

# بررسی اثر زوئیه‌ی نصب ملخ و اثرات سه‌بعدی ملخ روی دم یک قایق پرنده در نزدیکی سطح

حسین افشار (کارشناس ارشد)

محمد مهدی علیشاهی (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

برای به دست آوردن اثر جریان ملخ بر روی اجزاء مختلف یک قایق پرنده با توجه به پیچیدگی جریان و ماهیت سه‌بعدی آن با استفاده از روش‌های عددی، معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس حل شده و اثر ملخ روی دم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اثر ملخ روی اجزاء مختلف دم قایق پرنده در پرواز نزدیک سطح کاملاً حائز اهمیت است و نحوه‌ی استقرار ملخ نسبت به دم باید طوری باشد که بتواند گشتاورهای حاصل از اثرات ملخ را حتی‌الامکان خنثی کرده و در عین حال نیروهای برا و پسا در محدوده‌ی مناسب قرار گیرند. با بررسی نتایج به دست آمده، زوئیه و جهت مناسب برای نصب ملخ مشخص شده است. در این نوشتار با به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی، حل جریان حول ملخ و دم قایق پرنده در نزدیکی سطح با کاربرد حدود ۳/۸ میلیون ساؤل توسط ابررایانه‌ی هوازی با تعداد ۶ پردازش‌گر به دست آمده است و اثرات متقابل این دو جزء بررسی و ارائه شده‌اند.

ho-afshar@yahoo.com  
alisha@shirazu.ac.ir

واژگان کلیدی: ملخ، قایق پرنده، ضرایب آیرودینامیکی، اثرات تداخلی، دینامیک سیالات محاسباتی

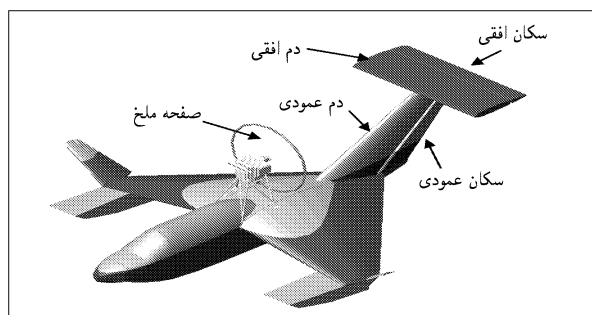
## مقدمه

در بر دارد و علاوه بر استخراج ضرایب آیرودینامیکی، امکان بررسی شرایط مختلف (مانند زوایای حمله‌ی متفاوت، ضرایب آیرودینامیکی قسمت‌های مختلف جسم به تفکیک و همچنین میدان جریان حول کل جسم، توزیع فشار و سرعت و ورتکس‌های ایجاد شده و ...) را نیز ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر دینامیک سیالات محاسباتی ابزار بسیار قدرتمندی است که کلیه‌ی پارامترهای مورد نیاز را می‌توان از آن استخراج نموده، اما برای حل مسائل واقعی باید رایانه‌های قدرتمند با حافظه و سرعت زیاد در دسترس داشت و همچنین مدل‌سازی مناسب از مسئله و شرایط مرزی به صورت صحیح به کار گرفته شود.

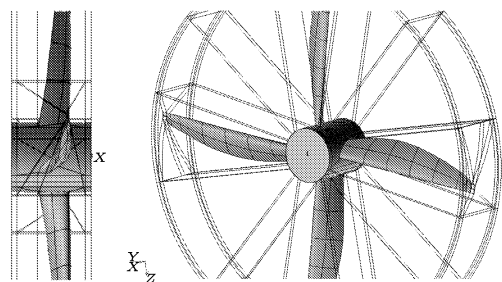
حل عددی جریان ملخ با توجه به پارامترهای زیادی که در این حالت مطرح است تاکنون محدود به قدرت رایانه‌ها بوده و عمده کارهایی که داخل کشور در این زمینه انجام گرفته، محدود به بررسی جریان ریزتور به‌تنهایی است.<sup>[۱]</sup> در سال ۱۹۸۹ با به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی اقدام به حل معادلات ناویر-استوکس برای به دست آوردن میدان جریان حول پره بالگرد شد.<sup>[۲]</sup> در سال ۲۰۰۱ نیز با استفاده از روش اجزاء محدود و شبکه‌ی متحرک اثر تداخلی یک پره متحرک روی یک جسم ثابت مورد بررسی قرار گرفت.<sup>[۳]</sup> در سال ۲۰۰۳، محققین اثرات ملخ در حالت جریان دائمی و غیردائمی را روی بال هواپیما بررسی کردند.<sup>[۴]</sup>

در طراحی اجسام پرنده با شکل پیچیده و برای بهینه‌سازی شکل آنها، تعیین اثرات تداخلی اجزای یکدیگر از اهمیت خاصی برخوردار است. این اثرات تداخلی با توجه به هدف طراحی، می‌توانند مفید یا غیر مفید باشند. برای طراحی مناسب باید اجزای به‌گونه‌ی در کنار یکدیگر قرار گیرند که اثرات تداخلی به‌نحو مثبت ظاهر شوند. برای به‌دست آوردن این اثرات باید یک‌بار هر جزء را به‌تنهایی و بار دیگر در کنار دیگر اجزای بررسی کرد که این کار به‌کمک دینامیک سیالات عددی به‌نحو آسان و کم‌هزینه‌ی قابل انجام است. با توجه به موقعیت قرارگیری ملخ نسبت به دم در قایق پرنده (شکل ۱)، بررسی اثر ملخ روی ضرایب آیرودینامیکی دم و عملکرد پروازی قایق پرنده حائز اهمیت است.<sup>[۵]</sup>

شناورهایی که نزدیک سطح حرکت می‌کنند، اصطلاحاً (Wing in Ground) WIG نامیده می‌شوند. عمده‌تأثیر شناورها نزدیک سطح آب در ارتفاعی پرواز می‌کنند که اثر سطح در آیرودینامیک این اجسام کاملاً نقش مهمی ایفا می‌کند.<sup>[۶]</sup> حل معادلات جریان با توجه به پیچیده‌بودن هندسه‌ی جسم، نیاز به سخت‌افزار رایانه‌ی و شناخت دقیق شرایط مسئله و شرایط مرزی دارد. آزمون‌های تونل باد معمولاً بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند و اعمال تغییرات برای بررسی شرایط مختلف در برخی موارد حتی به سختی امکان‌پذیر است. حل معادلات جریان توسط رایانه، زمان و هزینه‌ی کم‌تری



شکل ۱. شکل کلی قایق پرنده.



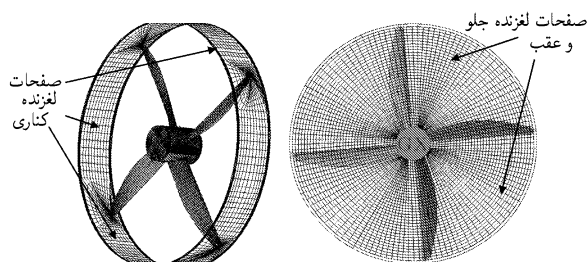
شکل ۲. بلوک‌بندی فضای اطراف ملخ.

شکل کلی قایق پرنده جزو اشکال پیچیده است و برای حل جریان حول آن نمی‌توان فقط از یک شبکه‌ی سازمان‌یافته در یک بلوک استفاده کرد (شکل ۱). در این نوشتار با استفاده از شبکه‌ی چندبلوکی که اکثراً به صورت سازمان‌یافته است، معادلات ناویر-استوکس برای جریان لزج به صورت عددی با استفاده از ۶ رایانه‌ی موازی توسط کد موجود در مرکز محاسبات سریع دانشگاه شیراز حل شده و اثر جریان ملخ روی دم قایق پرنده بررسی شده است.

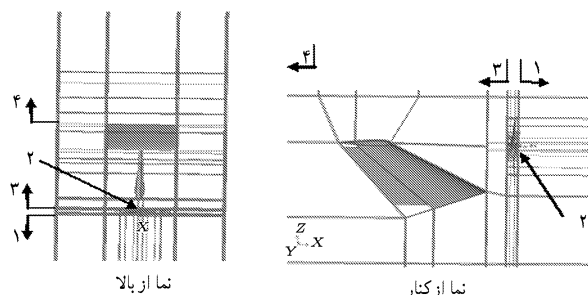
### تولید شبکه

حل جریان چندبلوکی به دلیل وجود صفحات مشترک بین مرز بلوک‌های مجاور مشکلاتی از قبیل کاهش نرخ هم‌گرایی را ایجاد می‌کند.<sup>[۸]</sup> همچنین چنانچه نقاط شبکه‌ی روی مرزهای مشترک کاملاً برهم منطبق نباشند، زمانی که بخواهیم اطلاعات نقاط یک بلوک را در مرز مشترک به بلوک مجاور منتقل کنیم از میانجی‌بندی استفاده می‌شود که این امر باعث ایجاد خطا در حل می‌شود. چنانچه زاویه‌ی خطوط شبکه در مرزهای جامد انحراف زیادی از زاویه‌ی قائمه داشته باشد خطایی متناسب با انحراف زاویه ایجاد می‌شود. بنابراین با توجه به پیچیدگی شکل، نمی‌توان با استفاده از یک بلوک شبکه‌ی مناسبی برای به دست آوردن میدان جریان حول جسم ایجاد کرد. با توجه به موارد فوق باید فضای حل طوری در بلوک‌های مختلف قرار گیرد که نقاط شبکه در مرز بلوک‌های مجاور بر هم منطبق باشند تا نیازی به میانجی‌بندی در این مرزها نباشد. همچنین شبکه در بلوک‌های مختلف باید به نحوی در مرزهای جامد قرار گیرد که شرط تعامد خطوط شبکه در این مرزها تا حد امکان رعایت شده باشد.<sup>[۹]</sup> با توجه به این که ضخامت ایرفویل پره ملخ در ریشه بسیار بیشتر از نوک آن است، و نیز با توجه به پیچش پره و تفاوت فاصله‌ی بین دو پره در ریشه و نوک، باید شبکه با تعداد بلوک نسبتاً زیاد کنترل گردد تا بتوان شبکه‌ی سازمان‌یافته حول پره‌های ملخ را ایجاد کرد (شکل ۲). چون ملخ چرخان و دم ثابت است، دامنه‌ی حل جریان ملخ را به صورت چرخان در نظر گرفته و شبکه‌ی تولیدشده در دامنه‌ی چرخان روی شبکه‌ی تولیدشده برای دامنه‌ی ثابت به صورت صفحات لغزنده روی یکدیگر قرار می‌گیرند (شکل ۳).

به دلیل پیچیده بودن هندسه‌ی جسم و برای به دست آوردن اثرات تداخلی اجزای مختلف جسم پرنده در جریان لزج لازم است حتی الامکان شبکه‌ی سازمان‌یافته در اطراف جسم ایجاد شود. قابلیت‌های بالای شبکه‌ی سازمان‌یافته نسبت به شبکه‌ی بی‌سازمان در این‌گونه جریان‌ها به اثبات رسیده است.<sup>[۱۰]</sup> چنان که ذکر شده برای تولید این نوع شبکه در هندسه‌های پیچیده باید نواحی مختلف را طوری در بلوک‌های جداگانه قرار داد که شبکه در صفحات فاصل بین بلوک‌ها پیوستگی داشته باشد. این قسمت یکی از اصول مهم حل حول اجسام پیچیده است. برای این منظور،



شکل ۳. شبکه‌ی تولید شده روی صفحات لغزنده‌ی کناری، جلو و عقب دامنه‌ی چرخنده.



شکل ۴. بلوک‌بندی مربوط به میدان جریان ملخ و دم.

دامنه‌ی حل جریان شامل ملخ و دم در راستای محور ملخ به چهار ناحیه تقسیم می‌شود (شکل ۴):

۱. دامنه‌ی حل از ابتدا تا رسیدن به ملخ: شبکه در این ناحیه ترکیبی از شبکه‌های سازمان‌یافته و سازمان‌نیافته از نوع  $O$  و  $H$  است.
۲. دامنه‌ی حل حول ملخ: این ناحیه با توجه به چرخان بودن ملخ، از مرزهای اطراف لبه‌ی پره چرخنده‌ی ملخ جدا شده و شبکه ترکیبی از شبکه‌های سازمان‌یافته و سازمان‌نیافته  $O$  و  $H$  است.
۳. دامنه‌ی حل از ملخ تا دم و اطراف دم افقی و عمودی: در این ناحیه شبکه به صورت ترکیبی از شبکه‌های سازمان‌نیافته و سازمان‌یافته از نوع  $H$  است. شبکه‌های غیر سازمان‌یافته‌ی ایجاد شده، در نوک ایرفویل دم عمودی و افقی، و صفحات کنترلی هستند.
۴. شبکه پس از دم افقی و عمودی: در این ناحیه شبکه به صورت سازمان‌یافته از نوع  $H$  است.

در نهایت پس از ایجاد بلوک‌های مناسب حول جسم، باید به اندازه‌ی دامنه‌ی حل را گسترش دهیم که در مرزهای خارجی، اثرات جسم ناچیز بوده و جریان سیال به جریان سیال در بی‌نهایت دور رسیده باشد (شکل ۵). لحاظ کردن نکات فوق زمان

در معادلات فوق  $u, v, w$  به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های  $x, y, z$  هستند و  $\tau_{ij}$  نیز مؤلفه‌های تنش مربوط به تانسور تنش است و داریم:

$$\bar{\tau} = (\mu + \mu_T) \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]$$

که در آن  $\vec{v}$  بردار سرعت کلی و  $I$  تانسور واحد است.

### معادلات $k - \varepsilon$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i} (k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

$$+ C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

$C_1$  و  $C_2$  ضرایب تجربی هستند و  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  نیز اعداد اشمیت و پراوتل آشفته‌اند: [1]

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

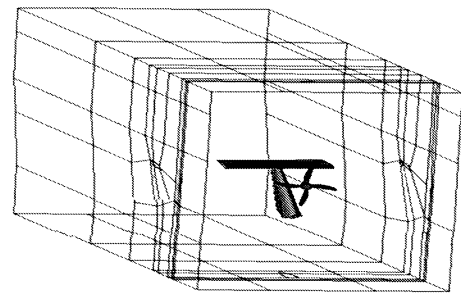
### شرایط مرزی و روش حل

برای حل معادلات حاکم بر مسئله از روش حجم محدود مبتنی بر حجم معیار استفاده می‌کنیم. برای هم‌بسته‌کردن معادلات سرعت و فشار از روش SIMPLE استفاده می‌شود. برای حل معادلات اندازه حرکت و معادلات مربوط به جریان مغشوش از روش Upwind مرتبه اول استفاده می‌کنیم. و برای این‌که حل مسئله با توجه به پیچیدگی شبکه همگرا شود، از زیرتخفیف  $0.3$  برای فشار و  $0.6$  برای اندازه حرکت و  $0.8$  برای معادلات اغتشاش استفاده می‌کنیم. [2]

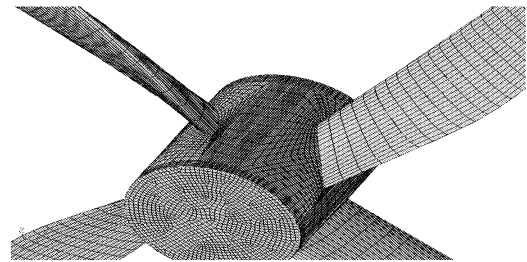
فرض می‌کنیم قایق با سرعت  $30 \text{ m/s}$  در حرکت باشد. سرعت زاویه‌ی چرخش ملخ را نیز  $237$  رادیان بر ثانیه در نظر می‌گیریم. صفحات ابتدایی، بالایی و کناری دامنه را به صورت شرط مرزی سرعت ورودی تعریف کرده و سرعت رزی این صفحات مشخص شده است. شرط مرزی صفحات انتهایی دامنه را نیز معادل با فشار خروجی تعریف کرده و صفحات پایینی به صورت سطح صلب با تنش برشی صفر در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب، فرض می‌کنیم که جریان در انتهای پایین دست شبیه جریان در بی‌نهایت دور باشد. شرط مرزی رزی پره‌ها، هاب، دم عمودی و دم افقی نیز شرط عدم لغزش تعریف شده است. با توجه به این‌که ملخ در حال چرخش بوده و بقیه‌ی دامنه چرخشی ندارد، هوای اطراف ملخ را توسط یک مرز از هوای بقیه‌ی دامنه جدا کرده و معادلات جریان در این محدوده در دستگاه مختصات چرخان حل خواهند شد (شکل ۲).

### مطالعات شبکه‌ی

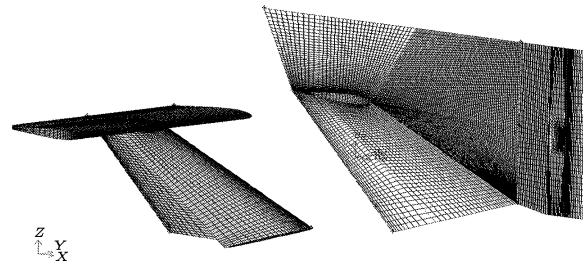
دامنه‌ی اطراف جسم را با تعداد شبکه‌های  $600$  هزار،  $1755$  میلیون،  $2/1$  میلیون و  $3$  میلیون سلولی حل، و نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به شبکه‌های  $600$  هزار و  $1755$  میلیون سلولی اختلاف زیادی با نتایج دیگر دارد



شکل ۵. دامنه‌ی محاسباتی ملخ و دم.



شکل ۶. شبکه‌ی تولیدشده روی هاب و پره‌های ملخ.



شکل ۷. شبکه‌ی ایجادشده روی دم و بخشی از مرز کناری.

زیادی را برای ایجاد بلوک‌ها و شبکه‌ی مناسب حول جسم می‌گیرد. در شکل‌های ۶ و ۷ شبکه‌ی ایجاد شده در چند ناحیه‌ی مختلف نشان داده شده است.

### معادلات حاکم

با توجه به بیشینه سرعت قایق که عدد ماخ آن کم‌تر از  $0.3$  است، جریان را غیر قابل تراکم در نظر می‌گیریم. عدد رینولدز جریان حدود  $10^7$  بوده و جریان مغشوش است. برای مدل‌کردن عبارت‌های ناشی از اغتشاشات در معادلات اندازه حرکت از مدل  $k - \varepsilon$  استفاده می‌کنیم. معادلات غیرزمان‌مند حاکم عبارت‌اند از: معادله‌ی پیوستگی

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

معادله‌ی اندازه حرکت برای دامنه‌ی ساکن

$$\rho \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau})$$

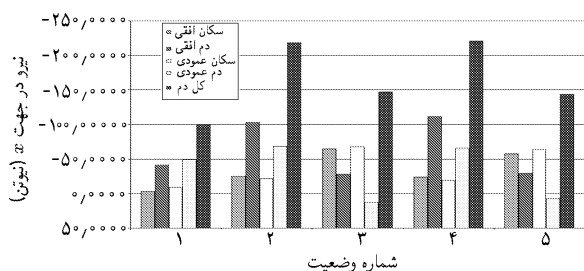
معادله‌ی اندازه حرکت برای دامنه‌ی چرخان با استفاده از روش سرعت مطلق

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \cdot \vec{v}_r) + \vec{\Omega} \times \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}$$

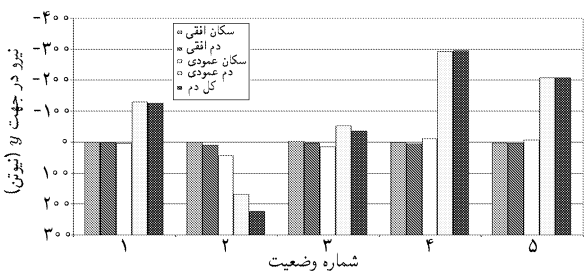
در حالت ۳ و ۵ ملخ در زوئی‌های حمله بوده و زوئی‌های حمله‌ی دم صفر است. در شکل ۹ نیروهای وارد شده بر قسمت‌های مختلف دم در جهت  $x$  در پنج حالت فوق مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با چرخاندن محور ملخ به اندازه‌ی  $27.5^\circ$  و  $-27.5^\circ$  درجه حول محور  $z$  چنانچه حرکت قایق در جهت محور ملخ باشد (حالات ۲ و ۴)، نیروی پسای همگی اجزا افزایش می‌یابد. زیرا در این دو حالت به‌علت این که حرکت در جهت محور ملخ است زوئی‌های حمله‌ی دم با توجه به جهت باد نسبی افزایش می‌یابد. همچنین اگر حرکت در جهت محور طولی قایق پرنده باشد، نیروی پسای سکان عمودی و افقی افزایش می‌یابد ولی نیروی پسای بقیه‌ی اجزا کاهش می‌یابد. تغییرات این نیرو نسبت به چرخش مثبت یا منفی حول محور  $z$  یکسان است. (حالت‌های مختلف نسبت به حالت ۱ سنجیده شده‌اند).

در شکل ۱۰ نیروهای وارده بر قسمت‌های مختلف دم در جهت  $y$  مقایسه شده‌اند. چنان که ملاحظه می‌شود عمده نیروی عرضی وارد شده بر دم، نیروی عرضی است که بر دم عمودی و تا حدودی سکان عمودی وارد می‌شود. در حالت ۱ نیروی عرضی منفی است و با چرخش  $27.5^\circ$  درجه محور ملخ حول محور  $z$  چنانچه حرکت در جهت ملخ باشد (حالت ۲)، این نیرو تغییر جهت داده و ۲ برابر می‌شود. چنانچه حرکت در جهت محور طولی قایق باشد این نیرو، اگرچه مقدار آن کم است، مجدداً منفی می‌شود. با چرخش  $27.5^\circ$  درجه محور ملخ حول محور  $z$  چنانچه حرکت در جهت ملخ باشد، نیروی عرضی در جهت منفی افزایش می‌یابد و حرکت در جهت محور طولی قایق این نیرو را کمی کاهش می‌دهد. با توجه به این که این نیرو بازی بزرگی حول مرکز جرم دارد لذا گشتاور سمت بزرگی ایجاد خواهد کرد.

با توجه به شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که در دو نقطه نیروی عرضی صفر شده است. تنها مولد حرکت قایق پرنده ملخ است و بنابراین حرکت در حالت عادی در راستای محور ملخ است. از طرفی خلبان با منحرف کردن سکان عمودی، حرکت را در راستای طولی نگاه می‌دارد که این امر باعث کاهش نیروی عرضی می‌شود. لذا چنانچه محور ملخ حدود  $1^\circ$  درجه حول محور  $z$  بچرخد، منجر به کمینه شدن نیروی عرضی و حداقل انحراف سکان عمودی خواهد شد که این امر نیز باعث کاهش نیروی پسا می‌شود.



شکل ۹. نیروی وارد بر اجزای دم در جهت  $x$  در پنج حالت مختلف.



شکل ۱۰. نیروی وارد بر اجزای دم در جهت  $y$  در پنج حالت مختلف.

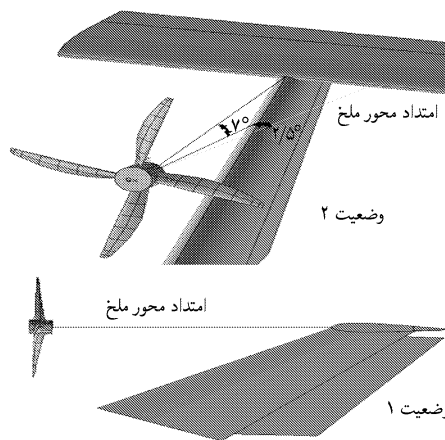
ولی نتایج حاصل از شبکه‌های  $27.1^\circ$  و  $3^\circ$  میلیون سلولی اختلاف بسیار کمی با هم دارند. به دلیل این که برای مدل کردن جریان معشوش از مدل  $k = \varepsilon$  استفاده شده است، لذا در شبکه‌ی ۳ میلیونی طوری نقاط شبکه به مرزهای جسم نزدیک شده که  $y^+$  روی دیواره‌ها بین  $30^\circ$  تا  $600^\circ$  باشد. بدین ترتیب اولین نقطه‌ی شبکه در ناحیه‌ی اغتشاش کامل واقع شده و توزیع سرعت لگاریتمی (قانون دیواره) برای اعمال شرایط مرزی به کار می‌رود. بنابراین برای حل میدان جریان، نتایج شبکه‌ی ۳ میلیون سلولی ملاک است.

## بررسی نتایج

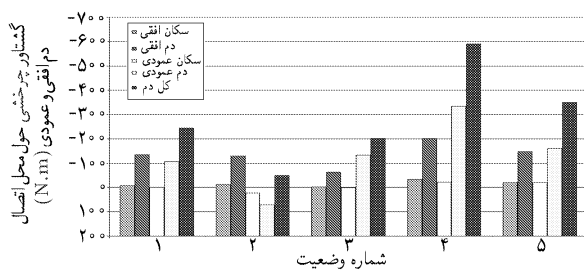
جهت مثبت محور  $x$  در راستای محور طولی و در جهت حرکت قایق پرنده، جهت مثبت محور  $y$  به سمت چپ خلبان، و جهت مثبت محور  $z$  به سمت بالا است. جهت چرخش ملخ نیز هنگامی که از روبرو به ملخ نگاه می‌کنیم در جهت چرخش عقربه‌های ساعت است (ملخ چپگرد). از این پس معیار دست چپ و راست را نسبت به جهت مثبت محور  $x$  می‌سنجیم. نتایج در پنج حالت زیر ارائه می‌شود:

۱. امتداد نیروی پیش‌برنده یا امتداد مرکز ملخ تا محل تقاطع دم افقی و دم عمودی (محور وسیله) هیچ‌گونه زوئی‌بندی نداشته باشد.
۲. امتداد نیروی پیش‌برنده  $7^\circ$  درجه به سمت پایین و  $27.5^\circ$  درجه به سمت چپ زوئی داشته و حرکت قایق در امتداد ملخ باشد.
۳. امتداد نیروی پیش‌برنده  $7^\circ$  درجه به سمت پایین و  $27.5^\circ$  درجه به سمت چپ متمایل بوده و حرکت قایق در جهت دم باشد.
۴. امتداد نیروی پیش‌برنده  $7^\circ$  درجه به سمت پایین و  $27.5^\circ$  درجه به سمت راست زوئی داشته و حرکت قایق در جهت ملخ باشد.
۵. امتداد نیروی پیش‌برنده  $7^\circ$  درجه به سمت پایین و  $27.5^\circ$  درجه به سمت راست زوئی داشته و حرکت قایق در جهت دم باشد.

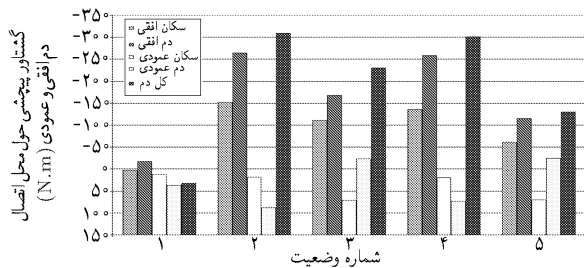
در شکل ۸ دو وضعیت مختلف نصب ملخ نشان داده شده است. وضعیت سوم برای نصب ملخ همانند وضعیت دوم است با این تفاوت که انحراف ملخ  $27.5^\circ$  درجه به سمت چپ است. در حالت ۱ ملخ و دم نسبت به جریان آزاد در زوئی‌های حمله نبوده، در حالت ۲ و ۴ ملخ در زوئی‌های حمله نبوده و دم زوئی‌های حمله دارد.



شکل ۸. دو وضعیت مختلف نصب ملخ.



شکل ۱۲. گشتاور چرخشی وارد بر اجزای مختلف دم در پنج حالت مختلف.



شکل ۱۳. گشتاور پیچشی وارد بر اجزای مختلف دم در پنج حالت مختلف.



شکل ۱۴. گشتاور سمت وارد بر اجزای مختلف دم در پنج حالت مختلف.

## نتیجه‌گیری

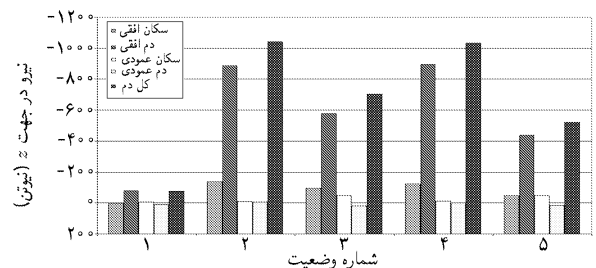
وقتی محور ملخ را ۷ درجه به سمت پایین و ۲٫۵ درجه حول محور z- بچرخانیم و حرکت قایق در جهت دم باشد، ملخ در زاویه حمله قرار می‌گیرد ولی زاویه حمله‌ی دم صفر است. در این حالت پسای دم حدوداً به میزان ۵٪ افزایش می‌یابد که این امر به علت این است که دم نسبت به مؤلفه‌ی سرعت محوری جریان ملخ در زاویه حمله است و زاویه حمله‌ی دم با توجه به یاد نسبی صفر نیست. البته در حالت اول، یعنی دم در حضور ملخ با زاویه حمله‌ی نصب صفر درجه نیز به علت جریان پیچشی ملخ باز هم زاویه حمله‌ی دم صفر نیست. ولی در حالت دوم، زاویه حمله افزایش قابل توجهی خواهد داشت. گشتاور حول محور z نیز افزایش می‌یابد. اگر حرکت قایق در جهت محور ملخ باشد (حالت ۲)، که در عمل نیز چون تراست ملخ تنها نیروی پیش‌رانش قایق برنده، و در راستای محور ملخ است، چنین است لذا نیروی «برای»ی دم در جهت منفی نسبت به حالت اول حدود ۱۴ برابر شده است که این امر برای تنظیم<sup>۲</sup> مناسب است. گشتاور سمت در این حالت منفی بوده و مقدار آن نیز نسبت به وقتی که حرکت در جهت دم باشد به میزان حدود ۷۰٪ کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که می‌توان ملخ را کم‌تر از ۲٫۵ درجه چرخاند. در این صورت هم گشتاور سمت کاملاً خنثی شده و هم راستای حرکت قایق برنده نسبت به محور طولی آن انحراف کم‌تری خواهد داشت.

در شکل ۱۱ نیروهای وارده بر قسمت‌های مختلف دم در جهت z مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، همه‌ی اجزا به جز دم عمودی در همه‌ی حالات نیروی «برای»ی منفی تولید می‌کنند که عمده‌ی این نیرو سهم دم افقی و تا حدودی سکان افقی است. چرخش ملخ باعث افزایش نیروی برا در جهت منفی می‌شود. چنانچه ملخ بچرخد و حرکت در جهت محور ملخ باشد، جهت دوران حول محور z مهم نیست ولی اگر حرکت در جهت محور طولی قایق برنده باشد «برای»ی منفی تولید شده نسبت به زمانی که حرکت در راستای محور ملخ است کم‌تر خواهد بود. چرخش ۲٫۵- درجه حول محور z، نیروی «برای»ی منفی بیشتری نسبت به چرخش ۲٫۵+ درجه تولید می‌کند. این امر به علت متفاوت بودن زاویه‌ی برخورد باد نسبی ناشی از جریان ملخ در دو حالت است.

در شکل ۱۲ تغییرات گشتاور حول محور x نسبت به محل اتصال دم افقی و عمودی نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود دم افقی و عمودی سهم عمده‌ی در تولید گشتاور چرخشی دارند. حداقل گشتاور چرخشی در اثر لغزش آبرفتی<sup>۱</sup> ملخ زمانی اتفاق می‌افتد که ملخ ۷- درجه حول محور y و ۲٫۵- درجه حول محور z چرخیده باشد.

در شکل ۱۳ تغییرات گشتاور حول محور y نسبت به محل اتصال دم افقی و عمودی نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود تغییرات گشتاور پیچشی دم عمودی، خلاف تغییرات بقیه‌ی اجزا است و اثر آنها را خنثی می‌کند. نکته‌ی جالب توجه این است که چنانچه دم را بدون اثر ملخ در نظر بگیریم، اثرات تداخلی قسمت‌های مختلف دم طوری است که گشتاور پیچشی منفی ایجاد کرده و باعث می‌شود که دماغه‌ی قایق برنده به سمت بالا متمایل شده و برخاستن قایق از سطح آب آسان‌تر شود.<sup>۱۳</sup> حضور ملخ بدون انحراف محور آن، گشتاور پیچشی مثبت تولید می‌کند و انحراف محور ملخ به سمت پایین باعث ایجاد گشتاور پیچشی منفی شده است. چنانچه قایق از سطح فاصله بگیرد آنگاه این گشتاور پیچشی منفی تر شده و چنانچه اثر ملخ قوی باشد به طوری که سطوح کنترلی نتوانند این گشتاور را خنثی کنند، دماغه‌ی قایق بالا رفته و واژگون خواهد شد. در صورتی که واژگون نشود باز هم به علت انحراف زیاد سطوح کنترلی نیروی پسا افزایش خواهد یافت. بنابراین بهترین حالت نصب ملخ برای این که گشتاور پیچشی کنترل شود این است که محور ملخ بتواند در حین حرکت یا افزایش فاصله از سطح به سمت بالا منحرف شود.

در شکل ۱۴ تغییرات گشتاور حول محور z نسبت به محل اتصال دم افقی و عمودی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تغییرات گشتاور سمت دم عمودی خلاف تغییرات بقیه‌ی اجزا است و همچنین دم عمودی سهم عمده‌ی در تولید این گشتاور دارد. کمینه‌ی گشتاور سمت مربوط به حالت دوم است - یعنی وقتی که ملخ نسبت به محل تقاطع دو دم ۷ درجه به سمت پایین و ۲٫۵ درجه به سمت چپ بوده و حرکت قایق در جهت ملخ است.



شکل ۱۱. نیروی وارد بر اجزای دم در جهت z در پنج حالت مختلف.

## یادداشت

1. slip stream
2. Trim

## منابع

1. M.R. Sadeghizadeh and M. Hemayati, "Flying Boat", Malekeashtar University press, (2005).
2. N.Kornev and K.Matveev, "Complex numerical modeling of dynamic and crashes of wing-in-ground vehicles", 41 st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 6-9 January 2003, Reno, Nevada, AIAA 2003-600
3. K. Mansour and H. Mohamadkhani, "Numerical analysis of fluid flow around the rotor of a helicopter in forward flight", ISME Mashhad (2003).
4. M.H. Javareshkian and M. Saidi, "Numerical analysis of aerodynamic forces and their stress effects on blade of the rotor of a helicopter", M.S. thesis, Tabriz University, (2002).
5. Wake, B.E and Sankar, L.N. "Solution of navier-stokes equations for the flow over a rotor blade", it Journal of the American Helicopter Society, (April 1989).
6. Tezduyar, T.E. "Finite element methods for flow problems with moving boundaries and interfaces", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **8**, pp. 83-130 (2001).
7. Bousquet, J.M. and Gardarein, P. "Improvements on computations of high speed propeller unsteady aerodynamics", *Aerospace Science and Technology*, **7**, pp. 465-472 (2003).
8. Zhu, B.; Chi, X.; Shih, T. I-P. and Slater, J.W. "Computing aerodynamic performance of 2D iced airfoils blocking strategy and convergence rate", *AIAA*, p. 3049 (2002).
9. Radespiel, R. "Grid generation around wing-body-combinations using a multi-block structured computational domain", DLR-IB 129-87/16, DLR Institute of Design Aerodynamics (1987).
10. Rakowitz, M. and Eisfeld, B. "Structured and unstructured computations on the DLR-F4 wing-body configuration", *Journal of Aircraft*, **40**(2), (March-April 2003).
11. Fluent Inc. User's Manual, Chapter 9, "Turbulence modeling", (1998).
12. Majumdar, S. "Role of under relaxation in momentum interpolation for calculation of flow with nonstaggered grids", *Numer. Heat Transfer*, **13**(1), pp. 125-132 (January 1988).
13. H. Afshar, M.M. Alishahi, "Study of flow field around a flying boat in fress flight regarding to propeller effects on tail", M.S. thesis, Shiraz University, (2005).