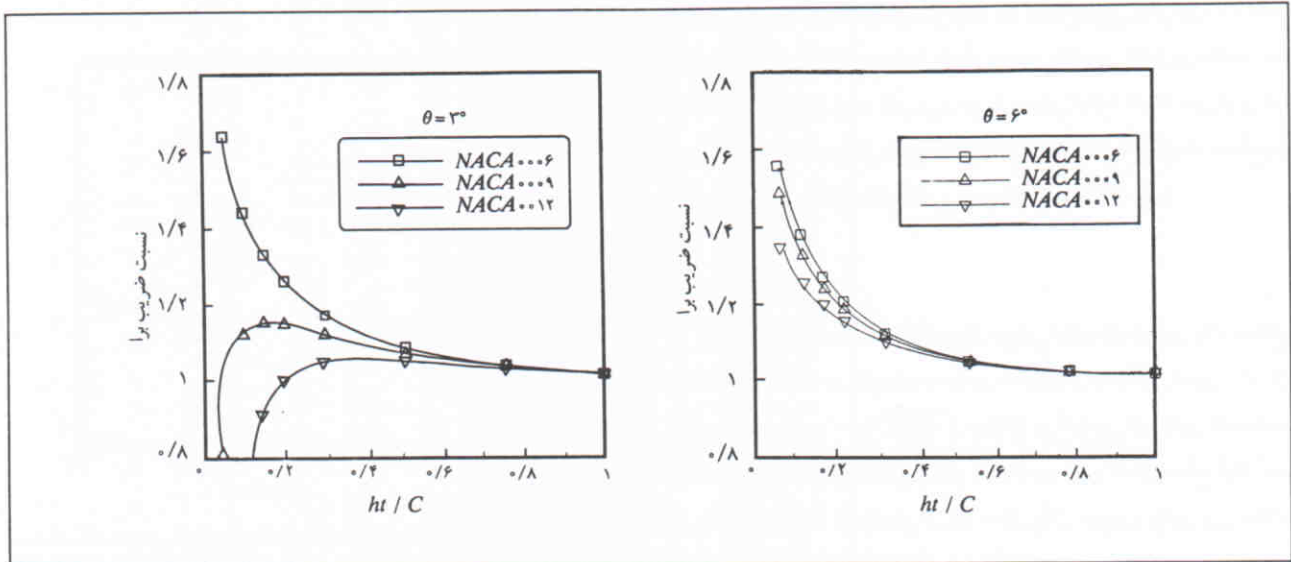
در شکل ۷ نسبت ضریب برای بی بعد در این سه بالواره در زوایای ۳ و ۶ درجه رسم شده است. به شرط آن که اثر ونتوری در زیربال ظاهر نشود، به طور کلی با کاهش فاصله از سطح نسبت ضریب برای افزایش می‌یابد. نکات قابل توجه در این منحنی‌ها به طور خلاصه عبارتند از: الف) با افزایش زاویه‌ی حمله نسبت ضریب برای بی بعد کاهش می‌یابد. ب) با افزایش ضخامت بالواره، نسبت ضریب برای بی بعد در یک



شکل ۵. تغییر شکل سطح آزاد آب در اثر حرکت یک بالواره در مجاورت آن.



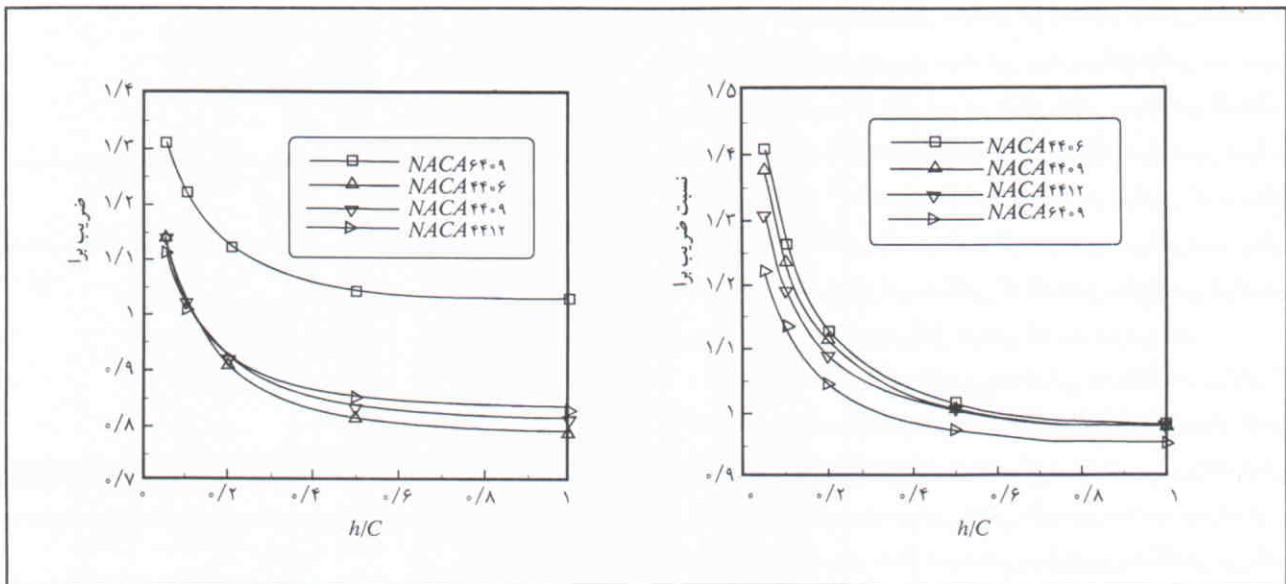
شکل ۶. تغییر ضریب برای در مجاورت زمین برای بالواره‌های متقارن.



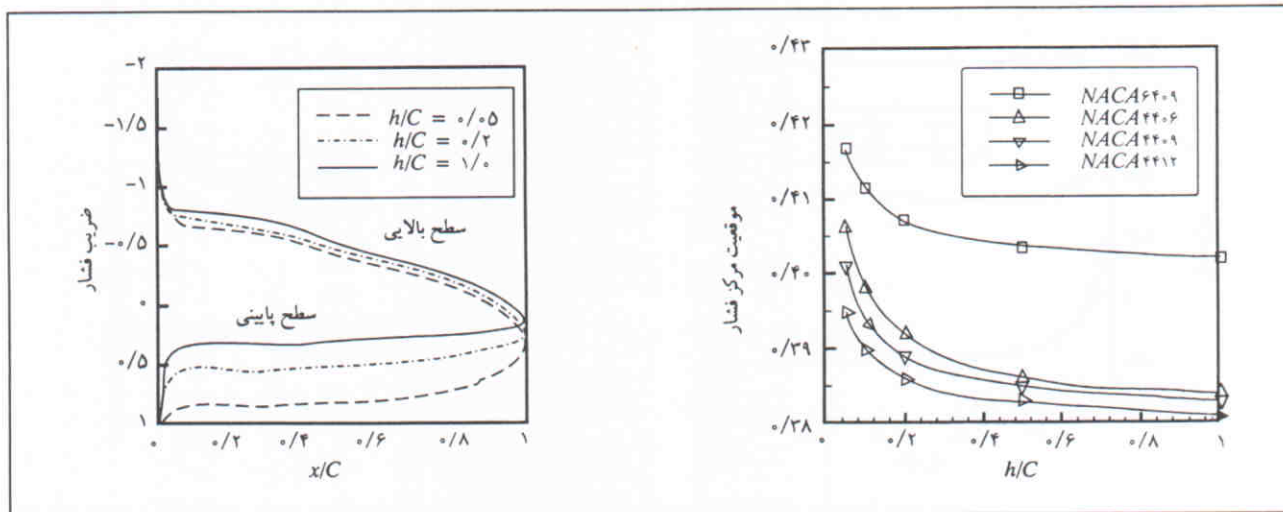
شکل ۷. تغییرات نسبت ضریب برآ در مجاورت زمین.

پس بال‌های کم‌ضخامت‌تر، در مجاورت زمین کارایی بهتری دارند. (ب) ضریب برآ و نیز نسبت ضریب برآ بی‌بعد برای مقاطع با ضخامت و کوژی کم در زوایای حمله‌ی کم و متوسط و در مجاورت سطح، به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. مجاورت به سطح در این مقاطع سبب افزایش شیب ضریب برآ می‌شود، یعنی ضریب برآ با فاصله از سطح به‌صورت غیر خطی تغییر می‌کند. به‌طور کلی به نظر می‌رسد برای آن که یک مقطع بال بتواند در مجاورت زمین باعث افزایش ضریب برآ شود، هیچ نقطه‌یی از بخش زیرین آن نباید پایین‌تر از لبه‌ی فرار باشد.

زاویه‌ی حمله و فاصله‌ی نسبی ثابت کاهش می‌یابد، دلیل این امر اثر گردابه‌های توزیع شده بر روی بالواره‌ی تصویر است. به‌منظور بررسی اثرات بقیه‌ی متغیرها، در شکل ۸ ضریب برآ و نسبت آن در چهار بالواره‌ی دیگر با ضخامت و کوژی‌های متفاوت، در زاویه‌ی حمله‌ی ۳ درجه به‌ازای نسبت فاصله از سطح رسم و مقایسه شده‌اند. با استفاده از این شکل‌ها چنین نتیجه می‌شود: الف) تغییر ضخامت در مقایسه با تغییر کوژی اثر قابل ملاحظه‌یی بر ضریب برآ ندارد. در مجاورت زمین، افزایش ضخامت با وجود افزایش اندک ضریب برآ، باعث کاهش نسبت ضریب برآ می‌شود.



شکل ۸. مقایسه‌ی ضریب برآ و نسبت آن در چهار بالواره‌ی مورد بررسی در زاویه‌ی حمله‌ی ۳ درجه.



شکل ۹. تغییر توزیع فشار در اثر مجاورت به زمین.

نسبت ضریب برا در بالواری  $NACA4406$  با بالچه‌یی به طول  $0.20$  وتر بال و زاویه‌ی  $10$  درجه رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، وجود بالچه به‌طور مطلق باعث افزایش ضریب برا می‌شود ولی نسبت افزایش نیروی برا در مجاورت سطح برای یک بالواری با بالچه به‌مراتب کمتر از مقدار متناظر در وضعیت بدون بالچه است.

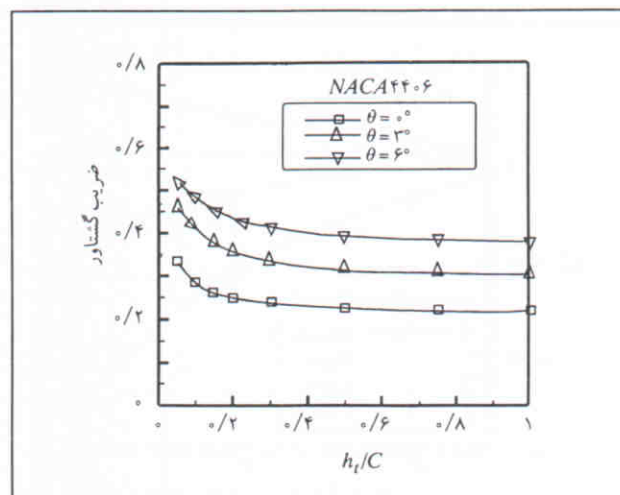
#### اثر سطح موج‌دار

در شکل ۱۲ اثر فاصله‌ی لبه‌ی فرار بالواره از خط متوسط موجی با دامنه و طول موج به ترتیب  $0.2$  و  $1.0$  برابر طول وتر بال نشان داده شده است. مقطع مورد بررسی بالواری  $NACA0012$  است که در زاویه‌ی حمله‌ی صفر درجه قرار داده شده است.

در این شکل و بقیه‌ی شکل‌های این قسمت  $CL_{max}$  نشان‌دهنده‌ی مقدار بیشینه‌ی (ماکزیمم) ضریب برای نوسانی،  $CL_{flat}$  ضریب برای حاصل از حرکت بالواری مورد نظر در مجاورت یک سطح صاف که در ارتفاع متوسط موج قرار دارد،  $CL_{av}$  ضریب برای متوسط در حرکت بر روی سطح موج‌دار و  $CL_{min}$  ضریب برای کمینه‌ی (مینیمم) نوسانی است.

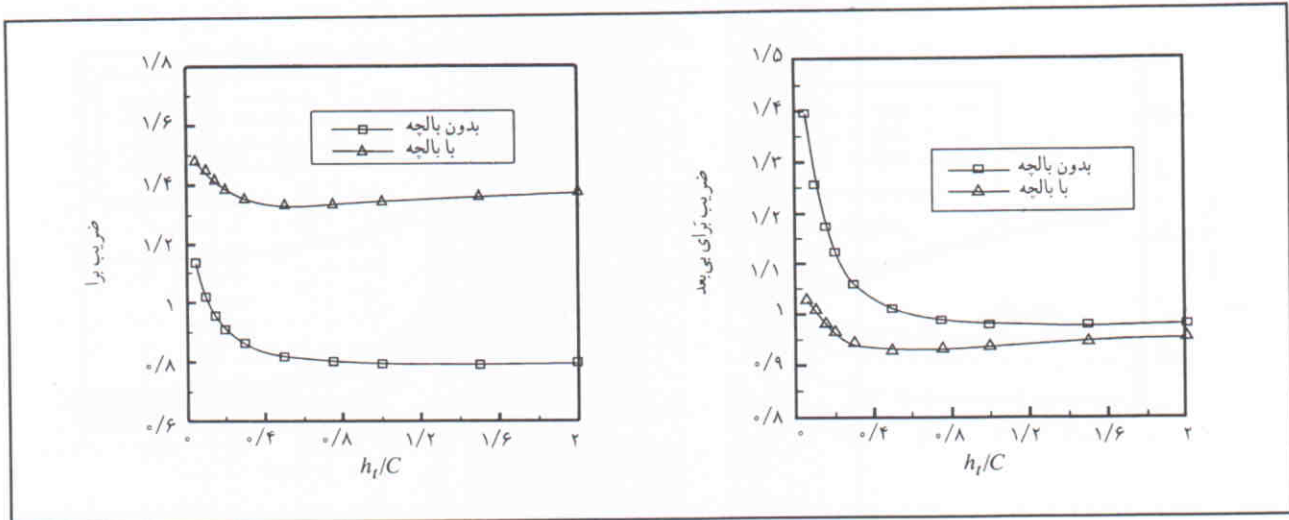
طبق نتایج به دست آمده، ضریب برای بالواره‌یی که در مجاورت یک سطح موج‌دار حرکت می‌کند، به‌صورت نوسانی و با تأخیر فاز نسبت به سطح موج تغییر می‌کند. طبق شکل ۱۲، سطح موج‌دار باعث تقویت اثر زمین می‌شود. البته از آنجا که بالواره‌ی متقارن در مجاورت زمین باعث ایجاد ضریب برای منفی می‌شود، سطح موج‌دار باعث افزایش قدر مطلق ضریب برا می‌شود. همچنین با توجه به این شکل می‌توان دریافت که با کاهش فاصله از سطح موج‌دار ضمن تقویت اثر سطح، دامنه‌ی نوسان ضرایب آیرودینامیکی نیز زیاد می‌شود.

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اثر دامنه و طول موج بر ضریب بران نشان داده

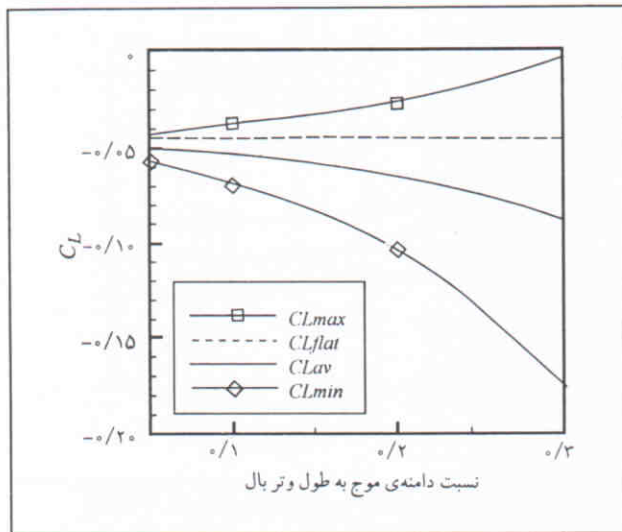


شکل ۱۰. تغییرات  $C_M$  بالواری  $4406$  در زوایای متفاوت.

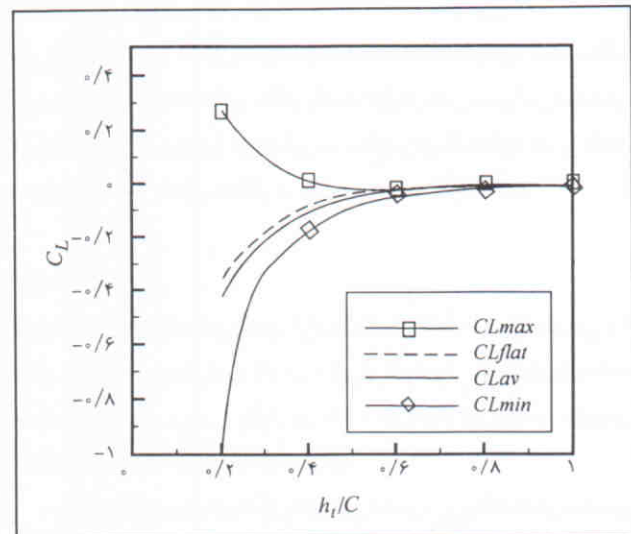
در شکل ۹ نحوه‌ی تغییرات توزیع فشار بالواری  $NACA4406$  در زاویه‌ی حمله‌ی  $5$  درجه و در سه ارتفاع متفاوت از سطح رسم شده است. مطابق این شکل، با نزدیک شدن بالواره به سطح، فشار زیر آن به سمت فشار سکون میل می‌کند در حالی که در توزیع فشار بالای آن تغییر چندانی رخ نمی‌دهد. در شکل ۱۰ تغییرات ضریب گشتاور همین بالواره در سه زاویه‌ی متفاوت برحسب فاصله از سطح نشان داده شده است. مطابق این شکل با نزدیک شدن بالواره به سطح ضریب گشتاور آن تغییرات قابل ملاحظه‌یی از خود نشان می‌دهد که ناشی از تغییرات موقعیت مرکز فشار آن است. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان انتظار داشت که با نزدیک شدن بالواره به سطح، موقعیت مرکز فشار به سمت لبه‌ی فرار آن جابه‌جا شود. این تغییرات با افزایش زاویه‌ی حمله کم می‌شود. از دیگر موارد بررسی شده در این بخش، اثر بالچه بر خواص آیرودینامیکی بالواره است. در شکل ۱۱ نحوه‌ی تغییرات ضریب برا و



شکل ۱۱. نحوه تغییرات ضریب برا و نسبت ضریب برا بر اثر وجود بالچه.



شکل ۱۳. اثر دامنه‌ی موج بر ضریب برا.



شکل ۱۴. اثر فاصله‌ی متوسط از سطح موج‌دار بر ضریب برا.

مورد نظر را سطحی آزاد یا موج‌دار در نظر بگیریم، تنها روش دوم قابل استفاده است.

مطابق نتایج به دست آمده، تغییر شکل سطح آزاد در اثر حرکت یک بالواره در مجاورت آن بسیار ناچیز است و از این رو سطح آزاد آب را می‌توان صلب فرض کرد.

مطابق نتایج به دست آمده، شکل هندسی مقطع بال می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ضریب برا در مجاورت زمین داشته باشد.

در مجاورت زمین، مقدار ضریب برای بی‌بعد (نسبت به مقدار آن در خارج از اثر سطح)، با افزایش زاویه‌ی حمله، ضخامت و کوژی کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که اگرچه افزایش ضخامت، کوژی و زاویه‌ی حمله می‌تواند منجر به افزایش ضریب برا شود، نسبت ضریب برای بی‌بعد به طور معکوس عمل می‌کند.

شده است. مطابق شکل‌های فوق افزایش دامنه‌ی موج باعث افزایش اثر زمین و نیز شدیدتر شدن نوسانات ضریب برا می‌شود. به نظر می‌رسد نسبت طول وتر بال به طول موج می‌تواند مقدار بهینه‌ی نیز داشته باشد (شکل ۱۴).

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر مجاورت به سطح آب بر خواص آیرودینامیکی یک بالواره، به لحاظ نظری و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی به دست آمده را می‌توان چنین بیان داشت:

در تعیین اثر سطح صلب مسطح بر خواص آیرودینامیکی بالواره‌ی مجاورت آن قرار می‌گیرد، هر یک از روش‌های تصویر یا توزیع چشمه بر روی سطح قابل استفاده‌اند. در صورتی که سطح



— با رعایت شرایط فوق می توان انتظار داشت که ضریب برای یک بال در فواصل نسبی (نسبت به طول وتر بال) کمتر از ۰/۵ به طور قابل ملاحظه بی نسبت به مقدار آن در خارج از اثر سطح افزایش یابد. به دلیل رفتار نمایی این تغییرات، با کاهش هرچه بیشتر فاصله از سطح، مقدار ضریب برای افزایش قابل ملاحظه بی خواهد داشت.

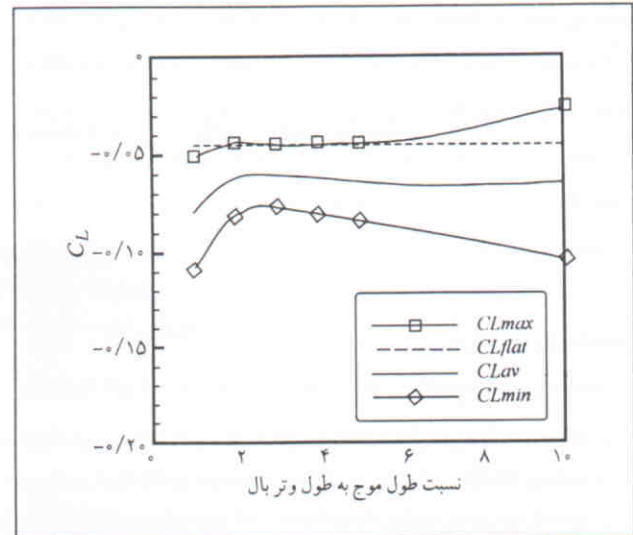
— با استفاده از اصول فوق امکان طراحی یک دریایمای اثر سطحی جدید که با بهره گیری از خصوصیات فوق بتواند در ارتفاع کم تر از سطح آب پرواز کند وجود دارد. این طرح قابلیت کاربردهای نظامی، تفریحی و مسافرتی زیادی دارد.

— ضریب برای بالواره بی که در مجاورت یک سطح موج دار حرکت می کند به صورت نوسانی و با تأخیر فاز نسبت به سطح موج تغییر می کند.

— موج دار بودن سطح، باعث تقویت اثر زمین می شود؛ به این معنی که سطح موج دار باعث افزایش قدر مطلق ضریب برای می شود.

— با کاهش فاصله از سطح موج دار ضمن تقویت اثر سطح، دامنه ی نوسان ضرایب آیرودینامیکی نیز زیاد می شود.

— افزایش دامنه ی موج باعث افزایش اثر زمین و نیز شدیدتر شدن نوسانات ضریب برای می شود.



شکل ۱۴. اثر طول موج بر ضریب برای.

— به طور کلی به نظر می رسد برای آن که یک مقطع بال بتواند در مجاورت زمین باعث افزایش ضریب برای شود، هیچ نقطه بی از بخش زیرین آن نباید پایین تر از لبه ی فرار باشد. همچنین بهترین مقطع بال برای پرواز در مجاورت سطح، مقطعی با کوژی و ضخامت کم است که دارای زاویه ی حمله ی بین ۳ تا ۶ درجه باشد.

### پانوشتها

1. airfoil
2. linear vortex panel
3. drage coefficient
4. image method
5. conformal mapping
6. singularity distribution
7. flap
8. conceptual design
9. source distribution
10. trailing edge
11. chord
12. Joukowski airfoil
13. venturi

### منابع

1. Wieselsberger, C. "Wing resistance near the ground", *NACA TM-0077*, (1922).
2. Tomotika, S., Nagamiga, T., and Takenouti, Y. "The lift on a flat plate placed near a plane wall with special reference to the effect of the ground upon the lift of a monoplane airfoil", *Aeronautical Res. Inst. of Tokyo, Rept. 97*, (1933).

3. Tomotika, S., Tamada, K., Umemoto, H. "The lift and moment acting on a circular arc aerofoil in a Stream Bounded by a plane wall", *Quarterly J. mech. Appl. Math.*, 4(Part 1), pp. 1-22 (1951).
4. Tomotika, et al. "The Forces Acting on an Airfoil of Approximate Joukowski Type in a Stream Bounded by a Plane Wall", *Quarterly J. Mech. Appl. Math.*, 4(part 3), pp. 289-307, (1951).
5. Pistolesi, E., Ground Effect, "Theory and Practice", *NACA TM-828*, 1937.
6. Katz, J. Plotkin, A. "Low speed aerodynamics: From wing theory to panel methods", MC Graw-Hill (1991).
7. Coulliete, C., Plotkin, A. "Aerofoil ground effect revisited", *Aeron. J.*, pp. 65-74 (Feb.1996).
8. راد، م. جعفر کاظمی، ف. «اثر مجاورت به زمین برخواص آیرودینامیکی بالواره های نازک»، مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، شماره ی ۲۵، پاییز و زمستان ۷۹، صص. ۶۱-۷۰.
9. Mellow, C. "When Ships Have Wings", *Air and Space*, pp. 52-59 (Dec. 1995/Jan. 1996).
۱۰. راد، م. جعفر کاظمی، ف. «بررسی انواع شناورهای تندرو و ارائه ی طرحی برای یک وسیله اثر سطحی جدید»، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس انجمن مهندسين مکانیک ایران، جلد اول، ۲۵ الی ۲۷ فروردین ۱۳۷۸، صص. ۵۱۷-۵۰۱.