اثر مجاورت به زمین بر تغییرات خواص آیرودینامیکی بالوارههای نازک

منوچهر راد دانشیار دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
فرزاد جعفر کاظمی عضو هیأت علمی، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران

چکیده
در این مقاله چگونگی تغییرات خواص آیرودینامیکی یک بالواره نازک در جریان دائمی غیر لزج در مجاورت زمین مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا رابطهای برای تعیین پسای القایی در مجاورت زمین پیشنهاد شده است که نسبت به روشهای استاندارد موجود تطابق بهتری با دادههای تجربی دارد. سپس با تعمیم روش تک گردابهای و روش توزیع گردابه نتایج حاصل از این دو با حلهای دقیق موجود مقایسه شدهاند. بدلیل تطابق بهتر روش توزیع گردابه با نتایج حل دقیق اثرات زاویه حمله، بالچه و کوژ در مجاورت زمین با این روش بررسی شده است. با استفاده از نتایج حاصله مجاورت به زمین (سطح) بسته به زاویه حمله، فاصله از سطح و کوژ بالواره میتواند باعث افزایش یا کاهش نیروی برا شود.

کلمات کلیدی: اثر زمین، کوژ بالچه، بالواره نازک، روش گردابه

Effect of Ground Proximity on The Aerodynamic Properties of Thin Airfoils

M. Rad Dept. of Mech. Eng., Sharif University, Tehran, Iran
F.J. Kazemi Faculty of Eng., Islamic Azad University, Tehran Southern Branch, Iran

Abstract
In this paper the variation of aerodynamic properties of a thin airfoil in ground effect is investigated. First, a formulation is developed to calculate the induced drag in ground effect, which correlates the experimental data better than the present standard methods. Then the single vortex method and the distributed vortex method are extended to include the ground effect. The results of the two methods are compared with the available exact solution results. Due to the better correspondence between the distributed vortex and the exact solution methods, in comparison to the single vortex method, the first was used to determine the effects of angle of attack, flap and camber in ground proximity. According to the results, ground effect could lead to and increase or decrease in the lift coefficient depending on the combined effects of the ground clearance, angle of attack and camber.
Key words: Ground Effect, Camber, Flap, Thin Airfoil, Vortex Method

۱- مقدمه

اثر زمین از دیرباز برای خلبانان شناخته شده است. این اثر عموماً در هنگام فرود و برخاست، خصوصاً در هواپیماهای بال پایین با سطح زیاد ظاهر می شود. در سال ۱۹۲۲ میلادی برای اولین بار این اثر توسط "وایزلر برگر" [1] مورد بررسی تئوری و تجربی قرار گرفت. پس از آن آزمایشهای متفاوتی برای بررسی تجربی این پدیده انجام شده است [4,3,2]. بررسی تحلیلی (دقیق) اثر زمین برای اولین بار در سال ۱۹۳۳ میلادی برای یک صفحه تخت در مجاورت زمین توسط "توموتیکا" [5] بەروش تبدیل همدیس انجام گرفت. وی در سال ۱۹۵۱ میلادی روش فوق را به جریان اطراف یک بالواره با قطاع دایروی بسط داد. [6] مطابق نتایج بدست آمده از تئوریهای اولیه و آزمایشها کاهش فاصله از زمین در اکثر موارد باعث افزایش نیروی برا و کاهش پسای القایی میشد. این مزیت در سالهای اخیر منجر به تعریف دستهای جدید از وسایل حمل و نقل شده است که در کل مسیر پروازی خود از مجاورت سطح بهره میگیرند [۷]. از اینرو تعیین خواص آیرودینامیک سطوحی که بطور دائم در مجاورت سطح حرکت میکنند از اهمیت زیادی برخوردار است. نتایج این بررسی میتواند در طراحی سطوح برازا در اتومبیلهای مسابقه نیز کاربرد داشته باشد. به این منظور در این مقاله ابتدا روابطی برای تعیین پسای القايي در مجاورت زمین ارائه شده است. سپس با تعمیم روش تک گردابهای که در [8] ارائه شده است و با توزیع گردابههای مجزا بر روی سطح بالواره و تصویر آن، اثرات زاویه حمله، وجود یا عدم وجود بالچه و تغییرات کوژ بالواره بر خواص آیرودینامیکی آن بررسی شده است.

۲- اثر زمین بر پسای القایی

برای تجزیه و تحلیل یک بالواره در مجاورت زمین اثر آن را میتوان توسط روش تصویر مدل کرد. در این صورت مطابق شکل (۱) گردابههای بال تصویر شده یک سرعت القايي روبه بالای W' بر بال واقعی اعمال خواهند کرد. بعلت این سرعت القایی روبه بالا اثر پایین شار گردابههای انتهایی بال واقعی کم میشود. این امر باعث کاهش پسای القايي و افزایش زاویه حمله مؤثر میگردد. برای اولین بار در مرجع [1] اثر زمین با یک پارامتر تصحیح σ بصورت زیر نشان داده شد:

$$\frac{C_{Di}(IGE)}{C_{Di}(OGE)} = 1-\sigma \qquad (۱)$$

که در آن:

$$\sigma = \exp[-2.48(2h/b)^{0.0768})] \qquad (۲)$$

صحت این رابطه توسط آزمایشات مختلف تأیید شده است[2,3]. در مرجع [9] با استفاده از روش گردابه نعل اسبی و با فرض آنکه نسبت پسای القايي در دو حالت (تحت اثر زمین به خارج از اثر زمین) را بتوان با نسبت پایین شار القايي در وسط دهانه بال معادل گرفت رابطه زیر برای $1-\sigma$ بدست آمده است:

$$1-\sigma = \frac{W-W'}{W} = \frac{(16h/\pi b)^2}{1+(16h/\pi b)^2} \qquad (۳)$$

مطابق محاسبات انجام شده نتایج حاصل از این رابطه در $h/b < 0/5$ دارای خطای زیادی است. در رابطه فوق W یعنی سرعت القايي ناشی از گردابههای انتهايي بال واقعی بصورت زیر محاسبه شده است:

$$W = \frac{k_0}{4\pi S'} + \frac{k_0}{4\pi S'} = \frac{k_0}{2\pi S'} \qquad (۴)$$

اگر بجای این عبارت با استفاده از شکل (۱) از رابطه هندسی استفاده کنیم داریم:

$$W = U_\infty \alpha_i = U_\infty C_L / \pi.AR \qquad (۵)$$

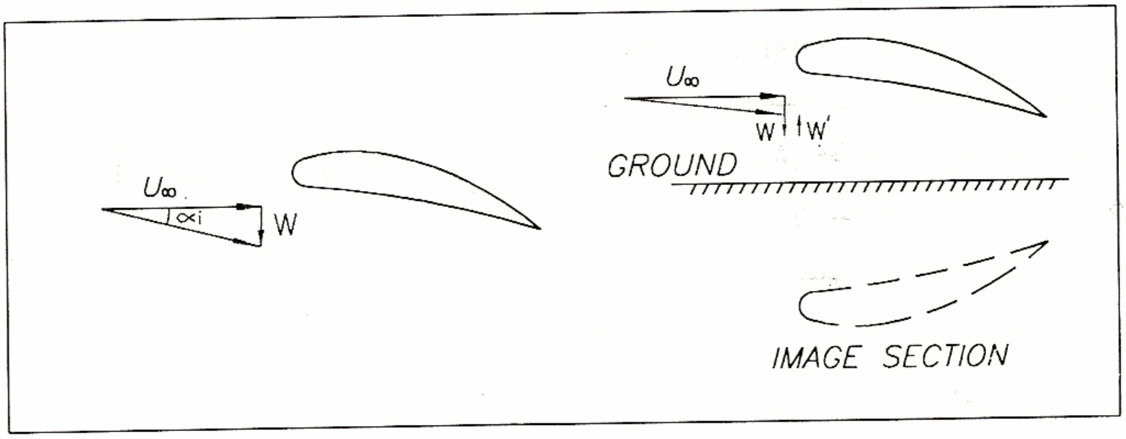
حال اگر در رابطه (۳) بجای W از فرمول (۵) استفاده کنیم خواهیم داشت:

$$1-\sigma = [1-\frac{2}{\pi}+(\frac{16h}{\pi b})^2]/[1+(\frac{16h}{\pi b})^2] \qquad (۶)$$

نتایج حاصل از مقایسه سه رابطه (۲)، (۳) و (۶) در بخش نتایج محاسباتی ارائه شده است.

۳- اثر زمین بر نیروی برا-روش تک گردابهای

استفاده از یک گردابه برای تعیین جریان از روی یک صفحه تخت برای اولین بار در مرجع [10] معرفی شد.



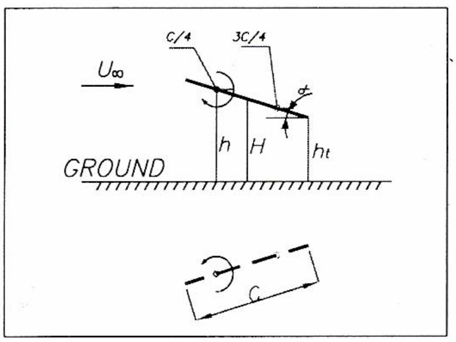
شکل ۱- سمت چپ: مؤلفههای سرعت در خارج از اثر زمین
سمت راست: مؤلفههای سرعت تحت اثر زمین

برای آنکه یک گردابه تنها بتواند جایگزین یک بالواره نازک شود، مطابق شکل (۲) این گردابه بایستی در فاصله C/۴ از لبه حمله قرار داده شود و شرایط مرزی در فاصله ۳C /۴ از لبه حمله ارضا شوند. از آنجا که جریان سیال در این تجزیه و تحلیل بصورت جریان پتانسیل فرض شده است شرط مرزی که باید بالواره حاکم باشد. عبارتست از:

$$n.\nabla\phi = 0 \qquad (۷)$$

در خارج از اثر زمین با ارضای شرط فوق مقدار شدت گردابه لازم برابر با:

$$\Gamma_\infty = \pi C U_\infty Sin\alpha$$



شکل ۲- مدل تک گردابه ای برای تعیین اثر زمین

از آنجا که سرعت در محل گردابه برابر سرعت جریان آزاد است با استفاده از قانون کوتا خواهیم داشت:

$$C_{L\infty} = \frac{2\Gamma_\infty}{U_\infty C} = 2\pi Sin\alpha \qquad (۸)$$

در مجاورت زمین دو اثر ناشی از گردابههای محدود بال تصویر بوجود می آید. این دو اثر عبارتند از:

۱- تغییر شرایط مرزی در نقطه کنترل

در این صورت با نوشتن شرط مرزی برای شرایط جدید و استفاده از قانون بایوت ساوارات خواهیم داشت:

$$\frac{\Gamma_g}{\Gamma_\infty} = 1 + \frac{\left[\frac{1}{4}(c/h)^2 - (c/h)Sin\alpha\right]}{4-(c/h)Sin\alpha} = F \qquad (۹)$$

۲- تغییر در سرعت افقی در محل گردابه اصلی و اثر آن بر مقدار برا

بعلت وجود گردابه محدود بال تصویر شده، سرعت القایی افقی در محل گردابه بصورت زیر تصحیح خواهد شد:

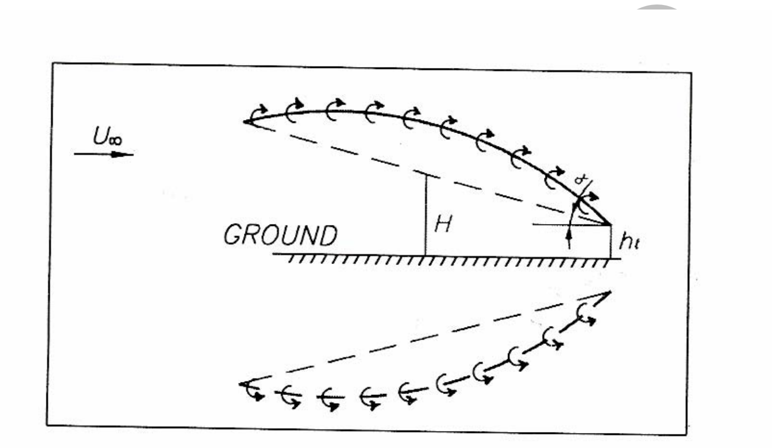
$$U_g = U_\infty - \frac{\Gamma_g}{4\pi h} \qquad (۱۰)$$

حال با استفاده از قانون کوتا بصورت $L=\rho U_g \Gamma_g$ خواهیم داشت:

$$\frac{C_{Lg}}{C_{L\infty}} = F\left[1-\frac{F}{4}\left(\frac{C}{h}\right)Sin\alpha\right] \qquad (۱۱)$$

۴- اثر زمین بر نیروی برا-روش توزیع گردابههای مجزا

روش توزیع گردابه در واقع مدل دو بعدی روش شبکه گردابه است. اثر زمین مشابه روش قبلی توسط تصویر بالواره مدل می‌شود. در این روش خط کوژ متوسط بالواره مطابق شکل (۳) با N گردابه منفرد با شدتهای Γ_g در فاصله ۴,۱ طول هر المان مدل می‌شود مطابق آنچه که در بخش قبل ذکر شد شرط مرزی (۷) باید در N نقطه کنترل ارضا شود.



شکل ۳- مدل توزیع گردابه برای تعیین اثر زمین

در هر نقطه کنترل سرعت‌های القایی عبارتند از سرعت القایی ناشی از گردابههای بالواره اصلی، سرعت القایی ناشی از گردابههای بالواره تصویر و سرعت جریان آزاد، در این صورت شرط مرزی فوق بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\left[\sum[(u,w)_{ij}+(u,w)_{ij}^{image}]+(U_{\infty},0)\right]n_i=0 \qquad (۱۲)$$

که در آن i نشان دهنده نقاط کنترل (از یک تا N) و j نشان دهنده نقاط اثر گردابهها است. در این رابطه $(u,w)_{ij}$ نشاندهنده سرعتهای القاء شده توسط یک گردابه در موقعیت j بالواره اصلی بر نقاط کنترل i بالواره اصلی است و عبارتست از:

$$(u,w)_{ij}=\frac{\Gamma_j(z_i-z_j),-(x_i-x_j))}{2\pi[(x_i-x_j)^2+(z_i-z_j)^2]} \qquad (۱۳)$$

و $(u,w)_{ij}^{image}$ نشاندهندهٔ سرعتهای القاء شده ناشی از گردابههای بالواره تصویر بر نقاط کنترل بالواره اصلی است و عبارتست از:

$$(u,w)_{ij}^{image}=\frac{\Gamma_j(z_i-(-z_j-2h),-(x_i-x_j))}{2\pi[(x_i-x_j)^2+(z_i-(-z_j-2h)^2]} \qquad (۱۴)$$

با جایگذاری معادلات (۱۳) و (۱۴) در معادله (۱۲) و انتقال عبارت ناشی از سرعت جریان آزاد به سمت راست خواهیم داشت:

$$\sum_{j=1}^{n} A_{ij}\Gamma j=-(U_{\infty},0).n_i, i=1,2,...,N \qquad (۱۵)$$

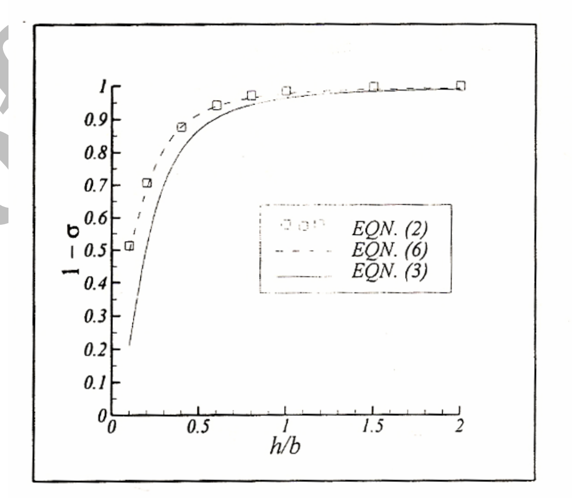
که در آن A_{ij} برابر است با:

$$A_{ij}=[(u,w)_{ij}+(u,w)_{ij}^{image}]_{\Gamma_j=1}.n_i \qquad (۱۶)$$

با حل معادله (۱۵) برای N نقطه کنترل مقادیر Γ_g مجهول بدست می‌آیند. با داشتن Γ_g می‌توان مقدار ضریب برا را از قانون کوتای تحصیح شده بدست آورد. نکته قابل توجه در اینجا آنست که مشابه رابطه (۱۰) باید اثرات سرعتهای افقی القا شده توسط گردابههای بالواره تصویر را نیز در محاسبه نیروی برا توسط قانون کوتا به حساب آورد.

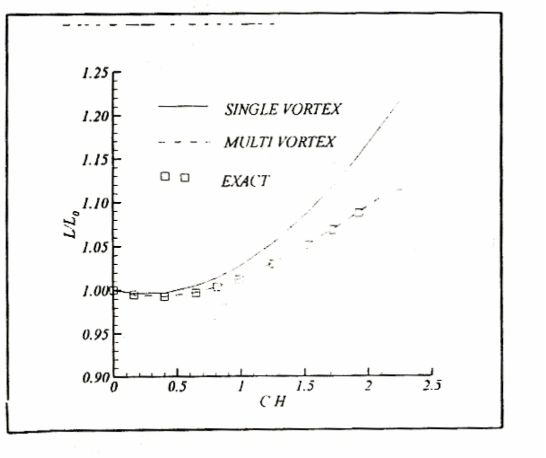
۵- نتایج محاسباتی

در این بخش به بررسی نتایج محاسبات اثر زمین می‌پردازیم. در شکل (۴) منحنی تغییرات $1-\sigma$ یعنی نسبت پسای القایی در مجاورت زمین به پسای القایی خارج از اثر زمین به ازای نسبت h/b رسم شده است.



شکل ۴- تغییرات پسای القایی در مجاورت زمین

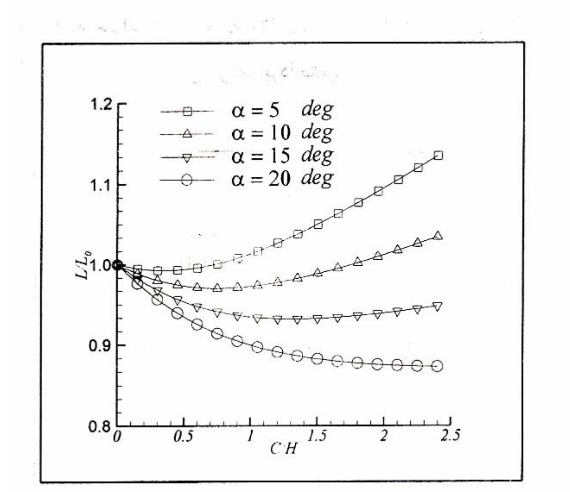
چنانچه ملاحظه می‌شود نتایج فرمول پیشنهاد شده کاملاً با فرمول تجربی مطابقت دارد ولی رابطه (۳) تنها در نسبت فاصله $h/b>1$ به نتایج تجربی نزدیک است. با توجه به این منحنی پسای القایی در فاصلهای معادل ۰/۱ طول دهانه بال از زمین در حدود ۵۰ درصد مقدار آن در خارج از اثر زمین است. از اینرو با پرواز در مجاورت سطحی مانند آب پسای القایی به مقدار قابل ملاحظهای کم می‌شود. البته تعیین ارتفاع پروازی به عوامل دیگری از جمله شرایط دریا نیز بستگی دارد [۷]. در شکل (۵) با رسم منحنی نسبت نیروی برای بی‌بعد (ضریب برا در مجاورت زمین به مقدار آن در خارج از اثر زمین) برای یک صفحه تخت در زاویه حمله ۵ درجه به مقایسه نتایج حاصل از روش تک گردابهای با روش توزیع گردابه پرداختهایم.



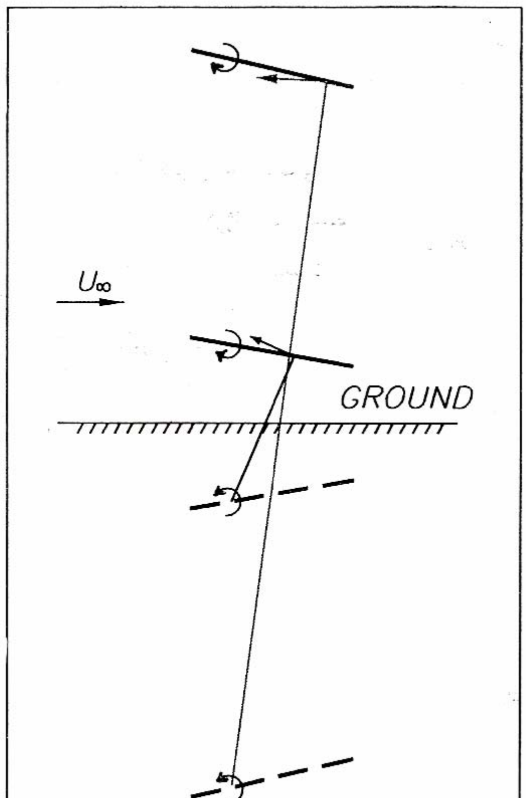
شکل ۵- مقایسه روش دقیق و روشهای عددی

همانطور که مشاهده می‌شود در کلیه نقاط، جوابهای حاصل از توزیع گردابه با حل دقیق [۷] مطابقت دارد ولی با کاهش فاصله از سطح (افزایش C/H)، مقدار پیشبینی شده توسط روش تک گردابهای بیش از مقدار دقیق آن است ولذا توصیه نمیشود. بنابراین در فواصل کم بعلت اثر کوژ ایجاد شده در جریان، یک گردابه تنها قادر به مدل کردن جریان نیست. از اینرو در کلیه محاسبات بعدی از روش توزیع گردابه برای مدل کردن اثر زمین استفاده می‌شود. با مقایسههای انجام شده در حالت صفحه تخت حتی با تعداد ۳۰ گردابه نیز نتایج قابل قبولی بدست می‌آید ولی با انتخاب ۵۰ گردابه اختلاف روش حاضر و حل دقیق به کمتر از ۰/۱ درصد می‌رسد. این محاسبات در مورد بالواره کوژ نیز انجام شده است و بنابراین در تمام محاسبات بعدی از نتایج ۵۰ گردابه در طول وتر بال استفاده شده است. در شکل (۶) تغییرات نسبت نیروی برا به ازای C/H برای یک صفحه تخت در زوایای حمله از ۵ تا ۲۰ درجه رسم شده است.

انتخاب این اعداد بهعلت مقایسه کاملتر نتایج با نتایج محدود حل دقیق می‌باشد. مطابق این شکل با کاهش فاصله از زمین (یعنی افزایش C/H) در یک زاویه حمله مشخص ابتدا نسبت نیروی برا کاهش یافته و سپس بسته به مقدار زاویه حمله افزایش یا کاهش می‌یابد. دلیل کاهش اولیه نیروی برا را می توان از شکل (۷) دریافت.

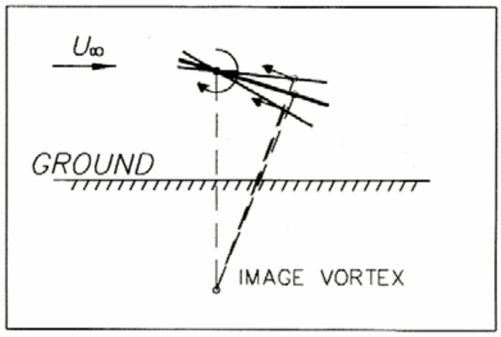


شکل ۶- اثر زمین بر نیروی برای صفحه تخت



شکل ۷- اثر فاصله از زمین بر مؤلفه سرعت القایی

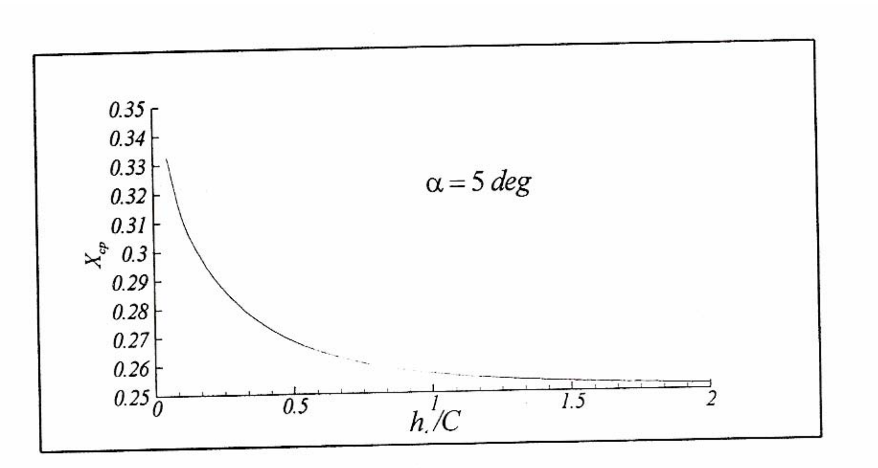
بطور کلی سرعت القايي ناشی از گردابههای تصویر شده بر بالواره اصلی را می‌توان به دو مؤلفه مماس و عمود بر سطح آن تجزیه کرد. در صورتی که فاصله بالواره از زمین زیاد باشد مؤلفه عمودی ذکر شده که برای محاسبه شدت چرخش مورد استفاده قرار می‌گیرد هم جهت با سرعت القايي ناشی از گردابه بالواره اصلی است. این امر باعث کاهش شدت چرخش و در نتیجه مقدار برا می‌شود. در صورتی فاصله از زمین کم شود عکس این حالت اتفاق می افتد و مؤلفه عمودی ذکر شده هم جهت با مؤلفه عمودی سرعت ناشی از جریان آزاد خواهد شد. این شرایط باعث افزایش چرخش لازم و در نتیجه افزایش نیروی برا می‌شود. بهمین ترتیب مطابق شکل (۶) در نسبت ارتفاع ثابت، افزایش زاویه حمله باعث کاهش نسبت برا می‌شود. دلیل این امر نیز در شکل (۸) مشخص شده است.



شکل ۸- اثر زاویه حمله در مجاورت زمین

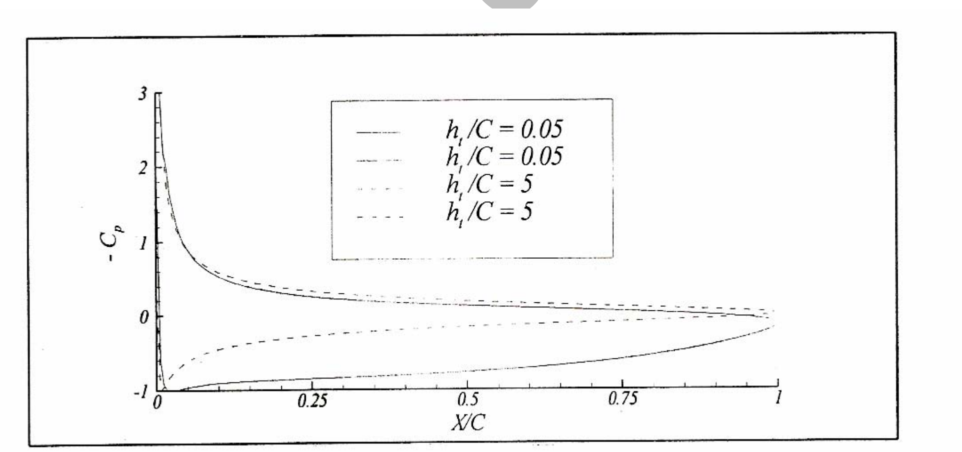
در این شکل یک صفحه تخت در سه زاویه حمله رسم شده است. مطابق شکل فوق در زوایای حمله کم، گردابه تصویر باعث ایجاد یک سرعت القایی روبه بالا در نقطه کنترل و در نتیجه افزایش چرخش می‌شود در حالی که با افزایش زاویه حمله عکس این حالت اتفاق می‌افتد. حتی در زوایای حمله زیاد کاهش فاصله می‌تواند مطابق شکل (۶) بطور پیوسته باعث کاهش نسبت نیروی برا شود. بنابراین در هر زاویه حمله یک نسبت ارتفاع خنثی و به همین ترتیب در هر نسبت ارتفاع یک زاویه حمله خنثی وجود دارد.

یکی دیگر از خواص مهم آیرودینامیکی که در مجاورت زمین تغییر می‌کند مرکز فشار است. این تغییرات در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- اثر زمین بر مرکز فشار صفحه تخت

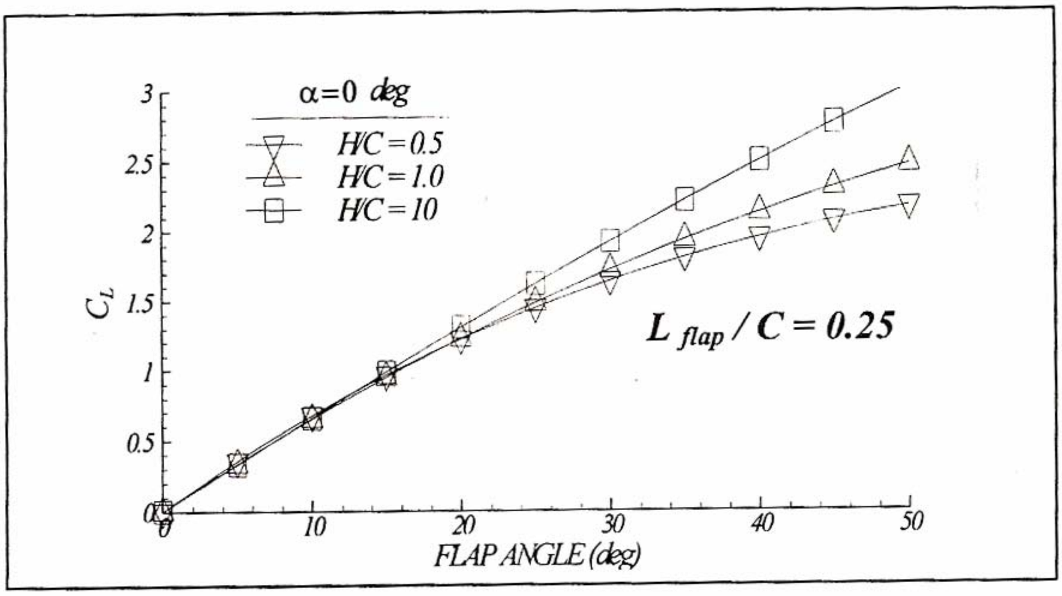
با کاهش فاصله از زمین موقعیت مرکز فشار از مقدار آن در خارج از اثر زمین به سمت عقب منتقل می‌شود. این امر باعث ایجاد مشتقات پایداری جدید درمعادلات حرکت می‌شود که در هنگام فرود و برخاست هواپیماها و همچنین سیستم کنترل وسایل اثر سطحی حائز اهمیت است. برای تجزیه و تحلیل بهتر این مطلب در شکل (۱۰) منحنی توزیع فشار بالا و پایین صفحه در زاویه حمله ۵ درجه در دو ارتفاع متفاوت رسم شده است.



شکل ۱۰- اثر زمین بر توزیع فشار صفحه تخت

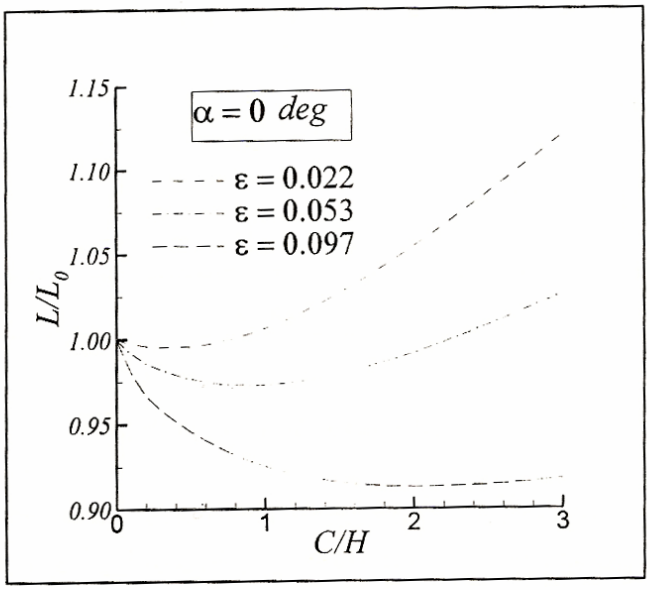
مطابق این شکل با کاهش فاصله از زمین توزیع فشار زیر صفحه یکنواختتر شده ولی در توزیع فشار بالای آن تغییرات زیادی ایجاد نمی‌شود. دلیل این امر آنست که با کاهش فاصله از زمین سرعت سیال در زیر بال کم می‌شود و این امر باعث افزایش بیشتر فشار می‌شود. در واقع دلیل اصلی افزایش نیروی برا با کاهش فاصله از زمین نیز همین است. بهر حال با توجه به نحوه تغییرات توزیع فشار در زیر صفحه دلیل تغییر موقعیت مرکز فشار کاملاً مشخص است.

در شکل (۱۱) اثر بالچه بر مقدار ضریب برای صفحه تخت نشان داده شده است. مطابق نتایج فوق افزایش زاویه بالچه در مجاورت زمین باعث کاهش ضریب برا نسبت به مقدار آن در خارج از اثر زمین می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد که افزایش کوژ نیز در مجاورت زمین باعث کاهش نیروی برا شود.



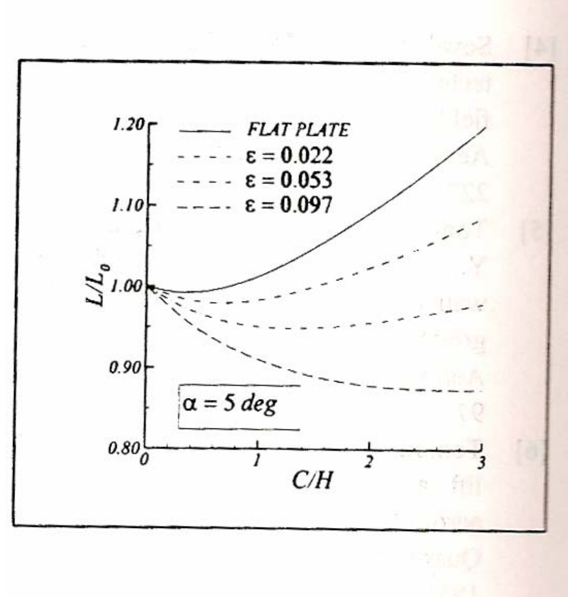
شکل ۱۱- اثر بالچه در مجاورت زمین

برای بررسی این موضوع در شکل (۱۲) منحنی تغییرات نسبت ضریب برا برحسب C/H به ازای کوژهای ۲۲%، ۵۳% و ۹۷% در زاویه حمله صفر درجه ارائه شده است. در این مقادیر کوژ اختلاف بین قطاع سهموی و دایروی قابل صرفنظر کردن است، از اینرو از منحنی $\frac{z(x)}{C}=4\frac{\varepsilon}{C}\left[\frac{x}{C}(1-\frac{x}{C})\right]$ برای تعریف شکل قطاع استفاده شده است.



شکل ۱۲- تأثیر کوژ بر نیروی برا در مجاورت زمین

همانطور که از نتایج مشاهده می‌گردد با افزایش کوژ نسبت نیروی برا کاهش می‌یابد. برای نشان دادن اثر زاویه حمله در این حالت در شکل (۱۳) منحنی تغییرات نسبت ضریب برا برحسب C/H در زاویه حمله ۵ درجه به ازای کوژهای مختلف رسم شده است.



شکل ۱۳- تأثیر کوژ بر نیروی برا در مجاورت زمین

مطابق این شکل در کوژهای کم و در زاویه حمله نسبتاً پایین با کاهش فاصله از زمین (افزایش C/H) نسبت ضریب برا ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این نحوه تغییرات مشابه تغییرات مربوط به صفحه تخت است که بعنوان مقایسه درهمین شکل رسم شده است. برای مقادیر زیاد کوژ با کاهش فاصله از زمین نسبت ضریب برا بطور پیوسته کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر زمین بر خواص آیرودینامیکی یک بالواره نازک در جریان دائمی غیر لزج مورد بررسی قرار گرفته است. این اثرات شامل تأثیر زمین بر مقدار پسای القایی، نیروی برا و مرکز فشار می‌باشند. برای تعیین نیروی برا روش توزیع گردابههای مجزا به حالتی که اثر زمین را دربر گیرد تعمیم داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده، در یک زاویه حمله ثابت با کاهش ارتفاع نسبت نیروی برای بی‌بعد (نسبت به مقدار آن در خارج از اثر زمین) ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. محل تغییر علامت بسته به زاویه حمله متفاوت است ولی می‌توان برای زوایای حمله کمتر از ۵ درجه انتظار داشت که در فواصل کمتر از $H/C=1$ نسبت نیروی برای بیبعد افزایش یابد. بطور کلی افزایش نسبت نیروی برا در زوایای حمله کم و مقادیر کوژ کمتر از ۵% بیشتر مشهود است. در حالی که زوایای حمله زیاد در مجاورت زمین حتی می‌تواند باعث کاهش پیوسته نسبت نیروی برا شود. وجود بالچه در مجاورت زمین باعث کاهش نیروی برا نسبت به مقدار آن در خارج از اثر زمین می‌شود. در کلیه موارد با کاهش فاصله از زمین مرکز فشار بالواره به سمت عقب آن منتقل می‌شود. با رسم و توزیع فشار در بالا و پایین بالواره نشان داده شده است که با کاهش فاصله از زمین توزیع فشار زیر آن یکنواختتر می‌شود در حالی که این تغییر فاصله بر توزیع فشار بالای آن اثر چندانی ندارد.

بطور کلی بهنظر می‌رسد با آنکه زاویه حمله و کوژ بیشتر و وجود بالچه در خارج از اثر سطح (زمین) باعث افزایش نیروی برا می‌گردد ولی مجاورت به سطح (زمین) در اکثر موارد باعث کاهش اثرات آنها نسبت به شرایط دور از سطح (زمین) خواهد شد. بنابراین بر اساس نتایج روش حاضر بهترین شکل بالواره برای پرواز در مجاورت سطح بالوارههای با کوژ و زاویه حمله کمتر و بدون بالچه است. البته باید توجه داشت که در مواردی همچون مرحله برخاست ممکن است مقدار مطلق ضریب (نیروی) برا مهمتر از نسبت نیروی برا به مقدار آن در خارج از اثر سطح باشد.

نمادها

A	ماتریس ضرایب
b	طول دهانه بال
C	طول وتر بال
C_{Di}(IGE)	ضریب پسای القایی در مجاورت زمین
C_{Di} (OGE)	ضریب پسای القایی خارج از اثر زمین
C_{Lg}	ضریب برا در مجاورت زمین
CL	ضریب برا خارج از اثر زمین
C_p	ضریب فشار موضعی
h	ارتفاع نقطهای در ۱,۴ طول وتر نسبت به زمین
h_t	ارتفاع لبه فرار نسبت به زمین
H	ارتفاع نقطهای در وسط طول وتر نسبت به زمین
K_0	شدت گردابه نعل اسبی
L	نیروی برا در مجاورت زمین
L_0	نیروی برا خارج از اثر زمین
n	بردار عمود بر سطح
N	تعداد نقاط کنترلی یا تعداد المانها
S`	طول دهانهٔ تصحیح شده برای گردابه نعل اسبی
u	مؤلفه سرعت افقی ناشی از گردابهها

U_g سرعت تصحیح شده در محل گردابههای بدلیل اثر زمین

U سرعت جریان آزاد

w مؤلفه سرعت عمودی ناشی از گردابهها

W سرعت القايي ناشی از گردابههای بال اصلی

W' سرعت القایی ناشی از گردابههای بال تصویر

x محور افقی مختصات

z محور عمودی مختصات

α زاویه حمله هندسی

α_i زاویه حمله القايي

Γg شدت گردابه در مجاورت زمین

Γ شدت گردابه خارج از اثر زمین

ε ماکزیمم کوژ یک بالواره نسبت به خط وتر آن

Σ علامت جمع

Φ پتانسیل سرعت

مراجع

[1] Wieselsberger, C., Wing resistsnce near the g round, NACA TM-0077, 1922.

[2] carter, A.W., Effect of ground proximity on the aerodynamic characteristics of aspect ratio-1 airfoils with and without end plates, NASA TN-D-970, 1961.

[3] Lockheed, wind tunnel investigations of single and tandem low-aspect-ration wings, Rept. 16906, March 1964, TRECOM TR 63-63, U.S. army transportation research command.

[4] Sowdon A., Hori, T., An experimental technique for accurate simulation of the flow field for wing in surface effect craft. Aeronautical Journal, June-July 1996,PP 215-222.

[5] 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. No. 97, 1933.

[6] Tomotilka, S., Tamada, K., Umemoto, H., The lift and moment acting on a circular are aerofoil in a stream boumded by a plane wall, Quarterly J. mech. Appl. Math., Vol 4, Part 1, 1951, PP 1-22.

[۷] راد، م.و جعفر کاظمی، ف.، بررسی انواع شناورهای تندرو و ارائه طرحی برای یک وسیله اثر سطحی جدید، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس انجمن مهندسین مکانیک ایران، جلد اول، ۲۵ الی ۲۷ فروردین ۱۳۷۸، صفحه ۵۰۱-۵۱۷.

[8] Katz, J., Plotkin, A., Low speed aerodynamics: From wing theory to panel methods, MC Graw-Hill, 1991.

[9] MC. Cormic, Brnes warnoc, Aerodynamics, aeronautics and flight mechanics, wiley, 1979.

[10] Pistotesi, E., Ground effect, theory and practyice, NACA TM-828, 1935.