مطالعه انواع رهیافت‌های ترکیبی LES/RANS

محمد طیبی رهنی [۱]
دانشکده مهندسی هوافضا
دانشگاه صنعتی شریف

سید روح اله قدسی [۲]
گروه مهندسی هوافضا
دانشکده فنی مهندسی
دانشگاه آزاد اسلامی- واحد گرمسار

سید مهدی شیخ الاسلام نوری [۳]
دانشکده مهندسی هوافضا
دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۲۳ / ۸ / ۱۳۸۹ تاریخ پذیرش:۱۰ / ۱۱ / ۱۳۸۹

چکیده

پدیده‌ای که در بسیاری از جریان‌های کاربردی اتفاق می‌افتد، آشفتگی است. بدلیل محدودیت در حافظه و سرعت محاسباتی، نمی‌توان از حل مستقیم معادلات در موارد پیچیده بهره برد. از سوی دیگر، برای شبیه‌سازی جریان آشفته از رهیافت‌های LES و RANS که از حجم محاسباتی کمتری برخوردار هستند، بیشتر استفاده می‌شود. البته، در جریان‌های پیچیده و با اعداد رینولدز بالا، استفاده از رهیافت LES می‌تواند بسیار زمان‌بر باشد. رهیافت ترکیبی رهیافتی است که دقت بالای LES و حجم کم محاسباتی RANS را در کنار هم دارا می‌باشد و بنابراین از این رهیافت در حل جریان‌های پیچیده می‌توان استفاده نمود. هدف از این مقاله بررسی انواع رهیافت‌های ترکیبی است که برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی جریان آشفته، رهیافت ترکیبی LES/RANS

Study of Different Types of Hybrid LES/RANS Approach

M. Taiebi-Rahni [3]
Aerospace Eng. Dep't.
Sharif univ. of Tech.

S. Rohollah Ghodsi [2]
Aerospace Eng. Group
school of Eng.
Islamic Azad Univ.- Garmsar Branch

S. Mahdi Sheikholeslam-Noori [3]
Aerospace Eng. Dep't.
Sharif Univ. & Tech.

ABSTRACT

Turbulence is a phenomenon occuring in many flows. Because of the limitations of memory and computational speed, direct numerical simulation of governing equations can not be implemented in complex situations. On the other hand, the LES and RANS approaches are used more because of their less computational costs. However, in complex problems and also in high Reynolds number flows, LES simulation takes too much CPU time. The hybrid approaches combine the advantages of both LES and RANS, i.e. the accuracy of LES and low numerical effort of RANS. and thus approach can effectively be used in simulation of complex flows. The purpose of this article is to investigate different types of Hybrid LES/RANS approaches used to simulate turbulent flows.

Keywords: Turbulence Modeling, Hybrid LES/RANS Approach

[۱] استاد (نویسنده پاسخگو): taeibi@sharif.edu
[۲] استادیار: roholahghodsi@gmail. com
[۳] کارشناس ارشد: sheikholeslammahdi@yahoo. com

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

پدیده‌ای که در بسیاری از جریان‌های کاربردی اتفاق می‌افتد، پدیده‌ی آشفتگی است. رهیافت‌های مختلفی برای شبیه‌سازی چنین جریانی وجود دارد. جریان‌های آشفته خاصیت طیفی دارند، به این مفهوم که مقیاس‌های سرعت، زمان و طول در یک گستره‌ی معین از ریزترین ابعاد (در حد ابعاد کلموگروف) تا بزرگترین ابعاد هندسی مسئله توزیع شده‌اند.

روش DNS [۱]، برای شبیه سازی جریان‌های آرام و آشفته قابل استفاده است. اما، عملا با توجه به سرعت محاسبات و حافظه‌ی کامپیوترهای امروزی این روش قابل اجرا برای جریان‌های آشفته نیست. همچنین غیر خطی بودن سیستم آشفته نیز می‌تواند اعتبار کدهای DNS را خدشه دار کند.

رهیافت دیگری که قابل استفاده برای شبیه‌سازی جریان آشفته است رهیافت LES [۲] نام دارد. این رهیافت به اختصار در قسمت‌های بعدی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. مشکل عمده‌ی این روش محاسبات در نزدیکی دیواره است.

وابستگی اندازه‌ی شبکه در نزدیکی دیواره به عدد رینولدز افزایش می‌یابد و نیاز به شبکه‌ای بسیار ریز برای محاسبه‌ی مقیاس‌های جریان است و بنابراین، با اعمال روش LES حجم محاسبات بالا خواهد بود.

رهیافت دیگری که برای شبیه‌سازی جریان می‌توان استفاده کرد رهیافت RANS [۳] است. این رهیافت برای محاسبه‌ی اغتشاشات حاکم بر جریان مناسب نیست و خواص میانگین باید ایستگاهی باشند. هزینه‌ی محاسباتی RANS کمتر از LES و DNS می‌باشد اما دقت آن پایین است. محققین همواره به دنبال رهیافتی هستند که بتوان از طریق آن با هزینه‌ی کم و دقت بالا، جریان آشفته را مدل کرد. امروزه توجه به رهیافت ترکیبی LES/RANS [۴] بسیار زیاد شده است و عملاً رهیافتی می‌باشد که می‌تواند با هزینه‌ی کمتر از LES و DNS و با دقت بالا جریان را شبیه‌سازی کند.

هدف از ارائه این مقاله مطالعه و بررسی رهیافت ترکیبی و انواع آن است. ابتدا به صورت مقدماتی رهیافت‌های LES و RANS مورد مطالعه قرارمی‌گیرند. سپس معرفی و تقسیم‌بندی روش ترکیبی LES/RANS بیان می‌شود.

شاخه‌های مختلف این تقسیم‌بندی در ادامه مطالعه می‌شوند و در بخش آخر نیز سه نمونه از کاربردهای این رهیافت در جریان‌های پیچیده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- رهیافت‌های پایه

معادله‌ی حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر، ایزوتروپیک، با فرض سیال نیوتنی و با صرف نظر از نیروهای حجمی به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\mathrm{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}, \qquad (۲)$$

که در آن، x_i مختصات مکانی و u_i مولفه‌های سرعت، p فشار استاتیک و Re عدد رینولدز است. این معادلات در فرم بی‌بعد شده می‌باشند و به ترتیب معادله ی بقای جرم و بقای اندازه ی حرکت نامیده می شوند.

معادلات (۲-۱) اختصاص به رژیم خاصی از جریان ندارند و کاملا کلی هستند اما، به دلیل محدودیت‌های حاکم بر سرعت و حافظه‌ی کامپیوترهای فعلی نمی‌توان این معادلات را در جریان‌های آشفته و یا گذر با عدد رینولدز بالا حل کرد. میانگین‌گیری کمیت‌ها در رژیم جریانی آشفته راه‌حلی است که برای شناسایی ساختار حاکم بر جریان از آن استفاده می‌شود. میانگین‌گیری کمیت می‌تواند به صورت مکانی یا زمانی انجام شود. در این قسمت بازنویسی معادلات حاکم با به کارگیری هر دو رهیافت و مزایا و محدودیت‌های آنها مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲-۱- رهیافت RANS

رهیافت RANS در مواردی که میانگین خواص سیال با زمان تغییر نکند، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. میانگین گرفتن از کمیت‌ها و جایگزین نمودن آنها با مقادیر اصلی در معادلات حاکم باعث می‌شود که حجمی از محاسبات کاسته

---

[۱] Direct Numerical Simulation
[۲] Large Eddy Simulation
[۳] Reynolds Averaged Navier-Stokes
[۴] Hybrid LES/RANS Approach

Archive of SID

www.SID.ir

شود و بتوان از مدل‌سازی برای تخمین مجهولات استفاده نمود. میانگین‌گیری در رهیافت RANS به صورت زمانی زیر تعریف می‌شود:

$$\left\langle \varphi(x_i) \right\rangle = \lim \frac{1}{\Delta t} \int \varphi(x_i, t)\, dt, \qquad (۳)$$

که در آن، ϕ کمیتی است که میانگین‌گیری می‌شود و $\langle \phi \rangle$ مقدار میانگین را نشان می‌دهد. کران انتگرال در (۳) از t تا $t+\Delta t$ می‌باشد. اعمال این میانگین‌گیری نوسانات حاکم بر جریان را به طور کامل از بین می‌برد و به همین دلیل هرچه بازه‌ی زمانی بزرگتر باشد، حل دقیق‌تر خواهد بود.

اولین گام در بدست آوردن معادلات RANS جداسازی هر کمیت به مقادیر میانگین $\langle \phi \rangle$ و اغتشاشی ϕ' است:

$$\varphi(x_i, t) = \left\langle \varphi(x_i) \right\rangle + \varphi'(x_i, t). \qquad (۴)$$

اعمال جداسازی رینولدز بر معادلات حاکم بر جریان و میانگین‌گیری از آن ها منجر به معادلات حاکم بر RANS می شود:

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0, \qquad (۵)$$

$$\langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\mathrm{Re}} \left(\frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j \partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij\,(RANS)}}{\partial x_j}. \qquad (۶)$$

عبارت $\tau_{ij(RANS)}$ تنش رینولدز نامیده می‌شود که بدلیل غیرخطی بودن ترم جابجایی در معادله‌ی (۲) ایجاد شده‌است و در نتیجه مسئله با مشکل بسته بودن روبرو می‌گردد، به این مفهوم که تعداد معادلات و مجهولات حاکم بر جریان برابر نیست. این ترم برای بر طرف کردن مشکل یاد شده، باید مدل شود که در این قسمت از مدل‌هایی چون k-ε یا k-ω می‌توان استفاده برد.

مزیت روش RANS را می توان به صورت زیر برشمرد:

۱. تخمین مقدار میانگین با دقت بالا،

۲. حجم محاسباتی کم.

روش RANS در جریان سیال که تحت ادی‌های بزرگ غیرایزوتروپیک قرار گیرد قابل اعمال نمی‌باشد و باید از روش URANS استفاده کرد که در مراجع [۲-۱] در مورد آن توضیحاتی داده شده است.

۲-۲- رهیافت LES

جریان آشفته از نظر مقیاس به دو ناحیه‌ی کلی مقیاس‌های کوچک و مقیاس‌های بزرگ تقسیم می‌شود. رهیافت LES ناحیه‌ی مقیاس کوچک را مدل می‌کند و ناحیه‌ی مقیاس بزرگ به طور مستقیم حل می‌شود. این رهیافت بر اعمال فیلترها استوار است. اگر فیلتر فضایی G به متغیر ϕ اعمال شود، مقیاس‌هایی که کمتر از پهنای فیلتر هستند، حذف می گردند و مقدار میانگین مکانی بدست می‌آید. اپراتور میانگین‌گیری در روش LES بر خلاف روش RANS غیر خطی است و در نتیجه در حالت کلی دو بار فیلتر گیری مکانی از یک کمیت برابر با فیلتر مکانی آن نیست .

معادلات (۸-۷)، معادلات حاکم بر LES هستند.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\mathrm{Re}} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij(LES)}}{\partial x_j} \qquad (۸)$$

پارامتر $\tau_{ij(LES)}$ عنوان مقیاس زیرشبکه (SGS) را دریافت می کند. ترم اضافه شده مانند رهیافت RANS، حاصل ترم غیرخطی انتقال است. مقیاس‌هایی که از پهنای باند فیلتر Δ_f کمتر هستند، توسط این ترم مدل می‌شوند. بنابراین هرچه Δ_f کمتر باشد، روش دقیق‌تر است. نسبت پهنای فیلتر به اندازه‌ی شبکه (Δ_g) برابر ۱ یا مقدار کمتری قرار داده می‌شود. هدف از قراردادن $\Delta_f \sim \Delta_g$ این است که چنانچه شبکه ریزتر شود، حد حذف کردن مقیاس‌های ریز به سمت عدد موج های بزرگتر برود و از این مزیت که هر چه شبکه ریزتر می شود مقیاس‌های ریزتری به طور مستقیم محاسبه گردند استفاده ی بهینه شود. بیان اندازه‌ی Δ_g به روش‌های مختلفی قابل انجام است. برای مثال در فرمول (۹) از روش توان سوم حجم سلول استفاده شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

$$\Delta_g = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (۹)$$

روابط (۱۱-۱۰) نیز به صورت زیر برای تعیین اندازه‌ی شبکه استفاده می‌شوند:

$$\Delta_g = (\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2)^{1/2} / 3, \quad (۱۰)$$

$$\Delta_g = \max [\Delta x, \Delta y, \Delta z]. \quad (۱۱)$$

مزیت روش LES این است که مقیاس‌هایی که مدل می‌شوند، رفتار کلی دارند و بنابراین مدل‌های SGS کمتر به هندسه وابسته هستند و خطای ناشی از بدست آوردن پارامترهای ثابت مدل از طریق انجام آزمایش به کمترین حد می‌رسد. اما، هزینه و حجم محاسباتی روش LES نسبتا زیاد است و از این نظر بعد از DNS قرار می‌گیرد. هزینه‌ی LES ۱۰ تا ۱۰۰ برابر RANS برآورد می شود [۱]. رهیافت LES نیاز به شبکه‌ی ریزتری نسبت به RANS دارد. این رهیافت از مزیت تقارن جریان در فضا نمی‌تواند بهره‌مند شود و مقدار میانگین جریان را با میانگین‌گیری کردن از جریان ناپایا که در گام‌های زمانی کوچک، در مدت طولانی حل می‌شود، بدست می دهد [۱].

استراتژی اصلی در رهیافت LES حل مستقیم بیشتر انرژی جنبشی آشفتگی جریان و مدل کردن بیشتر مقادیر اضمحلال است. دلیل این امر مرتبط بودن انرژی جنبشی آشفتگی به مقیاس‌های بزرگ و نرخ اضمحلال با مقیاس کوچک است. حداقل ۸۰٪ انرژی جنبشی باید حل شود که بتوان نتایج قابل قبول بدست‌آورد [۲].

۲-۳- مقایسه‌ی معادلات LES و RANS

روش ترکیبی از مزیت حجم پایین محاسبات RANS و دقت LES در محاسبه‌ی بخش اغتشاشی هر کمیت به طور همزمان بهره می‌برد. حل معادلات LES و RANS کنار یکدیگر بدلیل تشابه در ساختار آنها است. اما، این معادلات یک تفاوت بزرگ دارند که در ترکیب کردن این دو رهیافت اثر چشمگیری می‌گذارد. کمیتی که در روش RANS مدل می‌شود تنها به عوامل فیزیکی حاکم بر جریان مانند انرژی جنبشی یا نرخ اضمحلال بستگی دارد در حالی که، در روش LES علاوه بر وابستگی به این پارامترها وابستگی به مقیاس شبکه نیز وجود دارد [۱].

۳- رهیافت های ترکیبی

همانگونه که در قسمت قبل بیان شد روش LES پرهزینه می‌باشد (نسبت به RANS). اما، دقت آن در حل اغتشاشات بالا است. هدف از حل جریان آشفته، بدست آوردن میانگین جریان و در گام بعد محاسبه‌ی اغتشاشات می باشد [۱].

رهیافت ترکیبی روشی است که با آمیختن LES و RANS می‌تواند مزیت‌های حجم کم محاسباتی RANS و دقت LES را به طور همزمان دارا باشد. روش ترکیبی در حقیقت بر این ایده استوار است که، در ناحیه یا بخشی که بدست آوردن اغتشاشات لازم باشد، یا پیچیدگی‌هایی که باعث ناپایا شدن جریان می‌شوند وجود دارد، از رهیافت LES و در نواحی‌ای که رهیافت RANS معتبر است، از این رهیافت استفاده می‌شود. بنابراین، LES تنها جایی استفاده می‌شود که نیاز به محاسبات با دقت بالا وجود دارد.

روش‌های ترکیبی به طور کلی به دو دسته تقسیم میشوند:

۱. مدل‌های یکپارچه[۱] و

۲. مدل‌های مجزا شده[۲].

مدل‌های یکپارچه مدل‌هایی هستند که در اثر شباهت ساختاری معادلات LES و RANS حاصل می‌شوند. در این روش معادله‌های انتقال یکسانی برای کمیت میانگین‌گیری شده در کل میدان استفاده می‌شود و این معادله در نواحی مورد نیاز از LES به RANS انتقال می‌یابد. معادله‌ای که در کل میدان حل می‌شود، به صورت رابطه ی (۱۲) است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \upsilon \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}^{model}}{\partial x_j} \quad (۱۲)$$

مدل‌های مجزا بر خلاف مدل‌های یکپارچه هستند. معادلات LES در یک ناحیه و معادلات RANS در ناحیه‌ی باقیمانده اعمال می‌شوند. کمیت حل شده، در این رهیافت،

[۱] Unified Models
[۲] Segregated Models

Archive of SID
www.SID.ir

در نواحی بین مرز دو ناحیه، پیوسته نخواهد بود. معادلات RANS و LES مربوط در هر زیر ناحیه حل و با شرایط مرزی مناسب کوپل می‌شوند.

مدل‌های یکپارچه به دو دسته زیر تقسیم می گردند:

۱. مدل‌های توربولانس ترکیبی[۱]،

۲. مدل‌های دارای مرز مشترک LES و RANS[۲].

اساس روش‌های ترکیبی مدل جمع وزنی LES و RANS بصورت زیر است:

$$\tau_{ij(model)} = f_{(RANS)}\tau_{ij(RANS)} + f_{(LES)}\tau_{ij(LES)}, \quad (۱۳)$$

که در آن، $f_{(RANS)}$ و $f_{(LES)}$ ضرایب محلی ترکیبی بوده و بر اساس معیارهای خاصی تعیین می شوند.

استراتژی مدل‌های دارای مرز مشترک LES و RANS (با توجه به مرجع [۲] مدل دولایه‌ای) به این صورت است که در یک لایه مدل LES و در لایه‌ی دیگر مدل RANS به کار برده می‌شود. مرز بین ناحیه‌ی LES و RANS در هر گام محاسباتی تعیین خواهد شد. معادله‌ی انتقال یکسانی در هر ناحیه نوشته می‌شود، در نتیجه کمیت‌های محاسبه شده پیوسته خواهند بود. دو نوع مرز مشترک قابل تعریف است: چنانچه این مرز در طول زمان حل ثابت باشد مرز مشترک سخت[۳] و اگر در طول فرایند حل تغییر کند مرز مشترک نرم[۴] نامیده می شود.

۴- مدل‌های آشفتگی ترکیبی

یکی از راه‌های ترکیب معادلات LES و RANS رهیافت مدل‌های ترکیبی است. این روش‌ها به دو مدل تقسیم میشوند:

۱. میرا کردن یک مدل RANS,

۲. جمع وزنی دو مدل RANS و LES .

۴-۱- میراکردن یک مدل RANS[۵]

این رهیافت دقیقاً یک رهیافت LESمطلق و یا یک رهیافت RANS نیست و به همین دلیل، در مرجع[۱] به نقل از اسپزیال[۶] این مدل را مدل FSM می‌نامند.پارامتر $\tau_{ij(model)}$ در این رهیافت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_{ij(model)} = f_\Delta(\Delta/l_k)\tau_{ij(RANS)}. \quad (۱۴)$$
$$0 \le f_\Delta \le 1$$

این مدل از دو قسمت کلی تشکیل شده است:

۱. مدل RANS که تنها وابسته به کمیت ها و متغیر های فیزیکی است و

۲. تابع توزیع $f_\Delta(\Delta/l_k)$.

f_Δ عمل میراکردن توزیع مدل RANS را به این ترتیب انجام می دهد که، در یک شبکه‌ی کاملاً ریز مدل خاموش شده و در شبکه ای درشت حل به سمت رهیافت RANS میل خواهد کرد. کمیت Δ/l_k نیز فاصله‌ی مدل تا DNS را نشان می‌دهد. Δ اندازه‌ی شبکه و l_k به پیشنهاد اسپزیال مقیاس کلموگروف بصورت زیر است:

$$l_k = \upsilon^{3/4}/\varepsilon^{1/4}, \quad (۱۵)$$

که در آن، ε نرخ اتلاف انرژی است. مدل RANS با توجه به روابط (۱۴) و (۱۵) ، برای محاسبه‌ی $\tau_{ij(RANS)}$ و l_k استفاده می‌شود.

مرجع [۱] برای $f_\Delta(\Delta/l_k)$ توزیع زیر را پیشنهاد کرده است:

$$f_\Delta(\Delta/l_k) = (1-\exp(-\beta\Delta/l_k))^n. \quad (۱۶)$$

n کمیتی است که شیب تابع را کنترل می‌کند و معمولاً مقدار ۱ اختیار می‌شود. کمیت β نیز تعیین می‌کند که در چه حدی از حل‌پذیری، توزیع مدل صرف‌نظر شود که معمولا برابر ۰/۰۰۱ است. چنانچه ملاحظه می‌شود، $f_\Delta(\Delta/l_k)$ تابعی از اندازه‌ی شبکه است و این مطلب عامل شباهت FSM و LES می باشد.

---

۱ Blending Turbulence Models
۲ Interfacing RANS and LES Models
۳ Hard Interface
۴ Soft Interface
۵ Damping a RANS Model
۶ Spezial

Archive of SID

www.SID.ir

۴-۲- جمع وزنی مدل LES و RANS

یکی از راه‌های ترکیب معادلات RANS و LES استفاده از مدل جمع وزنی است. در این مدل کمیتی مانند Φ (برای مثال υ_t) به صورت زیر بیان می شود:

$$\Phi=f\Phi^{RANS}+(1-f)\Phi^{LES} \quad 0\leq f\leq 1. \qquad (۱۷)$$

یک رابطه‌ی برخاسته از نبوغ یا حدس افراد برای f به کار گرفته می‌شود. این رابطه می‌تواند با استفاده از روش‌ها تجربی اعتبار بیشتری پیدا کند و کارهایی روی آن انجام شود تا تابعی دقیق‌تر حاصل گردد. تابع f در حالت کلی می‌تواند تابعی از زمان و مقیاس شبکه باشد. البته روش جمع وزنی در برخی مسائل به ساختارهای غیرفیزیکی در جریان‌های مدل شده منجر می گردد [۱].

۵- مدل‌های دارای مرز مشترک (دولایه ای)

مدل کردن جریان در نزدیکی دیواره یکی از اهداف رهیافت LES است، اما باقی ماندن حجم شبکه در حدی معقول مسئله ای بسیار مهم است. مدل‌های دولایه‌ای یکی از راهکارهایی است که در نزدیکی دیواره برای رسیدن به این منظور به کار می‌روند. دو لایه‌ی مجزا در این رهیافت موجود است. معادلات RANS در لایه‌ی داخلی که نزدیک دیواره است و معادلات LES در لایه‌ی خارجی حل می‌شوند [۴]. متغیرها در دو طرف لایه‌ی مشترک ماهیت متفاوتی دارند، که باید به گونه‌ای با هم سازش نمایند. بنابراین مدل‌های RANS باید ناپایا باشند.

در این قسمت دو روش زیر بررسی می‌شود:

۱. DES [۱]،

۲. مدل‌های LES و RANS لایه‌ای.

۵-۱- مدل DES

مدل یک معادله ای اسپالارت-آلماراس برای معادلات RANS به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱]:

$$\partial_t\tilde{\nu}+\langle u_j\rangle\partial_{x_j}\tilde{\nu}=C_{b1}\tilde{S}\tilde{\nu}+$$

$$\frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}}\left[\partial_{x_j}\left((\nu+\tilde{\nu})\partial_{x_j}\tilde{\nu}\right)+C_{b2}\left(\partial_{x_j}\tilde{\nu}\right)^2\right]$$

$$-C_{w1}f_w\left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2, \qquad (۱۸)$$

که در آن:

$$\tilde{\nu}=\frac{\upsilon_t}{f_{v1}(y^*)}, \qquad (۱۹)$$

و f_{v1} طوری تعریف می‌شود. ترم آخر در معادله‌ی (۱۸) ترم اتلاف محسوب می‌شود، که به فاصله از دیواره (d) بستگی دارد.

با قرار دادن $C_{DES}\Delta$ به جای d مدل اسپالارت-الماراس تبدیل به یک مدل SGS می‌شود که در آن C_{DES} ضریب مدل و Δ اندازه‌ی شبکه است. برای رسیدن به رهیافت ترکیبی به جای d در معادله‌ی (۱۸)، d_1 قرار می گیرد:

$$d_1=\min\{d,C_{DES}\Delta\}. \qquad (۲۰)$$

مدل در نزدیکی دیواره که $d<C_{DES}\Delta$ تبدیل به رهیافت RANS و در فواصل دورتر که $d>C_{DES}\Delta$ تبدیل به LES می‌شود. رهیافت DES این مزیت را دارد که در شبکه‌های درشت قابل استفاده است [۱].

۵-۲- مدل‌های LES و RANS لایه‌ای

رهیافت های LES و RANS در این روش ترکیب می‌شوند و در یک مرز مشترک که یا از قبل تعریف شده یا وابسته به حل است، مدل‌ها و کمیت‌های آنها به طور مستقیم کوپل می‌شوند و نیازی به اعمال شرایط خاص در معادلات مانند DES نیست. مسئله‌ی مهم در این رهیافت تعیین مرز مشترک است. می‌توان این مرز مشترک را یک فاصله‌ی ثابت از دیواره (مثلاً خط معینی از شبکه) در نظر گرفت، به طوری که:

$$y^* = y_{int}. \qquad (۲۱)$$

معادله ی (۲۱) منجر به مرز مشترک سخت می‌شود. البته در این روش انتخاب y_{int} بسیار مهم و تاثیرگذار روی حل است. مرز مشترک نرم y^* وابسته به حل خواهد بود. گاهی

[۱] Detached Eddy Simulation

Archive of SID

www.SID.ir

بدلیل تغییراتی که در پایین دست اتفاق می‌افتد، مرز ثابت که از قبل پیش‌بینی شده است با حالت واقعی تفاوت پیدا می‌کند. اما مرز مشترک نرم با حل تغییر می کند و نتایج بهتری بدست می‌دهد. می‌توان برای جریان چسبیده از معیار زیر برای تعیین مرز مشترک نرم استفاده کرد:

$$y^{*}=y^{+}_{int}=y_{int}u_{\tau}/\upsilon\,,\quad u_{\tau}=(<\tau_{Wall}>/\rho)^{1/2}\,, \qquad (۲۲)$$

و چنانچه جریان جدا شده باشد:

$$y^{*}=y_{int}k^{1/2}/\upsilon\,, \qquad (۲۳)$$

که در آن، k انرژی جنبشی آشفته است.

کمیتی مانند φ به طور پیوسته محاسبه می‌شود و در طول y^{*} برای اعمال شرط پیوستگی مقدار میانگین گیری زمانی و فیلتر شده ی مکانی با یکدیگر برابر خواهند بود. حل ناشی از RANS چون با LES تطبیق می‌یابد وابسته به زمان می شود.

۶- مدل‌های مجزا شده

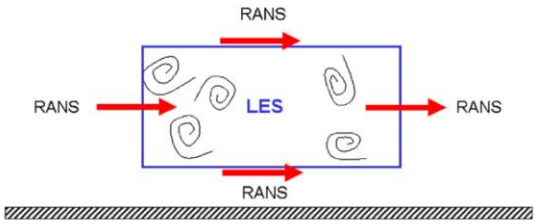
قبل از انجام حل در این روش میدان به دو قسمت تقسیم می‌شود. رهیافت LES در قسمتی که پیش‌بینی می‌شود پیچیدگی‌های خاصی در آن اتفاق افتد (مثلاً در نزدیکی خروجی جت در مسئله‌ی خنک کاری لایه‌ای[۳]) به کار گرفته می‌شود و باقیمانده‌ی میدان با استفاده از رهیافت RANS مدل می‌شود. این دو ناحیه توسط مرزهای مشترک با هم ارتباط دارند و از هم جدا می‌شوند. ماهیت متغیرها در دو طرف مرزها متفاوت است (میانگین‌گیری زمانی در RANS و فیلترگیری مکانی در LES) و انتقال اطلاعات به صورت دو طرفه در مرزها انجام می‌شود. این متغیر ها در مرز مشترک ناپیوسته خواهند بود چون در دو طرف مرزها رهیافت‌های مختلفی اعمال شده‌است و حتی معادلات متفاوتی به کار گرفته می شوند.

هدف از این رهیافت استفاده از مدل‌ها در رژیم‌های مناسب آنها است. مدل RANS که مناسب برای جریان ایستگاهیمی باشد در بخشی که معتبر است، استفاده می‌شود و معادلات LES که خاصیت حل پذیری بالایی دارند در مواردی که نیاز به دقت بالا وجود دارد به کار می رود.

مزیت این روش امکان استفاده مدل‌ها و معادلاتی که بهترین کارایی را در هر ناحیه دارند بدون توجه به پیچیدگی‌ها و یا حتی ناسازگاری‌های آنها است. همچنین با استفاده از این روش می توان به دقت بالا و هزینه‌ی محاسباتی کم دست یافت. عیب این روش پیچیده بودن اعمال شرایط کوپلینگ در مرزهای مشترک است. اصولاً هر معادله‌ی دیفرانسیلی پاره‌ای دارای جواب‌های بسیاری است اما با اعمال شرایط مرزی مناسب مسئله سازگار شده و دارای جواب یکتا خواهد بود. اجرا شدن کدهای مختلف در هر ناحیه به صورت همزمان مشکل دیگر این روش است.

کوپلینگ شرایط مرزی در مدل مجزا شده با توجه به شکل **۱** به سه قسمت تقسیم می شود:

۱. کوپلینگ ورودی[۱]،
۲. کوپلینگ خروجی[۲] و
۳. کوپلینگ مماسی[۳].



شکل (۱): رهیات ترکیبی مجزا شده [۱].

۶-۱- کوپلینگ ورودی

فرض می‌شود جریان از ناحیه‌ی RANS وارد ناحیه‌ی LES شود. شار جرمی، شار اندازه‌ی حرکت، انرژی کل و ساختار جریان طی گذر از مرز مشترک انتقال می‌یابند. می‌توان فرض کرد چگالی و دما در مرز ثابت‌اند [۲]، اما شار اندازه‌ی حرکت و پارامترهای آشفتگی باید محاسبه شوند. شار اندازه‌ی حرکت خطی در ناحیه ی RANS به طور متوسط حساب می‌شود و پارامترهای آشفتگی مدل می‌شوند. شرایط ورودی رهیافت LES باید دارای نوساناتی باشند تا از

۱ Inflow Coupling
۲ Outflow Coupling
۳ Tangential Coupling

Archive of SID
www.SID.ir

ایجاد یک ناحیه‌ی گذر مصنوعی پس از صفحه ی ورودی جلوگیری شود.

جریان ورودی غیردائم را می‌توان به دو طریق کلی ایجاد کرد:

۱. جریان غیر دائمی حقیقی و

۲. نوسانات مصنوعی.

روش دوم می‌تواند مدلی از روش اول باشد. در روش اول می‌توان از داده های تجربی یا عددی معتبر برای جریان‌های مشابه استفاده کرد. تولید آشفتگی مصنوعی توسط روش هایی چون: تجزیه‌ی متعامد مناسب(POD [۱])، سری‌های فوریه، فیلترهای دیجیتال، گردابه‌های تصادفی و اعمال آماری انجام می گیرد. اعمال این نوسانات باید به گونه‌ای باشد که به جریان واقعی در حد امکان نزدیک شود چون، در غیر این صورت نوسانات به سرعت میرا می‌شوند. بهتر است که از دیدگاه LES در ناحیه ی RANS از مدل تنش رینولدز استفاده کرد [۲].

امروزه برای تولید شرط مرزی ورودی از چهار روش زیر استفاده می‌شود [۲]:

۱. مقادیر متوسط از RANS بدون اغتشاشات:

داده‌های ورودی LES در این روش همان مقادیر متوسط و بدون نوسان هستند که از RANS بدست می‌آیند. اعمال این روش بسیار آسان است اما خطای زیادی را ایجاد می‌کند.

۲. مقادیر متوسط از RANS بعلاوه‌ی اغتشاشات تصادفی:

این روش در حقیقت مربوط به شاخه‌ی دوم تولید نوسانات می‌باشد. شرط سازگاری این نوسانات مصنوعی که تولید می‌شوند این است که در مقایسه با نتایج تجربی و یا عددی معتبر، انرژی جنبشی آشفتگی صحیح در مرز اعمال شود. البته این انرژی با توجه به این که خاصیت طیفی ندارد و تنها از چند طول موج تشکیل شده است به سرعت از بین می‌رود و فقط ناپایداری ایجاد می‌کند که باعث گذر جریان آرام به آشفته می شود.

۳. داده‌های حل LES جداگانه:

این روش نیز در مجموعه‌ی تولید نوسان مصنوعی قرار می‌گیرد به این ترتیب که برای تولید ورودی با در نظر گرفتن یک لوله یا کانال پریودیک، حل LES انجام می‌شود و در یک مقطع مورد نظر سابقه‌ی جریان ذخیره می‌شود و می‌توان از آن به عنوان ورودی استفاده کرد. مزیت این روش در واقعی بودن شرایط مرزی است اما باعث افزایش حجم محاسباتی می شود.

۴. مقادیر میانگین RANS یا تجربی بعلاوه‌ی اغتشاشات از بانک اطلاعاتی:

اغتشاشات ذخیره شده در این روش از یک بانک اطلاعاتی بدست می آید و بر مقادیر میانگین اعمال می شود. رابطه‌ی زیر برای ترکیب پیشنهاد شده است[۲]:

$$u_{i(LES)} = \overline{u}_{i(RANS)} + \left[u_{i(DB)} - \overline{u}_{i(DB)}\right] \frac{\sqrt{\overline{u_i' u_i'}}_{(RANS)}}{\sqrt{\overline{u_i' u_i'}}_{(DB)}}, \quad (۲۴)$$

که در آن، DB نشان دهنده ی بانک اطلاعاتی است. سرعت اغتشاشی با استفاده از مقدار داخل [] از داده های بانک اطلاعاتی بدست می‌آید.

طیبی و قدسی [۳] با تحقیقی که بر روی نحوه‌ی اعمال شرط مرزی در مسئله‌ی خنک‌کاری لایه‌ای انجام داده‌اند به این نتیجه دست یافته‌اند که دو پارامتر موثر در شرط مرزی قابل توجه است:

۱. نحوه‌ی تولید نوسانات ورودی و

۲. محل مرز مشترک.

هر چه مرز مشترک به ناحیه‌ی پیچیدگی جریان (خروج جت) نزدیک باشد، ناحیه‌ای که LES در آن حل می‌شود کاهش یافته، هزینه‌ی محاسباتی نیز کاهش می‌یابد. اما نزدیک کردن این مرز مشترک نیازمند ایجاد نوسانات دقیق‌تر در ورودی است.

۶-۲- کوپلینگ خروجی

اطلاعات در این حالت از زیرناحیه‌ی LES وارد RANS می‌شود. هدف در این قسمت انتقال اطلاعات جریان میانگین بالادست است و برای این منظور در گذر از LES به RANS باید مقادیر میانگین به ناحیه‌ی RANS انتقال یابد. با توجه به اینکه LES داده‌های ناپایا ایجاد می‌کند مرز مشترک باید اجازه دهد که نوسانات ناحیه‌ی LES را ترک کنند بدون اینکه به داخل زیرناحیه بازگردند. یک روش که

[۱] Proper Orthogonal Decomposition

Archive of SID

www.SID.ir

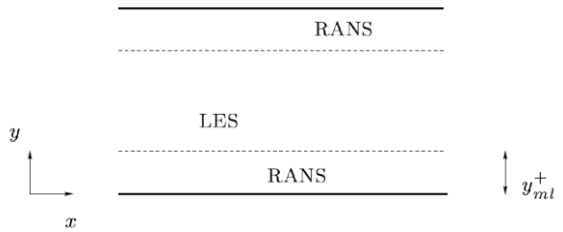
در این قسمت می‌تواند اعمال شود روش غنی‌سازی[۱] است. این روش توسط کوایمر[۲] و ساگاوت[۳] ابداع شد. نوسانات در این روش از داخل ناحیه‌ی LES مقیاس می شوند و به مقادیر میانگین که از حل RANS بدست می‌آیند اضافه خواهند شد. در اینجا نیاز به یک ثابت است که نوسانات را مقیاس کند. البته این روش باعث ایجاد نوساناتی می‌شود که می‌تواند حل را واگرا کند و باید از فیلتر استفاده شود.

۶-۳- کوپلینگ مماسی

مرزهایی را که موازی با خطوط جریان میانگین هستند مرز مشترک مماسی می‌نامند. اگر این مرز نزدیک دیواره باشد، مسئله شبیه مدل‌سازی در نزدیکی دیواره است. می توان کوپلینگ این مرز را نیز با روش غنی‌سازی انجام داد.

۷- کاربردهای رهیافت ترکیبی

مدل دارای مرز مشترک LES و RANS، در مرجع [۴] توسط دیویدسون[۴] و پنگ[۵] در سال ۲۰۰۱ برای شبیه‌سازی جریان کانال استفاده شده است. مدل k-ω که یک مدل RANS می‌باشد، در این رهیافت، در نزدیک دیواره استفاده شده است و در سایر نواحی مدل یک معادله‌ای k_{SGS} (LES) اعمال می گردد. همانگونه که بیان شد در این رهیافت معادلات پیوستگی و اندازه‌ی حرکت یکسانی در طول میدان حل می‌شوند. تنها تفاوت این است که، لزجت آشفتگی (μ_t) در ناحیه‌ی RANS از مدل k-ω و در ناحیه‌ی LES از مدل یک معادله ای k_{SGS} محاسبه می‌شود. ناحیه‌ی جداکننده‌ی LES/RANS در این مقاله برای سادگی یک خط شبکه‌ی ثابت در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که به صورت کلی این رهیافت شبیه DES است. اما این تفاوت را دارد که، در DES هدف این است که لایه‌ی مرزی آشفته با RANS مدل شود، و گردابه‌های جدا در بخش خارجی لایه‌ی مرزی با LES مدل شوند. مدل ترکیبی استفاده شده در شکل **۲** نمایان است.



شکل (۲): مدل به کار رفته در مرجع [۴] برای حل جریان کانال.

در ناحیه‌ی LES از مدل یوشیزاوا[۶] استفاده شده است که، فرمول‌بندی آن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial k_{SGS}}{\partial t}+\frac{\partial (u_j k_{SGS})}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}[(\upsilon+\upsilon_{SGS})\frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_j}] \qquad (۲۵)$$
$$+P_{KSGS}-C_\varepsilon k_{SGS}^{\frac{3}{2}}/\Delta,$$

و در آن:

$$C_\varepsilon=1.05,$$
$$P_{KSGS}=2\upsilon_{SGS}\mathbf{S_{ij}}\mathbf{S_{ij}},$$
$$\upsilon_{SGS}=C_K\Delta k_{SGS}^{1/2},$$
$$C_k=0.07.$$

فرض می‌شود، که ناحیه‌ی اشتراک در فاصله‌ای از دیواره قرار داشته باشد که به صورت y_{ml} نمایش داده شود. سلولی که به عنوان جدا کننده‌ی ناحیه‌ی LES و RANS شناخته می‌شود، با j_{match} نشان می‌دهند. شرایط مرزی در ناحیه‌ی اشتراک به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$j=j_{match}\rightarrow\frac{\partial k}{\partial y}=\frac{\partial \omega}{\partial y}=0, \qquad (۲۶)$$

$$j=j_{match}+1\rightarrow\upsilon_{SGS,j_{match}+1}=\upsilon_{t,j_{match}}. \qquad (۲۷)$$

منظور از υ_t و υ_{SGS} به ترتیب لزجت آشفتگی RANS و LES می باشد. این فرض (معادله‌ی (۲۷)) منجر به این می‌شود که انرژی جنبشی که از طریق انتقال و نفوذ در طول ناحیه‌ی اشتراک از RANS به LES گذر می‌یابد به صورت زیر محاسبه شود:

$$k_{SGS,j_{match}}=\left(\frac{\upsilon_t}{C_k\Delta}\right)^2_{j_{match}}. \qquad (۲۸)$$

---

۱ Enrichment
۲ Quemere
۳ Sagaut
۴ Davidson
۵ Peng
۶ Yoshizawa

Archive of SID

www.SID.ir

نتیجه‌ی دیگر این فرض این است که k_{SGS} تحت تاثیر k در ناحیه ی RANS می‌باشد. اما، k و ω در ناحیه‌ی RANS متاثر از ناحیه‌ی LES نیستند. این مسئله می‌تواند منبع خطا باشد.

رهیافت ترکیبی در این مرجع به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$\begin{array}{lll} y\le y_{ml}, & \upsilon_T=\upsilon_t, & k_T=k_t, \\ y>y_{ml}, & \upsilon_T=\upsilon_{SGS}, & k_T=k_{SGS}, \end{array} \qquad (۲۹)$$

که در آن، υ_t لزجت آشفتگی و k_T انرژی جنبشی آشفتگی است.

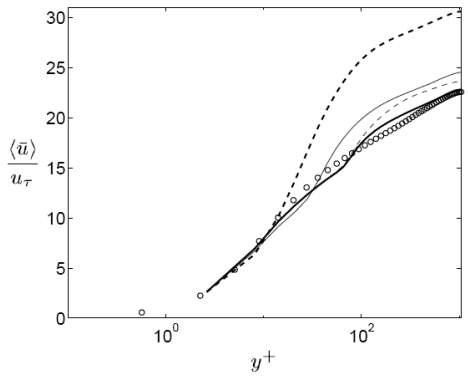
محاسبه‌ی مقدار $<\mathbf{u}>/u_\tau$ در جریان کانال، در این مقاله نمایش داده شده است. شبکه ی استفاده شده برای حل جریان، یک شبکه‌ی ۳۲×۶۴×۳۲ است (x, y, z). در جدول ۱ چهار حالت آزمایش شده در این شبکه آورده شده است.

مقایسه نتایج در شکل **۳** نشان داده شده است. مبنای مقایسه، حل LES توسط پیوملی [۱] در شبکه‌ی بسیار ریز در سال ۱۹۹۳ می‌باشد.

جدول (۱): حالت های مختلف آزمایش شده [۴].

حالت	z_{max}	y_{ml}/δ	j_{match}	y_{ml}^+	Δz^+
۱	π	۰.۰۲۳	۴	۲۵	۱۰۴
۲	π	۰.۰۵۷	۸	۶۰	۱۰۴
۳	۲π	۰.۰۵۷	۸	۶۰	۲۰۸
۴	π	۰	۰	۰	۱۰۴

ملاحظه می‌شود که حل LES در شبکه‌ی درشت، به هیچ وجه دقت مناسبی ندارد. وقتی Δz^+ کاهش می‌یابد و از مدل ترکیبی استفاده می‌شود، دقت بهتر می‌گردد. بالاترین دقت در $y_{ml}^+=60$ بدست می‌آید. علت چنین پیشامدی این مطلب است که، ناحیه‌ی LES در شبکه‌ی درشت کمتر شده و به همین دلیل دقت بالاتر می‌رود. اختلاف با حل دقیق در مجاورت y_{ml}^+ زیاد می‌شود.



شکل (۳) : مقایسه‌ی نتایج رهیافت ترکیبی و حل دقیق در مسئله‌ی جریان داخل کانال [۴].

رهیافت ترکیبی LES/RANS مجزا شده در مرجع [۵] برای بررسی جریان پیچیده‌ی پدیده استال پیرامون ایرفویل استفاده شده است. هدف از این مقاله تحقیق در مورد مسیر پیشامدهایی است که منجر به پدیده‌ی استال می‌شود. امروزه از حل RANS برای شبیه‌سازی جریان پیرامون هواپیما استفاده می‌شود. اما نتایج این رهیافت در حل جریان‌های پیچیده نظیر استال استاتیک و دینامیک از دقت کمی برخوردار هستند. برای شبیه‌سازی این جریان‌ها از رهیافت URANS استفاده می‌شود که مطالعات نشان می‌دهد، نتایج آنها نیز چندان مطلوب و دقیق نیست و هزینه‌ی محاسباتی آنها بسیار بالا است.

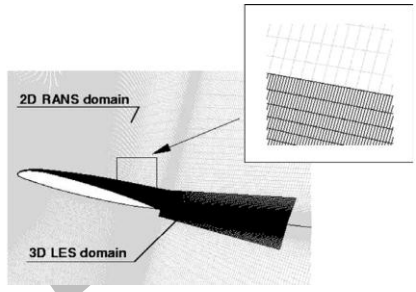
جریان استال پیرامون ایرفویل در حالت برآی بیشینه دارای پیچیدگی‌هایی است که رهیافت RANS را به چالش می‌کشد. گذر لایه‌ی مرزی در نزدیکی لبه‌ی فرار در اثر حباب جدایش آرام (LSB) [۲] عامل پیچیدگی این گونه جریان‌ها است. لایه‌ی مرزی آشفته در ناحیه‌ی میانی ایرفویل چسبیده باقی می‌ماند و در نزدیکی لبه‌ی فرار جدا می‌شود. اتصال بین جریان آرام و آشفته و گذر از جریان آرام به آشفته مکانیزم استال است. چون RANS نمی‌تواند پدیده‌های گذر را تسخیر کند، برای بررسی این جریان مناسب نیست. در نهایت، مقایسه‌ی نتایج رهیافت ترکیبی با حل LES و RANS و داده‌های تجربی انجام گرفته است. برای حل LES از شبکه‌ای ریز استفاده می‌شود که در آن، LES تمام ناحیه‌ی مکش لایه‌ی مرزی و ناحیه‌ی دنباله را

[۱] Piomeli

[۲] Laminar Separation Bubble

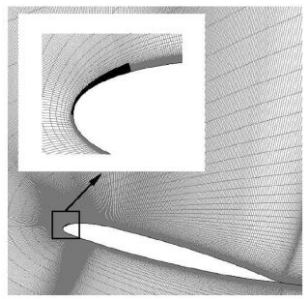
Archive of SID
www.SID.ir

در بر می‌گیرد (شکل **۴**). طول ناحیه‌ی LES در بخش دنباله به اندازه‌ی یک طول وتر است. در جهت جریان برای کاهش هزینه‌ی محاسباتی ناحیه‌ی LES را به زیرناحیه‌هایی تقسیم می‌کنند که تفاوت آنها در میزان ریز شدن یا منبسط شدن شبکه در جهت جریان است. این شبکه به گونه‌ای انتخاب شده است که: $\Delta x^+ \leq 50$ ، $\Delta y^+ \leq 2$ و $\Delta z^+ \leq 15$. این شبکه در نزدیکی لبه‌ی حمله کاملاً ریز است، به طوری که حل در این ناحیه حتی به DNS میل می‌کند و گردابه‌ها در نزدیکی لبه‌ی حمله به خوبی تسخیر می‌شوند.



شکل(۴): شبکه حل LES پیرامون ایرفویل [۵].

رهیافت ترکیبی به این ترتیب اعمال می‌شود که مدل LES در ناحیه‌ی گذر و مدل RANS در ناحیه‌ی جریان چسبیده و جداشده‌ی آشفته‌ی تکامل یافته به کار می‌رود. شبکه‌ی به کار رفته در شکل **۵** نشان داده شده است. اندازه‌ی این شبکه ۸۰×۶۵×۳۵۰ سلول است. در ناحیه‌ی RANS مدل اسپالارت-آلماراس و در ناحیه‌ی LES مدل مقیاس ترکیب شده‌ی انتخابی [۱] به کار می‌رود.

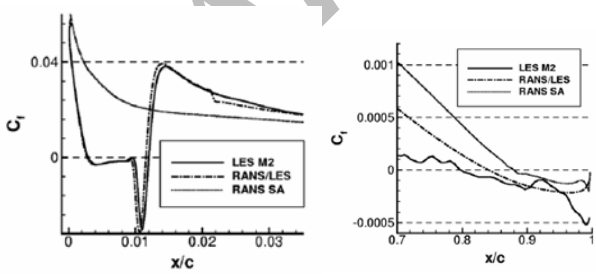


شکل (۵): شبکه برای حل ترکیبی پیرامون ایرفویل، که ناحیه‌ی خاکستری میدان RANS و ناحیه‌ی سیاه میدان LES می‌باشد [۵].

در هر گام زمانی، مقادیر کمیت‌های پایستار در ناحیه‌ی RANS از مرز مشترک، از طریق میانگین‌گیری متغیرهای LES در حجم سلول ناحیه‌ی RANS محاسبه می‌شوند. علاوه بر آن این کمیت‌ها به منظور انتقال لزجت آشفتگی مدل اسپالارت-آلماراس استفاده می‌شوند. انتقال اطلاعات بین ناحیه‌ی RANS و LES چنانچه بیان شد، نیاز به اعمال شرایط مرزی ویژه‌ای دارد. این کار با استفاده از سلول‌های مجازی و روش غنی‌سازی انجام می‌پذیرد. منحنی OA209 که مختص فن بالگرد است، در این تحقیق استفاده می شود. عدد رینولدز بر پایه‌ی طول وتر ۱/۸ میلیون و عدد ماخ جریان آزاد ۰/۱۶ و زاویه‌ی حمله ۱۵ درجه می‌باشد. ضریب اصطکاک پوستی [۲] در شکل **۶** در لبه‌ی حمله و لبه‌ی فرار ارائه شده است، که نزدیکی حل رهیافت ترکیبی به رهیافت LES کاملاً مشهود است. همچنین در جدول **۲** ضرایب برآ و پسا از رهیافت‌های مختلف با حل تجربی مقایسه شده است. رهیافت ترکیبی توانسته فیزیک مسئله را به دقت تسخیر کند و هزینه‌ی محاسباتی را نیز کاهش دهد.

جدول (۲): مقایسه ی نتایج تجربی و حل عددی [۵].

	تجربی	LES	RANS	RANS/LES
برآ	۱.۴۱۶	۱.۳۶۶	۱.۴۸۷	۱.۴۲۹
پسا	۰.۰۲۹	۰.۰۳۹	۰.۰۲۳	۰.۰۳۳



شکل **۶** : مقایسه‌ی نتایج حل رهیافت ترکیبی و رهیافت LES. ضریب اصطکاک پوستی در لبه‌ی حمله (بالا) و در لبه‌ی فرار (پایین) [۵].

[۱] Selective Mixed Scale

[۲] Skin Friction Coefficient

www.SID.ir

رهیافت DES در مرجع [۶]پیرامون هواپیما به کارگرفته شده است. این مقاله نتایج فاز مقدماتی یک برنامه‌ی تحقیقاتی را بیان می‌کند که به منظور تعیین خواص جریان حول هواپیمای ترابری C-130 است. فاز مقدماتی این برنامه شامل اعتبارسنجی و مقایسه‌ی میدان جریان که از روش‌های آشکارسازی جریان بدست آمده می‌باشد. نتایج CFD با نتایج تجربی بدست‌آمده از آزمایشات سیم داغ در تونل باد، مقایسه شده است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که، رهیافت ترکیبی DES توانسته با دقت فراوان جریان پیچیده‌ی روی بدنه را پیش‌بینی کند.

۸- نتیجه گیری

برای شبیه‌سازی جریان آشفته، بدلیل محدودیت در حافظه و سرعت کامپیوترهای امروزی نمی‌توان از حل مستقیم معادلات یعنی DNS، به ویژه در اعداد رینولدز بالا بهره برد. راهکار مورد نظر استفاده از روش‌های RANS و LES است که از میانگین‌گیری زمانی و فیلتر مکانی کمیت‌ها در معادلات استفاده می‌کنند. اما رهیافت RANS در محاسبه‌ی جریان‌های چسبیده با دقت عمل می‌کند و فرایند گذر را نمی‌تواند به خوبی مدل کند. رهیافت LES جریان‌های جدایش را خوب محاسبه می‌کند اما، در نزدیک دیواره حجم محاسبات بالا می‌رود و به همین دلایل اقبال به سوی رهیافت ترکیبی است. در این رهیافت از دقت پیش‌بینی LES و حجم محاسباتی کم RANS در کنار هم استفاده می‌شود. می‌توان با استفاده از این رهیافت در شبکه‌های درشت حل‌های دقیق بدست آورد.

مشکل در بکارگیری رهیافت ترکیبی این است که اولاً باید دو کد متفاوت به طور همزمان عمل کنند. دوماً در نواحی مرز مشترک خواص ناپیوسته خواهند بود. به همین دلیل باید برای انتقال اطلاعات از یک ناحیه به ناحیه‌ی دیگر تدابیر خاصی اندیشیده شود.

مطالعات انجام گرفته برروی این رهیافت و مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی و حل‌های دقیق دیگر منجر به این دیدگاه می‌شود که، رهیافت ترکیبی از دقت بسیار بالایی برخوردار است. امروزه این رهیافت مورد توجه محققان در زمینه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی است و مسائل پیچیده‌ی بسیاری با استفاده از این رهیافت حل شده‌اند. زمینه‌ی مورد توجه در این رهیافت مسئله‌ی انتقال اطلاعات بین دو ناحیه‌ی LES و RANS است که فضای بسیار مناسبی برای انجام تحقیقات می‌باشد.

۹- مراجع

1. Frohlich, J. and Von Terzi, D. "Hybrid LES/RANS Methods for the Simulation of Turbubulent Flows", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 44, pp. 349-377, 2008.

۲. طیبی رهنی، م. و قدسی، س.ر. ، "رهیافت ترکیبی LES/RANS در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته"، مجله مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات، جلد اول، شماره دوم، ۱۳۸۷.

3. Taeibi-Rahni, M. and Ghodsi, S.R. "The Effect of Interface Location and Inflow Generation in Hybrid LES/RANS Simulation", Computational Fluid Dynamic J., Vol. 18, No.1, 2009.

4. Davidson, L. and Shia-Hui, P. "A Hybrid LES/RANS Model Based on a One-equation SGS Model and a Two-equation k-ω Model", The 2nd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Vol. 2, pp. 175-180, Stockholm, 2001.

5. Richez, F., Mary, I., Gleize, V., and Basdivant, C. "Near Stall Simulation of the Flow around an Airfoil, Using Zonal RANS/LES Coupling Method", Computers & Fluids, Vol. 37, pp. 857-866, 2008.

6. Claus, M., Morton, S., Cummings, R., and Bury, Y. "DES Turbulence Modeling on the C-130 Comparision between Computational and Experimental Results", The 43rd AIAA Aerospace and Sciences Meeting and Exhibit, 10-13 January 2005, Reno, Nevada.

Archive of SID

www.SID.ir