

رهیافت ترکیبی LES/RANS در شبیه سازی جریان های آشفته

محمد طیبی رهنی^۱ و سید روح اله قدسی^۲

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، گروه مهندسی هوافضا

چکیده

یک استراتژی مهم در شبیه سازی جریان های آشفته، به منظور کاهش حجم محاسبات بدون از دست دادن قابل ملاحظه دقت نتایج، بکارگیری رهیافت^۳ میانگین گیری رینولدز معادلات ناویر- استوکس^۴ در کنار رهیافت شبیه سازی ادی های بزرگ^۵ است که به آن رهیافت ترکیبی^۶ گفته می شود. با توجه به نتایج بدست آمده از رهیافت های ترکیبی و همچنین نیاز روزافزون به قدرت محاسباتی بیشتر در مسائل پیچیده سیالاتی، استفاده از این روش در میان محققین سیر صعودی داشته و علاوه بر جنبه های تحقیقاتی در مسائل صنعتی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، به منظور آشنایی با روش های ترکیبی مختلف، مروری بر کارهای صورت گرفته و نتایج بدست آمده انجام می گیرد و مفاهیم اصلی و اصول روش های ترکیبی و همچنین دسته بندی های آنها مورد بررسی قرار می گیرند.

واژه های کلیدی

جریان آشفته، رهیافت LES، رهیافت RANS، رهیافت ترکیبی LES/RANS

Hybrid LES/RANS Approach in Turbulent Flow Simulations

M. Taeibi-Rahni, S.R. Ghodsi

Mechanical And Aerospace Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University

Abstract

An important strategy in turbulent flow simulations, with the aim of reducing computational cost without loss of considerable amount of accuracy, is hybrid LES/RANS approach. According to the decent results of this approach and the increasing requests for more computational power, the usage of this approach is growing rapidly, not only by researchers, but also in industrial applications. In this paper, in order to become more familiar with hybrid approach, various attempts in recent literature are presented. Furthermore, the basic concepts and principals are introduced.

Key Words: Turbulent Flow, LES, RANS, Hybrid LES/RANS

۱ استاد Taeibi@sharif.edu

۲ دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو): Roholahghodsi@gmail.com

³ Approach

⁴ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

⁵ Large Eddy Simulation (LES)

⁶ Hybrid

۱- مقدمه

این خود حجم محاسباتی زیادی را ایجاد می‌کند. علاوه بر این، با افزایش مقدار عدد رینولدز جریان، میزان حجم محاسباتی بسیار زیاد می‌شود که مشکل جدی ایجاد می‌کند. در ناحیه دور از دیواره، برای حل جریان نیاز است تا مقیاس‌های حامل انرژی در جریان حل شوند و در نتیجه اندازه شبکه باید با مقیاس انتگرالی جریان متناسب شود. در این حالت مقدار تراکم شبکه و نقاط محاسباتی وابستگی زیادی به عدد رینولدز جریان ندارند. از سوی دیگر، در ناحیه نزدیک به دیواره برای حل مقیاس‌های حامل انرژی نیاز به شبکه‌ای متناسب با ادی‌های داخل لایه مرزی است. بنابراین تعداد نقاط شبکه شدیداً وابسته به عدد رینولدز می‌باشد. در سال ۱۹۷۹، چپمن [۳] تعداد نقاط محاسباتی مورد نیاز در شبکه را در این ناحیه متناسب با $Re^{1.8}$ بدست آورد. از سوی دیگر، مدل‌سازی ناحیه نزدیک دیواره به طور متوسط باعث می‌شود تا تعداد نقاط محاسباتی مورد نیاز در حل تا $Re^{0.4}$ کاهش یابد [۴].

کلیه تلاش‌های صورت گرفته برای حل مشکل رهیافت LES در نزدیک دیواره به دو دسته مختلف تقسیم می‌شوند: (۱) تابع دیواره و (۲) رهیافت ترکیبی. برای حل این مشکل، می‌توان ناحیه نزدیک دیواره را به روشی حل نمود که شبکه مورد نیاز آن وابستگی کمتری به مقدار عدد رینولدز داشته باشد. یکی از این موارد که در رهیافت LES از ابتدا به آن توجه شده بود، مدل‌های نزدیک دیواره^۴ می‌باشند، که در آنها از قانون لگاریتمی دیواره استفاده می‌شود [۵]. در مدل‌سازی ناحیه نزدیک دیواره از قوانین تعادل استفاده می‌شود که در آن فرض می‌شود دینامیک جریان در نزدیک دیواره برای حالت‌های مختلف شبیه به هم است و از یک قانون کلی پیروی می‌کند. تنش دیواره با استفاده از این قانون محاسبه می‌گردد و معادل آن در رهیافت RANS، توابع دیواره می‌باشد. با وجود موفقیت‌آمیز بودن این روش در جریان‌های ساده و جدانشده، محدودیت‌هایی نیز در استفاده از آن وجود دارد. علاوه بر این، قوانین دیواره دیگری نیز مورد توجه بوده‌اند که هرکدام دارای نقاط ضعف و قوت

LES رهیافتی است که قابلیت خود را در پیش‌بینی جریان‌های آشفته به خوبی نشان داده است، ولی با این همه، مشکلاتی در این رهیافت وجود دارد که عبارتند از حجم محاسباتی زیاد و نیاز به قدرت محاسباتی بالا (که بعضاً از عهده رایانه‌های امروزی بر نمی‌آید). در این رهیافت برای جریان‌های محصور بین دیواره‌ها، فاصله بی‌بعد نزدیک‌ترین نقطه محاسباتی در جهت عمود بر دیواره (y^+) در حد واحد می‌باشد. از سوی دیگر، برای آنکه LES بتواند پیش‌بینی دقیق و قابل قبولی از ناحیه نزدیک دیواره داشته باشد، باید Δx در جهت جریان و Δz در جهت عمود بر جریان به ترتیب حدوداً برابر ۱۰۰ و ۲۰ باشند [۱]. در صورت تشکیل چنین شبکه‌ای، می‌توان گفت تراکم لازم برای حل ساختارهای آشفته نزدیک دیواره در ناحیه زیرلایه لزج^۱ و لایه بافر^۲ که وظیفه اصلی در تولید آشفتگی را دارند تامین شده است. اسپالارت تخمین زده است که برای انجام محاسبات کامل و دقیق مسائل پیچیده آیرودینامیکی بوسیله رهیافت شبیه‌سازی مستقیم معادلات ناویر-استوکس^۳ بایستی تا حدود سال ۲۰۷۰ و بوسیله رهیافت LES تا سال ۲۰۴۵ منتظر بمانیم [۲]. از سوی دیگر، رهیافت RANS قابلیت خوبی در محاسبه مقادیر متوسط جریان با دقت قابل قبول و با حجم محاسباتی نسبتاً کمتر دارد. البته، زمانی که جریان سیال تحت تاثیر ادی‌های بزرگ غیرایزوتروپیک قرار می‌گیرد معمولاً نتایج رهیافت RANS زیاد قابل اطمینان نمی‌باشد. به طور کلی، در حل یک جریان آشفته حداقل کار محاسبه مقادیر متوسط جریان با دقت قابل قبول است و در مرحله بعد تخمین مقادیر ناپایا می‌باشد. البته، در بسیاری موارد بدست آوردن مقادیر ناپایا صحیح بسیار حائز اهمیت می‌باشد و بنابراین نیازمند رهیافتی دقیق مانند LES هستیم. در جریان‌های نزدیک به دیواره، بدلیل آنکه مقیاس ساختارهای حامل انرژی در جریان بسیار کوچک می‌شوند و برای پیش‌بینی جریان نیاز است که این ساختارها نیز شبیه‌سازی شوند، احتیاج به شبکه‌بندی بسیار ریز است که

¹ Viscous Sub-layer² Buffer Layer³ Direct Numerical Simulation (DNS)⁴ Near-wall Models

طور همزمان در نواحی مختلف اجرا می‌کردند و مشکل دوم، انتقال داده‌ها در مناطق مرزی بین این کدها بود.

ریچرز و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۰۸ به منظور بررسی جریان پیچیده واماندگی^۲ روی یک ایرفویل از رهیافت ترکیبی استفاده نمودند. آنها ناحیه جدایش لایه مرزی و جریان پشت ایرفویل را بوسیله LES و سایر مناطق را بوسیله RANS محاسبه نمودند. به منظور تعیین دقت روش ترکیبی در پیش‌بینی این جریان پیچیده، نتایج بدست آمده آنها با نتایج رهیافت LES مقایسه شده است. مقدار نیروی‌های برا و پسا^۳ محاسبه شده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده از روش ترکیبی بسیار به واقعیت نزدیک می‌باشد.

جدول (۱): مقایسه مقادیر نیروهای برا و پسا بدست آمده بوسیله روش‌های مختلف [۱۰]

Hybrid	RANS	LES	تجربی	
۱,۴۲۹	۱,۴۸۷	۱,۳۶۶	۱,۴۱۶	نیروی برا
۰,۰۳۳	۰,۰۲۳	۰,۰۳۹	۰,۰۲۹	نیروی پسا

در مورد پیش‌بینی و تحلیل جریان بر روی هواپیما و اجزا آن نیز به طور گسترده‌ای از روش ترکیبی استفاده شده که می‌توان به عنوان نمونه از پیش‌بینی جریان روی یک هواپیمای C130 [۱۱] که نتایج تجربی انجام گرفته روی آن نیز موجود بوده و جریان حول یک جنگنده F-18C با بال‌های دلتا [۱۲] نام برد.

مخصوص به خود می‌باشند و به طور کاملی در مرجع [۶] مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

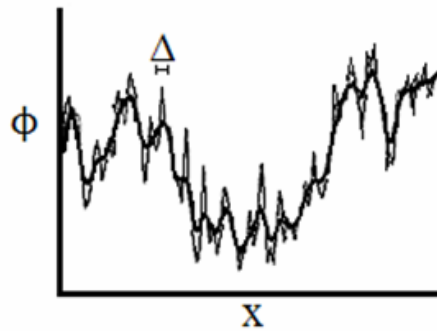
روش دیگری که برای حل این مشکل به نظر می‌رسد، استفاده از رهیافت RANS به طور مستقل در ناحیه نزدیک دیواره است که با حل LES در ناحیه دور از دیواره در ارتباط باشد. یک رهیافت ترکیبی LES/RANS قابل اطمینان باید دارای چند خصوصیت باشد که عبارتند از: (۱) در جایی که محدودیت تراکم شبکه داریم، رهیافت ترکیبی به رهیافت RANS تبدیل شود، (۲) برای آنکه شبیه‌سازی هرچه بهتر شود باید به سمت رهیافت DNS حرکت شود و (۳) از میانگین‌گیری و فیلترکردن صریح پرهیز شود [۷]. ویژگی اول برای آن است که این مدل بتواند جایگزین رهیافت شبیه‌سازی ادی‌های خیلی بزرگ^۱ شود. ویژگی دوم، نهایت این رهیافت را نشان می‌دهد که بوسیله آن بتوان به نتایج واقعی رسید، و علاوه بر آن، وابستگی این رهیافت به اندازه شبکه‌بندی و قدرت محاسباتی را نشان می‌دهد. خصوصیت آخر باعث می‌شود که بتوان از این رهیافت در مسائل دشوار با هندسه‌های پیچیده استفاده نمود.

به دلیل آنکه رهیافت ترکیبی دارای قابلیت‌های مناسبی برای پیش‌بینی جریان است، از آن در حل بسیاری از مسائل مهندسی کمک گرفته شده و لذا استفاده از آن فقط جنبه تحقیقاتی ندارد. به عنوان مثال، یکی از جریان‌های پیچیده و مهم، جریان داخل موتور جت می‌باشد. در داخل محفظه احتراق، جریان آشفته جدا شده به همراه واکنش‌های شیمیایی وجود دارد. تجربه نشان داده که رهیافت دقیقی مانند LES برای پیش‌بینی این جریان مناسب است. از سوی دیگر برای حل جریان داخل کمپرسور و توربین، تاکنون رهیافت‌های مختلف RANS مورد استفاده قرار گرفته است. حال با توجه به این موارد یکی از رهیافت‌هایی که می‌تواند به حل این مشکل کمک نماید، رهیافت ترکیبی است. در سال ۲۰۰۳ اشلوتر و همکارانش [۹و۸] بوسیله رهیافت ترکیبی LES/RANS به حل این جریان پرداختند و نشان دادند که این رهیافت دارای قابلیت حل این جریان پیچیده است. آنها نیز در این راه با دو مشکل اساسی روبرو بودند. مشکل اول این که برای حل می‌بایست چند کد مختلف را به

² Stall

³ Lift and Drag Forces

¹ Very Large Eddy Simulation (VLES)



شکل (۱): افزودن تابع فیلتر مکانی به متغیر ϕ و حذف مقیاس‌ای کوچک

مسائل پیچیده در مقایسه با نتایج حل DNS و یا نتایج تجربی [۱۳].

یک استراتژی اصلی در رهیافت LES حل مستقیم بیشتر انرژی جنبشی آشفتگی جریان و مدل کردن بیشتر مقادیر اضمحلال^۲ است. دلیل این امر این است که انرژی جنبشی آشفتگی در ارتباط با مقیاس‌های بزرگ می‌باشد، در صورتیکه اضمحلال با مقیاس کوچک ارتباط دارد. به عنوان یک قانون کلی، حداقل ۸۰ درصد انرژی جنبشی آشفتگی باید حل شود تا اینکه بتوان به نتایج بدست آمده از این روش اطمینان کرد [۱۴]. این قانون ممکن است برای جریان‌های دور از دیواره در اعداد رینولدز بالا مشکل‌ساز نباشد، ولی وقتی جریان با عدد رینولدز بالا به دیواره نزدیک می‌شود مشکل آغاز می‌شود.

۳- رهیافت RANS

در رهیافت RANS، ابتدا متغیرها به دو بخش متوسط و اغتشاشی تقسیم می‌شوند و سپس عملیات میانگین‌گیری زمانی روی جملات مختلف معادلات ناویر-استوکس انجام می‌شود که در نهایت معادلات حاکم کمیت‌های میانگین‌گیری شده جریان را به ما می‌دهد. در این معادلات جدید، جمله‌ای اضافه می‌شود که باعث بوجود آمدن مشکل بستار^۳ در حل می‌شود. این جمله مشکل‌ساز همان تنش‌های رینولدز می‌باشد که می‌بایست مدل شود.

برای بدست آوردن مقدار متوسط، روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است. برای جریان‌های پایا، میانگین زمانی

در اینجا توضیح مختصری در مورد دو رهیافت LES و RANS بدون تمرکز روی نوع خاصی از آنها داده می‌شود.

۲- رهیافت LES

در رهیافت LES، مقیاس‌های بزرگ ناپایای سه‌بعدی در جریان آشفته به طور مستقیم حل می‌شوند، در حالی که تاثیرات مقیاس‌های کوچک مدل می‌شوند. مقیاس‌های بزرگ شدیداً تحت تاثیر هندسه و دینامیک جریان هستند، در صورتی که مقیاس‌های کوچک این گونه نیستند. بنابراین، برای کاهش حجم محاسبات این مقیاس‌ها بوسیله یک تابع فیلتر مکانی از هم جدا می‌شوند. از لحاظ هزینه محاسباتی، LES در میان رهیافت‌های RANS با مدل تنش رینولدز^۱ (RSM) و شبیه‌سازی عددی مستقیم قرار می‌گیرد.

اگر متغیر ϕ توسط تابع G فیلتر مکانی شود، مقیاس‌های ریزی که کوچکتر از پهنای فیلتر Δ باشند، حذف می‌شوند. همانگونه که در شکل ۱ مشخص است، بعد از افزودن فیلتر مکانی، تغییرات متغیر هموار می‌شود در ۳۰ سال گذشته، پیشرفت قابل توجهی در رهیافت LES صورت گرفته است که به لطف افزایش قدرت محاسباتی رایانه‌ها بوده است. مواردی که در طول این مدت کاملتر و پیشرفته‌تر شده، عبارتند از: (۱) مدل‌سازی مقیاس‌های کوچک که شبیه‌سازی نمی‌شوند، (۲) روش‌های دقیق در شبکه‌بندی، (۳) گسترش کاربرد در پیش‌بینی پدیده‌های مختلف مانند احتراق آشفته، (۴) افزایش قدرت محاسباتی به بیش از ۴ برابر مقدار در دهه ۱۹۷۰ و (۵) نتایج مطلوب بدست آمده در

² Dissipation

³ Closure Problem

¹ Reynolds Stress Modeling

۴- رهیافت ناپایر-استوکس به طور جزئی میانگین‌گیری شده^۲

این رهیافت در سال ۲۰۰۶ توسط گریماژی [۱۶] ارائه شد. ایده اصلی در این رهیافت این است که رهیافت یک‌پارچه‌ای را می‌توان از رهیافت RANS موجود بوسیله چند جمله میرا کننده استخراج نمود. هدف از استفاده از جملات میرا کننده^۳ بهینه کردن رهیافت RANS به گونه‌ای است تا بتوان با آن بیشتر و بهتر به حالتی که قسمتی از اغتشاشات مدل می‌شوند، نزدیک شد. در مدل $k - \varepsilon$ نسبت میرایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\tau}}{\varepsilon}, f_k = \frac{k_{\tau}}{k}, \quad (2)$$

که در آن، $0 \leq f_k \leq f_{\varepsilon} \leq 1$ و کمیت‌های k_{τ} و ε_{τ} مقدار انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال حل نشده را نشان می‌دهند. بنابراین، می‌توان تصمیم گرفت که چه مقدار از انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال مدل شوند. در نتیجه برای بدست آوردن ν_{τ} رابطه (۳) بکار می‌رود.

$$\nu_{\tau} = C \frac{k_{\tau}^2}{\mu \tau \varepsilon_{\tau}} = C \frac{f_k^2}{\mu f_{\varepsilon}} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

گزینه مناسبی است، ولی برای جریان‌های با تغییرات زمانی اندک مشخصات (در مقایسه با مقیاس زمانی آشفتگی) میانگین زمانی با محدودیت در بازه زمانی تعریف می‌شود. اما برای جریان‌های ناپایا، یک میانگین فازی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که در این حالت یک جمله به صورت زیر به میانگین‌گیری رینولدز افزوده می‌شود:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' + \phi'' \quad (1)$$

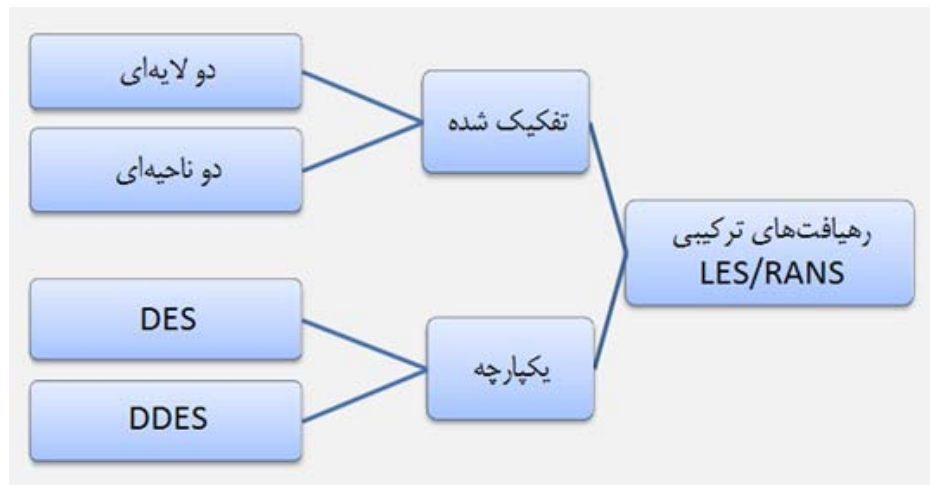
که در آن، متغیر ϕ به سه قسمت متوسط ($\bar{\phi}$)، اغتشاشی (ϕ') و متوسط فازی (ϕ'') تقسیم می‌شود [۱۵]. در نتیجه، حل بوسیله این روش وابسته به زمان است و به آن رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناپایر- استوکس ناپایا^۱ گفته می‌شود. با توجه به ناپایایی مقیاس‌های بزرگ، می‌توان دو حالت را در نظر گرفت. در حالت اول، شرایط مرزی خود ناپایا هستند (به عنوان مثال جرم ورودی در زمان تغییر می‌کند). بدلیل آنکه، این تغییر در جریان ورودی از مقیاس زمانی آشفتگی بزرگتر است، فرضیات استفاده شده در مدل‌سازی جریان برای این حالت نیز صادق است.

در حالت دوم، ناپایداری‌های داخلی دامنه جریان عامل ناپایایی هستند. در نزدیک دیواره ساختارهای گردابه‌ای بزرگ با توجه به وجود لایه مرزی به ساختارهای کوچکتر تبدیل می‌شوند. در این حالت میانگین‌گیری فازی می‌تواند انجام شود. در چنین شرایطی معمولاً رهیافت RANS که در آنها اصلاحاتی صورت نگرفته نتایج قابل قبولی نمی‌دهند. توجه شود که رهیافت RANS فقط شامل مقیاس‌های طولی فیزیکی است، در صورتیکه رهیافت LES شامل یک مقیاس طولی وابسته به شبکه‌بندی عددی نیز می‌باشد. این مقیاس طولی اندازه اغتشاشات حل شونده را مشخص می‌کند. در بعضی از مدل‌هایی که اخیراً در رهیافت LES مورد توجه قرار گرفته‌اند، سعی بر این شده که یک مقدار قابل توجهی از اغتشاشات آشفتگی حل شوند. ولی، مشکل اساسی در این راه حل مستقل نبودن حل از شبکه عددی است. در انجام این کار، موضوع مهم دیگر که علاوه بر استقلال از مقیاس شبکه است، وجود یک جمله برای تشخیص مقدار اغتشاشات حل شونده، می‌باشد.

² Partial Averaged Navier-Stokes (PANS)

³ Damping term

¹ Unsteady RANS (URANS)



شکل (۲): شاخه‌های مختلف رهیافت ترکیبی LES/RANS

تراکم ثابت در همه جا می‌شود. عموماً $f_k \leq f_\varepsilon$ که در نتیجه مقیاس‌های مضمحل کننده در جریان آشفته کوچکترین مقیاس می‌شوند و نیاز بیشتری به مدل کردن دارند. در URANS $f_k < 1$ و $f_k = 1$ برای LES، $f_k = f_\varepsilon \ll 1$ است که ممکن است نقطه شروعی برای حل اولیه باشد.

۵- تشابه ساختاری معادلات RANS و LES

اگر معادلات اصلی دو رهیافت RANS و LES را با هم مقایسه کنیم، خواهیم دید که در آنها شباهت‌هایی وجود دارد که یکی از دلایلی است که باعث شده محققین به فکر استفاده از این دو رهیافت در کنار یکدیگر بیافتند. البته، باید توجه داشت که با وجود تشابه در معادلات، عامل اصلی اختلاف این دو رهیافت که فرق بین میانگین‌گیری زمانی و اعمال فیلتر مکانی است، هنوز به جای خود پابرجاست.

با فرض جریان آشفته غیرایستگاهی، معادله انتقال اندازه حرکت برای رهیافت RANS به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \partial_t \bar{u}_i + \partial_{x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) + \partial_{x_i} \bar{p} \\ = \partial_{x_j} (\nu \partial_{x_j} \bar{u}_i) - \partial_{x_j} \tau_{ij}^{(RANS)} \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن، \bar{u}_i مقادیر متوسط زمانی سرعت می‌باشد. علاوه بر این، در این معادلات p نسبت فشار به دانسیته است. از

در این رابطه، $C_{\mu\tau} = C_\mu$ و جمله f_k^2 / f_ε همان ثابت میرایی موثر برای رهیافت RANS است. معادلات انتقال k و ε به معادلات انتقال k_τ و ε_τ تبدیل می‌شوند که دارای نسبت‌های میرایی هستند و علاوه بر آن جملات دیگری نیز دارند که باید مدل شوند. یکی از مزایای مدل PANS این است که به آسانی در کدهای RANS قابل اجرا است و فقط کافی است ضرائب با توجه به f_k و f_ε تغییر کنند. علاوه بر این، نیازی به فیلتر کردن صریح نیست. نظر به اینکه کدهای تولید شده برای مدل‌های RANS دارای خاصیت مضمحل‌کنندگی اغتشاشات بویژه، در زمان، هستند، در اینجا دقت در زمان بسیار مهم است که به مقدار انرژی جنبشی حل شونده بستگی دارد. یکی دیگر از قابلیت‌های مهم PANS عدم وابستگی آشکار به شبکه است. بنابراین، می‌توان از آن برای تبدیل رهیافت RANS موجود به URANS استفاده نمود. البته، این عدم وابستگی به شبکه دارای نکاتی منفی در کاربردهای عمومی می‌باشد. در رهیافت‌های ترکیبی LES/RANS، یک تراکم شبکه متناسب با ساختارهای حل شونده می‌تواند انتخاب شود. سپس، مدل مانند SGS^۱ این تراکم را براساس حل تنظیم می‌نماید. اما، در اینجا انتخاب f_k و f_ε منجر به ایجاد

^۱ Sub-grid Scale

این دو ناحیه به طور کامل مشخص باشد. در اینجا دیگر دو ناحیه به طور مستقل کار می‌کنند و به توابعی مانند تابع سویچ نیازی نیست.

۶- انواع رهیافت‌های ترکیبی

در اینجا انواع رهیافت‌های ترکیبی LES/RANS مورد بررسی قرار می‌گیرند. به منظور آشنایی اجمالی، در شکل ۲ نموداری از دسته‌بندی آنها نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، به طور کلی رهیافت‌های ترکیبی LES/RANS به دو گروه یکپارچه و تفکیک شده تقسیم می‌شوند. رهیافت‌های ترکیبی یکپارچه، شامل رهیافت DES² و DES تاخیری³ می‌شوند و از سوی دیگر رهیافت‌های ترکیبی تفکیک شده (مجزا) از دو رهیافت دولایه‌ای و دو ناحیه‌ای تشکیل می‌شوند.

۷- شبیه‌سازی ادی جداشده (DES)

یکی از مدل‌های RANS یک معادله‌ای، مدل اسپالارت-آلمارس می‌باشد که برای لزجت ادی از معادله انتقال زیر استفاده می‌کند [۱۷]:

$$\partial_t \tilde{v} + \overline{u_j} \partial_{x_j} (\tilde{v}) = C_{b1} \tilde{S} \tilde{v} - C_{w1} f_w \left(\frac{\tilde{v}}{\tilde{d}} \right)^2 + \frac{1}{\sigma v} \left[\partial_{x_j} \left((v + \tilde{v}) \partial_{x_j} \tilde{v} \right) + C_{b2} \left(\partial_{x_j} \tilde{v} \right)^2 \right], \quad (8)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} + \frac{\tilde{v}}{K^2 d^2} f_{v2},$$

که در آن، $\tilde{v} = v_\tau / f_{v1} (y^+)$ می‌باشد. مقدار f_{v1} به گونه‌ای تعیین می‌شود که در مجاورت دیوار $\tilde{v} \sim y$ باشد. مقادیر سایر ضرائب این مدل در مرجع [۱۷] آورده شده است. استفاده از \tilde{v} به جای لزجت ادی به این دلیل است که برخلاف v_τ ، این پارامتر در نزدیک دیواره رفتار خطی دارد و نیازی به تابع میراکننده ندارد. اسپالارت توانست با

سوی دیگر، معادله اندازه حرکت در رهیافت LES به صورت زیر می‌باشد:

$$\partial_t \overline{u_i} + \partial_{x_j} (\overline{u_i u_j}) + \partial_{x_i} \overline{p} = \partial_{x_j} \left(\nu \partial_{x_j} \overline{u_i} \right) - \partial_{x_j} \tau_{ij}^{(LES)} \quad (5)$$

که در آن، $\overline{u_i}$ مقادیر فیلترشده مکانی سرعت می‌باشد. در این معادله، برای بدست آوردن لزجت ادی (گردابه‌ای) از مدل‌های SGS¹ استفاده می‌شود.

رهیافت RANS کاملاً به کمیت‌های فیزیکی که برای بدست آوردن تنش‌های رینولدز و اغتشاشات آشفتگی بکار می‌روند، وابسته است. به عنوان مثال، در رهیافت $k - \varepsilon$ حل به دو پارامتر اصلی انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن وابسته است و دقت آن منوط به موفقیت مدل کردن تنش‌های رینولدز بوسیله این کمیت‌ها است. از سوی دیگر، از لحاظ ریاضی، یک معادله دیفرانسیل جزئی در صورتی در شرایط خوبی است که شرایط اولیه و مرزی آن به درستی اعمال شده باشند. البته، با وجود آنکه شرایط اولیه مهم می‌باشند، شرایط مرزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تشابه معادلات این دو رهیافت باعث بوجود آمدن ایده یکسان سازی معادلات شده است (یا به عبارت دیگر مدل‌سازی یکپارچه)، تا بتوان از آن از این دو رهیافت در کنار یکدیگر استفاده نمود (معادله ۶).

$$\partial_t \overline{u_i} + \partial_{x_j} (\overline{u_i u_j}) + \partial_{x_i} \overline{p} = \partial_{x_j} \left(\nu \partial_{x_j} \overline{u_i} \right) - \partial_{x_j} \tau_{ij}^{(model)} \quad (6)$$

گذر از LES به RANS می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام گیرد. یکی از این روش‌ها در آمیختن این دو روش است. بدین منظور از رابطه (۷) استفاده می‌شود.

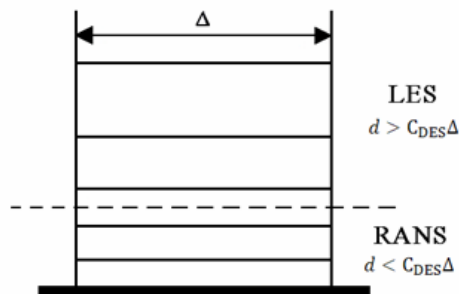
$$\tau_{ij}^{(model)} = f_{RANS} \tau_{ij}^{(RANS)} + f_{LES} \tau_{ij}^{(LES)} \quad (7)$$

در معادله (۷) دو ضریب f_{RANS} و f_{LES} به این دلیل استفاده می‌شوند که مشخص شود در چه جایی از کدام رهیافت استفاده شود. روش دیگر، این است که به صورت بلوک‌های جداگانه، رهیافت RANS در یک ناحیه و رهیافت LES در ناحیه‌ای دیگر مورد استفاده قرار گیرند و مرز اتصال

² Detached Eddy Simulation

³ Delayed Detached Eddy Simulation

¹ Sub-grid Scale



شکل (۳): نمایش دو ناحیه LES و RANS در کنار یکدیگر در روش DES

$$C_{DES} = (1 - f_1) C_{DES(k-\varepsilon)} + f_1 C_{DES(k-\omega)}$$

بدست می‌آید [۱۸].

البته استفاده از این سویچ می‌تواند مشکل‌ساز نیز باشد. در مناطقی که جریان جدا شده وجود داشته باشد، استفاده از روش DES با مشکلاتی روبرو می‌شود و نتایج بدست آمده قابل قبول نمی‌باشند. اگر کسی بخواهد از DES به عنوان یک مدل دیواره استفاده نماید، باید نقطه‌ای که $d = C_{DES} \Delta$ است را مشخص نماید و آن را ثابت نگهدارد. بدلیل وجود لزجت ادی زیاد در ناحیه RANS و اغتشاشات در ناحیه بیرونی، اغتشاشات در ناحیه RANS به درستی دیده نمی‌شوند. از سوی دیگر می‌دانیم که برای گرفتن جواب قابل قبول در ناحیه LES باید بیش از ۸۰٪ انرژی جنبشی آشفتگی حل شود. در نتیجه گذر از ناحیه RANS به ناحیه LES بسیار مهم و حساس می‌باشد. در بعضی مقالات به این ناحیه گذر، ناحیه خاکستری گفته می‌شود. برای کنترل این موارد نیاز است که مقداری اغتشاش به طور مصنوعی بوسیله ایجاد ناپایداری در حل تولید شود.

در مورد مقدار گام زمانی مورد نیاز برای روش DES، اسپالارت [۱۹] در سال ۲۰۰۱ بیان نمود که برای رسیدن به نتایج دقیق مقدار CFL باید در حدود یک تعیین شود. او پیشنهاد کرد: $\Delta x_0 / \Delta t = U_{max}$ ، که در آن Δx_0 پهنای شبکه در ناحیه LES و U_{max} حداکثر سرعت در آن ناحیه می‌باشد (او فرض کرد که حداکثر سرعت حدوداً ۱٫۵ الی ۲ برابر U_{∞} است). همچنین او نشان داد که حداقل ۵ نقطه محاسباتی برای مدل کردن صحیح یک ساختار مقیاس بزرگ مورد نیاز است، یعنی Δx_0 باید

تغییراتی این مدل را به یک مدل زیرشبکه‌ای یک معادله‌ای در رهیافت LES تبدیل نماید. او نشان داد که با توجه به اینکه جمله آخر معادله (۸) نشان دهنده اتلاف $\tilde{\nu}$ نسبت به فاصله از دیواره است، می‌توان آن را با یک مقیاس طولی دیگر جایگزین نمود.

این مقیاس طولی $C_{DES} \Delta$ بود که در آن Δ پهنای شبکه و C_{DES} ثابت مدل DES می‌باشد. در حقیقت کمیت \tilde{d} در معادله (۸) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tilde{d} = \min(d, C_{DES} \Delta), \quad (9)$$

که در آن، مقدار Δ از یکی از روابط (۱۰) و یا (۱۱) محاسبه می‌شود،

$$\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z), \quad (10)$$

$$\Delta = (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2}, \quad (11)$$

در نتیجه با کاهش مقیاس طولی، جمله آخر معادله افزایش یافته باعث کم شدن لزجت ادی می‌شود. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در جایی که $d > C_{DES} \Delta$ است، ناحیه RANS می‌باشد. گذر از ناحیه RANS به LES به صورت پیوسته انجام می‌گیرد. باید توجه داشت که علیرغم استفاده از مدل RANS در نزدیک دیواره، کل جریان ناپایا است و در ناحیه بیرونی اغتشاشات وجود دارند.

در ناحیه RANS می‌توان از مدل‌های مختلف استفاده نمود. یک نمونه از آنها، مدل SST می‌باشد که نتایج خوبی می‌دهد. در این حالت، مقیاس طولی در جمله اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی به صورت $\ell_{DES} = \min(\ell_{SST}, C_{DES} \Delta)$ اصلاح می‌شود و ضریب DES از طریق معادله

حجم شبکه را در نزدیک دیواره در حد معقولی از لحاظ محاسبات نگهدارند. رهیافت ترکیبی دولایه‌ای یکی از این موارد می‌باشد که برای حل این معضل مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش دو لایه کاملاً مجزا وجود دارد که در لایه خارجی از رهیافت LES و در لایه داخلی یکی از مدل‌های RANS مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته، در بین آنها یک مرز جداکننده وجود دارد که هم می‌تواند ثابت باشد (از پیش تعریف شده) و هم می‌تواند در زمان حل جابجا شود (وابسته به حل). تاکنون در لایه RANS از مدل‌های گوناگونی استفاده شده است. در مرز بین دو لایه، مدل‌ها و یا کمیت‌های مورد استفاده در آنها باید با یکدیگر مطابقت نمایند و برخلاف روش DES نیازی به جمله‌ای در معادلات انتقال نیست.

یکی از موضوعات مهم در این روش محل دقیق مرز بین دو لایه (y_{int}) است که باید در نزدیکی دیواره تعیین گردد. در شرایطی که از یک مرز ثابت استفاده شود، فقط کافی است فاصله آن از دیواره مشخص شود، ولی بدلیل تغییر مشخصات جریان در پایین دست جریان، ممکن است این مرز از محل صحیح خود دور شود. بنابراین، بعضی از محققین به این فکر افتادند که با جابجا نمودن محل مرز در حین حل در گام‌های زمانی مختلف، دقت راندمان را افزایش دهند. یکی از فواید این روش، این است که می‌توان با مشخصات بدست آمده از جریان در هر گام زمانی محل مناسبتری برای مرز یافت. محل مرز را می‌توان در لایه‌ای از جریان که جدایش رخ نداده، بوسیله رابطه (۱۴) بدست آورد.

$$y_{int_{new}} = \frac{y_{int} u_{\tau}}{\nu}, \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، $u_{\tau} = \sqrt{\tau_{wall} / \rho}$ می‌باشد، ولی در جایی که جدایش رخ می‌دهد، این تعریف مشکل‌ساز می‌شود. در این صورت، انرژی جنبشی آشفتگی مدل شده و یا کل (مدل شده بعلاوه حل شده) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و معادله (۱۴) به صورت زیر تعریف شود:

$$y_{int_{new}} = \frac{y_{int} \sqrt{K}}{\nu}, \quad (15)$$

حداقل ۵ برابر کمتر از کوچکترین مقیاس حل شده توسط LES باشد.

استرلتز [۲۰] به منظور محاسبه جریان‌های دارای جدایش وسیع از گام زمانی بی‌بعد $\Delta t^* = \Delta t U_{\infty} / L = 0.025$ استفاده نمود، که در آن L یک طول مشخصه از یک خودرو بود. او توانست با این فرض نتایج خوبی را بدست آورد. از سوی دیگر گورتز [۲۱] با در نظر گرفتن $\Delta t^* = 0.006$ توانست جریان روی یک بال دلتا شکل با زاویه حمله زیاد را به خوبی پیش‌بینی نماید.

۸- شبیه‌سازی ادی جداشده تاخیری (DDES)

به منظور بهینه‌تر شدن روش DES، اسپالارت [۲۲] از مقیاس طولی \tilde{d} اصلاح شده استفاده نمود و مقدار آن را از رابطه (۱۲) بدست آورد. این روش اصطلاحاً به نام رهیافت DES تاخیری معروف است.

$$\tilde{d} = d - f_d \max(0, d - C_{DES} \Delta), \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $f_d = 1 - \tanh(8r_d)^3$ می‌باشد. پارامتر دیگری که در این رهیافت تعریف شده، r_d می‌باشد که از رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

$$r_d = \frac{v_t + \nu}{\sqrt{U_{i,j} U_{i,j} k^2 d^2}}, \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، $U_{i,j}$ گرادیان سرعت و k ثابت کارمن است. مقدار این پارامتر در لایه لگاریتمی برابر ۱ و هرچه به لبه لایه مرزی نزدیک شویم، به سمت صفر میل می‌کند. توضیحات کاملتر راجع به این روش در مرجع [۲۲] آمده است.

۹- مدل دولایه‌ای LES/RANS

همانطور که بیان شد، یکی از مهمترین موارد در رهیافت LES، مدل کردن جریان نزدیک دیواره است. پیوملی و بالازاس [۲۳] در سال ۲۰۰۲ و کابوت و معین [۲۴] در سال ۱۹۹۹ تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه را مورد بررسی قرار داده و نتایج کارشان را منتشر نمودند. در این راستا، تراکم شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره در رهیافت LES در جریان‌های پیچیده همیشه معضل بزرگی بوده است. محققین همیشه به فکر روشی بوده‌اند تا بتوانند بوسیله آن

که،

$$V_{LES(res)} = \frac{\langle \overline{u'_i u'_j S_{ij}} \rangle}{S_{ij} S_{ij}}, \quad (19)$$

که در آن، علامت بار نشان دهنده پارامترهای فیلتر شده زمانی و $\langle \rangle$ نشان دهنده پارامترهای میانگین‌گیری شده زمانی هستند.

تمرین و همکارانش [۲۷] در سال ۲۰۰۵ از یک مدل یک معادله‌ای RANS در نزدیک دیواره بهره بردند که مانند حالت قبل یک معادله برای k و K_τ استفاده نمودند، با این شرط که مقدار این دو بایستی در مرز مشترک حتماً با یکدیگر برابر می‌بود. و علاوه بر آن $V_{\tau(RANS)} = V_{\tau(LES)}$ همچنین بایستی رابطه زیر برقرار می‌بود:

$$C_\mu = 0.09 + (C_{\mu_{int}} - 0.09) \frac{1 - \exp(-y/\Delta)}{1 - \exp(-y_{int}/\Delta_{int})} \quad (20)$$

نیسنر و همکارانش [۲۵] مدل‌های مختلف $k - \varepsilon$ را به همراه مدل زیرشبکه‌ای اسماگورینسکی مورد استفاده قرار دادند. در این تحقیق آنها برای مدل اسماگورینسکی از روابط (۲۱) بهره بردند.

$$\varepsilon = (C_s \Delta)^2 S^3 \quad \text{و} \quad K = \frac{(C_s \Delta^2)^2 S^2}{0.3} \quad (21)$$

در رابطه (۲۱) کمیت S تنسور نرخ کرنش حل شده و C_s ثابت معادله می‌باشد. از سوی دیگر، از رابطه (۲۱) را نیز برای محاسبه جابجایی مرز استفاده کردند.

هامبا [۲۸] در سال ۲۰۰۳ بیان نمود که صرفه‌نظر از نوع مدل بکار رفته در لایه RANS، یک مشکل اساسی وجود دارد که هم‌خوان نبودن شیب پروفیل سرعت برای جریان‌های آشفته داخل کانال است. او نتیجه گرفت که مشکل در مقیاس‌های طولی دو لایه است و توانست با استفاده از تغییرات ناپیوسته مقیاس‌های طولی و داده‌های DNS این نامتقارنی را کاهش دهد.

به منظور آنکه ساختارهای جریان در لایه LES در مرز مشترک به واقعیت فیزیکی نزدیکتر باشد، ساگات و کیومر

که در آن، انرژی جنبشی آشفتگی نقش مهمی را ایفا می‌نماید. نیسنر و همکارانش در سال ۲۰۰۷ [۲۵] با توجه به اینکه در لایه LES باید بیش از ۸۰٪ انرژی جنبشی حل شود، از تعریف جدیدی استفاده نمودند که نسبت انرژی جنبشی مدل‌شده به کل انرژی جنبشی بود. این رابطه به صورت میانگین نسبت انرژی جنبشی مدل‌شده به کل به صورت زیر است:

$$K_{rel} = \left(\frac{k_{model}}{k_{model} + 0.5(u'u' + v'v' + w'w')} \right), \quad (16)$$

اگر این نسبت از ۲۰٪ فراتر رود، مرز از دیواره دورتر می‌شود و در غیر این صورت برعکس عمل می‌کند.

همانطور که بیان شد، مسئله حائز اهمیت مرز بین دو لایه است که باید کمیت‌های اصلی روی آن به طور پیوسته مشخص شوند. باید توجه داشت که معادلات انتقال در دو سوی این مرز دارای کمیت‌هایی با ماهیت‌های متفاوت هستند (میانگین‌گیری زمانی و فیلتر مکانی) که باید به گونه‌ای با هم سازش نمایند. بنابراین، مدل‌های RANS باید ناپایا باشند تا بتوانند خود را به رهیافت LES که وابسته به زمان است نزدیک نمایند و بتوانند به گونه‌ای جفت شوند.

در سال ۲۰۰۳، دیویدسون و همکارانش [۲۶] از مدل دو معادله‌ای $k - \omega$ در نزدیک دیواره و از یک مدل یک معادله‌ای براساس K_τ در LES استفاده نمودند. معادله‌ای که برای حل ω در لایه RANS مورد استفاده قرار می‌گیرد در مرز مشترک دارای شرط مرزی زیر است:

$$\left. \frac{\partial \omega}{\partial y} \right|_{y_{int}} = 0, \quad (17)$$

و معادله k در لایه RANS به معادله K_τ در لایه LES تبدیل می‌شود که به طور پیوسته حل می‌شود.

تجربه نشان داده که در رهیافت RANS مقادیر انرژی آشفتگی، لزجت و تنش برشی محاسبه شده، از مقادیر بدست آمده بوسیله رهیافت LES بیشتر است. در صورتی که بخواهیم پیوستگی در مرز دو ناحیه رعایت شود، باید:

$$V_{LES(mod)} + V_{LES(res)} = V_{RANS(mod)} + V_{RANS(res)}, \quad (18)$$

مشخصات مورد نیاز روی مرز مشترک ساخته شود. از سوی دیگر، برای ساخت اغتشاشات مصنوعی روش‌های مختلفی بکار رفته که عبارتند از روش تجزیه متعامد مناسب (POD)، مدهای فوریه، گردابه‌های تصادفی و غیره. مشخصاً وارد کردن اغتشاشات مصنوعی به طوری که بسیار به واقعیت نزدیک باشد، کار بسیار دشواری است. از سوی دیگر مشکل میراشدن سریع این اغتشاشات نیز وجود دارد.

حالت دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، این است که ناحیه RANS باید در پایین دست جریانی قرار گیرد که در بالادست آن ناحیه LES قرار دارد. لذا کاری که باید صورت گیرد این است که مقادیر میانگین‌گیری شده رهیافت LES به رهیافت RANS منتقل گردد و مقادیر متوسط بدست آمده از RANS به LES داده شود.

۱۱- نحوه تولید داده در مرز مشترک دو ناحیه

در تمامی روش‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی جریان سیال، مشخص بودن شرایط مرزی مسئله بسیار مهم و حیاتی است (در این میان، شرایط مرزی ورودی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند). از دیدگاه ریاضی نیز، برای آنکه بتوان جواب یکتایی برای معادلات دیفرانسیل بدست آورد، باید شرایط مرزی و اولیه دقیقاً اعمال شده باشند. در رهیافت RANS شرایط مرزی ورودی عبارتند از کمیت‌های متوسط، تنش‌های رینولدز و مقیاس‌های طولی آشفتگی. در اغلب موارد به دلیل نبودن اطلاعات دقیق از جریان ورودی، از داده‌های تقریبی استفاده می‌شود. در مورد رهیافت‌های دقیقی مانند LES و DNS اطلاعات و مشخصات بیشتری در مرز ورودی مورد نیاز است.

به منظور ایجاد یک شرط مرزی ایده‌آل برای رسیدن به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر تاکنون تلاش‌های گسترده و گوناگونی صورت گرفته است. یکی از این موارد، استفاده از جملات اجباری برای تصحیح شرایط مرزی ورودی است که در محاسبات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. کیتینگ و همکارانش [۳۰] در سال ۲۰۰۴ تحقیقاتی که در این زمینه به انجام رسیده بود را تحلیل نموده و کارائی این روش را مورد بررسی قرار دادند.

همانطور که در بخش قبل نیز بیان شد، چالش اساسی تولید شرایط مرزی ورودی برای LES از داده‌های متوسط

[۲۹] از مقادیر متوسط سرعت به علاوه مقادیر اغتشاشی بدست آمده از خود LES استفاده نمودند.

با توجه به اینکه بیش از یک دهه است که روی روش ترکیبی دو لایه‌ای LES/RANS تحقیق و بررسی صورت می‌گیرد و با توجه به پیشرفت‌های بدست آمده، ولی هنوز مشکلاتی وجود دارد که باید حل شوند. دقت و صحت ساختارهای فیزیکی جریان در لایه LES در نزدیک مرز مشترک هنوز چالش اساسی در این زمینه می‌باشد.

۱۰- مدل دو ناحیه‌ای LES/RANS

در مدل دو ناحیه‌ای LES/RANS ناحیه مربوط به RANS لزوماً ناحیه نزدیک به دیواره نیست، بلکه می‌تواند در جاهای دیگر نیز واقع شود. در این مدل، دامنه حل به حداقل دو ناحیه تقسیم می‌شود که وابسته به شرایط، هرکدام توسط رهیافت LES و یا RANS مورد حل قرار می‌گیرند. در این روش نیز در مرز مشترک دو ناحیه باید مشخصات جریان، شامل سرعت‌ها و فشار در حالت جریان تراکم‌ناپذیر با هم مطابقت پیدا کنند. باید توجه داشت که انتقال اطلاعات در مرز مشترک دو طرفه است.

هدف از انجام این کار این است که بتوان از هر مدل در جایی که بیشترین کارایی را دارد استفاده نمود. در مرز مشترک دو ناحیه می‌توان، دو حالت در نظر گرفت. یکی اینکه جریان از ناحیه RANS به LES وارد شود و یا برعکس از LES به ناحیه RANS رود.

ابتدا حالتی را بررسی می‌کنیم که جریان از RANS به LES داخل شود و مشخصات جریان به همراه جرم، مومنتوم و انرژی از رهیافت RANS باید به رهیافت LES انتقال یابد. مقادیر متوسط بدست آمده از رهیافت RANS می‌بایست با مقادیر میانگین‌گیری شده LES تطابق یابد. در صورتیکه ناپایداری‌های موجود در بالادست جریان تاثیر اندکی روی پایین‌دست جریان داشته باشند، ممکن است این مطابقت کافی باشد. البته، در بسیاری از موارد رهیافت LES نیاز دارد تا از اغتشاشات موجود در مرز ورودی خود آگاه باشد.

دو نوع شرایط مرزی ورودی در مرز مشترک تاکنون مورد استفاده قرار گرفته که عبارتند از ساختارهای ناپایای واقعی جریان و اغتشاشات مصنوعی. در روش اول از یک شبیه‌سازی جریان مشابه استفاده می‌شود تا بانک اطلاعاتی از

RANS می‌باشد، که دلیل این امر تفاوت ذاتی این دو رهیافت است.

داده‌های RANS برای شرایط مرزی ورودی LES

با فرض آنکه در جریان واکنش شیمیایی رخ ندهد، شاید بتوان در بعضی مسائل پارامترهای چگالی و دما را در مرز بین دو ناحیه ثابت فرض نمود، ولی باید اندازه حرکت و پارامترهای آشفتگی را در عبور از این مرز محاسبه نمود. در رهیافت RANS، اندازه حرکت به صورت متوسط مدل می‌شود (در حل پایا به صورت متوسط زمانی و در حل ناپایا به صورت متوسط فازی). از سوی دیگر تمامی پارامترهای آشفتگی در این رهیافت از طریق مدل‌سازی بدست می‌آیند و هیچ کدام حل مستقیم نمی‌شوند. از دیدگاه ناحیه LES، بسیار بهتر است که از مدل تنش رینولدز در ناحیه RANS استفاده شود که در آن هر تنش رینولدز بوسیله معادله انتقال خود مدل می‌شود. از سوی دیگر، پرکاربردترین مدل در رهیافت RANS، مدل دو معادله‌ای است. مشکل این رهیافت مبتنی بر فرضیات لزجت ادی این است که فقط یک پارامتر آشفتگی مفید، یعنی انرژی جنبشی آشفتگی در آن محاسبه می‌شود و سپس با فرض آیزوتروپیک و همگن بودن جریان از آن تنش‌های رینولدز نرمال بدست می‌آید و تنش‌های رینولدز برشی نامعلوم می‌مانند. با توجه به این موضوعات، به منظور ساخت شرایط مرزی ورودی برای ناحیه LES چند روش وجود دارد [۳۱]، که در ادامه به آنها پرداخته خواهد شد.

۱-۱۰- مقادیر متوسط از RANS بدون اغتشاشات

اولین راهی که ممکن است به ذهن برسد این است که همان مقادیر متوسط بدست آمده از ناحیه RANS را بدون در نظر گرفتن اغتشاشات آشفتگی به ناحیه LES انتقال دهیم. بنابراین می‌توان گفت که جریان ورودی در مرز از دیدگاه LES دارای هیچ‌گونه اغتشاشی نیست و شبیه جریان آرام می‌باشد. در اینجا تنها نکته مثبت آسان بودن این روش است و مشخصاً خطای قابل توجهی وارد حل در ناحیه LES می‌شود.

۱۰-۲- مقادیر متوسط از RANS بعلاوه اغتشاشات تصادفی

در روش دیگر، در شرایط مرزی ورودی از مقادیر متوسط به اضافه مقادیر اغتشاشی تصادفی استفاده شود، به گونه‌ای که در مقایسه با نتایج تجربی و عددی معتبر، انرژی جنبشی آشفتگی صحیحی در مرز اعمال شود. با توجه به اینکه در جریان آشفتگی ساختارهای مقیاس بزرگ آغاز کننده آشفتگی انرژی هستند و انرژی از آنها به مقیاس‌های کوچکتر منتقل می‌شود و این در اغتشاشات تصادفی وجود ندارد، بنابراین اغتشاشات تصادفی دارای انرژی هستند که به سرعت مضمحل می‌شوند (بدون آنکه آغاز کننده آشفتگی باشند). این اغتشاشات فقط می‌توانند نویزهایی را ایجاد نماید که برای گذر طبیعی از جریان آرام به آشفتگی مورد نیاز است.

۱۰-۳- داده‌های حل LES پر بودیک جداگانه

در این روش از داده‌های ناحیه RANS استفاده نمی‌شود، بلکه با استفاده از داده‌های مشابه دیگر، شرایط مرزی ناحیه LES ساخته می‌شود. البته این روش از قبل نیز برای رهیافت LES مورد استفاده قرار می‌گرفته است، به خصوص برای مسائلی که نتایج تجربی مشابه آن وجود داشته است. در این گونه موارد، از یک حل اولیه LES پر بودیک جداگانه استفاده می‌شود، که اطلاعات مفیدی در مورد جریان و مشخصات آشفتگی تولید می‌کند و به دلیل پر بودیک بودن مسئله، جریان کاملاً آشفتگی می‌باشد. در چنین حلی، یک لوله یا کانال پر بودیک در نظر گرفته می‌شود و سابقه جریان در یک برش مقطعی از جریان در زمان ذخیره می‌شود. سپس، از این بانک اطلاعاتی بدست آمده در شرایط مرزی حل LES اصلی استفاده می‌شود تا یک شرایط مرزی کاملاً آشفتگی و وابسته به زمان بدست آید.

مهمترین مزیت این روش واقعی بودن شرایط مرزی است. گرفتن اطلاعات از یک جریان کاملاً آشفتگی مشابه باعث می‌شود که اغتشاشات اعمال شده در مرز مصنوعی نباشد و همچنین انرژی جنبشی آشفتگی در اعداد موج مختلف از توزیع واقعی‌تری برخوردار باشد.

البته نکته منفی که در این روش وجود دارد، افزایش حجم محاسبات است (با وجود اینکه ساخت این بانک اطلاعاتی بوسیله یک حل LES محاسبات بیشتری را به کار

۱۱- نتیجه‌گیری‌ها

روش ترکیبی که استفاده از آن به دلیل ویژگی‌هایش در حال افزایش می‌باشد، کارایی خود را در تحقیقات و آزمایش‌های مختلف به اثبات رسانده است. هدف از این مقاله مروری بر کارهای انجام گرفته در زمینه رهیافت ترکیبی LES/RANS و انواع مختلف آن می‌باشد. به طور عمده، در این مقاله به شاخه‌هایی از رهیافت ترکیبی اشاره شده که کاربرد بیشتری داشته‌اند و در مسائل مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

در حال حاضر انجام تحقیقات روی انواع رهیافت‌های ترکیبی و همچنین استفاده از آنها برای حل مسائل گوناگون یکی از زمینه‌های بسیار فعال در شاخه دینامیک سیالات عددی می‌باشد که هنوز موضوعات جالب و ارزشمندی در آن برای تحقیق وجود دارد. یکی از این موضوعات، انتقال اطلاعات میان دو ناحیه LES و RANS می‌باشد که هنوز در آن نقاط مبهمی وجود دارد و راهکارهای ارائه شده نیز نیازمند بهبود و اصلاح هستند.

مراجع

1. Piomelli, U. and Chasnov, J.R. "Large-Eddy Simulations: Theory and Applications", in Transition and Turbulence Modelling, Edited by Henningson, Hallback, Alfredsson and Johansson, Kluwer Academic Publishers, pp. 269-336, 1996.
2. Spalart, P.R. "Strategies for Turbulence Modelling and Simulations", Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 21, No. 3, pp. 252-263, 2000.
3. Chapman, D.R. "Computational Aerodynamics Development and Outlook", AIAA J., Vol. 17, No. 12, pp. 1293-1313, 1979.
4. Piomelli, U. Balaras, E. Pasinato, H. Squires, K.D., and Spalart, P.R. "The Inner-Outer Layer Interface in Large-Eddy Simulations with Wall-Layer Models", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 24, No. 4, pp. 538-550, 2003.
5. Deardorff, J.W. "A Numerical Study of Three-Dimensional Turbulent Channel Flow at Large Reynolds Numbers", J. Fluid Mech., Vol. 41, No. 2, pp. 453-480, 1970.
6. Sagaut, P. "Large Eddy Simulation of Incompressible Flows", 3rd Edition, Springer, Berlin, 2006.
7. Hussain, A. "Coherent Structures and Turbulence", J. Fluid Mech., Vol. 173, pp. 303-356, 1986.

می‌افزاید). بهر حال، این محاسبه نسبت به محاسبه اصلی از حجم محاسباتی به مراتب کمتری برخوردار است و باید در شرایط مختلف مشخص شود که آیا از لحاظ دقت محاسبات و همچنین حجم محاسبات، این کار بهینه است و یا خیر.

۱۰-۴- مقادیر متوسط سرعت از RANS بعلاوه مقادیر اغتشاشی از بانک اطلاعاتی

این روش نیز تا حدودی مانند روش قبل می‌باشد و در آن از یک بانک اطلاعاتی استفاده می‌شود. برای انجام این کار میدان متوسط جریان از داده‌های رهیافت RANS و یا نتایج تجربی به همراه اغتشاشات برگرفته از یک بانک اطلاعاتی به عنوان شرط مرزی در ورودی ناحیه LES مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این کار به منظور بدست آوردن تغییرات زمانی حل RANS، مقادیر متوسط میدان جریان و همچنین مقدار آشفتگی در طی زمان تغییر می‌کند. برای ترکیب این دوم مقدار، معادله (۲۲) پیشنهاد شده است.

$$C_{\mu} = 0.09 +$$

$$(C_{\mu_{int}} - 0.09) \frac{1 - \exp(-y / \Delta)}{1 - \exp(-y_{int} / \Delta_{int})} \quad (22)$$

در معادله (۲۲) DB نشان دهنده بانک اطلاعاتی می‌باشد. با استفاده از $[u_{i_{DB}}(t) - \bar{u}_{i_{DB}}]$ مقدار سرعت اغتشاشی از داده‌های بانک اطلاعاتی بدست می‌آید (با کم کردن مقدار متوسط از مقدار کل). به دلیل آنکه مقدار سرعت اغتشاشی بدست آمده تصحیح شود، آن را در یک ضریب ضرب می‌کنند. مقدار $\overline{u_{i_{RANS}}^2}(t)$ مشخص می‌باشد و از مدل‌سازی انجام شده در ناحیه RANS بدست می‌آید. در صورتی که معادله (۲۲) متوسط‌گیری شود، جمله دوم سمت راست معادله برابر صفر خواهد شد و معادله مذکور به صورت $\overline{u_{i_{LES}}}(t) = \overline{u_{i_{RANS}}}(t)$ در می‌آید.

بدلیل آنکه گام‌های زمانی در رهیافت RANS از گام‌های زمانی در رهیافت LES بسیار بزرگتر است، بنابراین باید داده‌های بدست آمده از RANS در هر گام زمانی LES میان‌یابی شوند.

20. Strelets, M. "DES of Massively Separated Flows", AIAA Paper 2001-0879, 2001.
21. Görtz, S. "Detached-Eddy Simulations of a Full-Span Delta Wing at High Incidence", AIAA Paper 2003-4216, Proceedings of the AIAA the 21st Applied Aerodynamics Conf., Orlando, 2003.
22. Spalart, P.R. Deck, S. Shur, M.L. Squires, K.D. Strelets, M.K., and Travin, A. "A New Version of Detached Eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities", *Theor. Comput. Fluid Dynamics*, Vol. 20, No. 3, pp.181–195, 2006.
23. Piomelli, U. and Balaras, E. "Wall-layer Models for Large-Eddy Simulation", *Annual Review Fluid Mechanics*, Vol. 34, pp .349–74, 2002.
24. Cabot, W. and Moin, P. "Approximate Wall Boundary Conditions in the Large-Eddy Simulation of High Reynolds Number Flow", *Flow Turbulence Combustion*, Vol. 63, No. 1, pp. 269–291, 1999.
25. Kniesner, B. Šarić, S., Mehdizadeh, A. Jakirlić, S., Hanjalić, K., and Tropea, C. "Wall Treatment in LES by RANS Models: Method Development and Application to Aerodynamic Flows and Swirl Combustors", *ERCOFTAC Bull.*, pp .33-40, 2007.
26. Davidson, L. and Peng, Sh. "Hybrid LES–RANS Modeling: a One-equation SGS Model Combined with a $k-\omega$ Model for Predicting Recirculating Flows", *Int. J. Numerical Methods Fluids*, Vol. 43, No. 9, pp. 1003–1018, 2003.
27. Temmerman, L. Hadžiabić, M. Leschziner, M.A., and Hanjalić, K. "A Hybrid Two-Layer URANS– LES Approach for Large Eddy Simulation at High Reynolds Numbers", *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 26, No. 2, pp. 173–190, 2005.
28. Hamba, F. "A Hybrid RANS/LES Simulation of Turbulent Channel Flow", *Theo. Comp. Fluid Dyn.*, Vol. 16, No. 5, pp.387–403, 2003.
29. Quéméré, P. and Sagaut, P. "Zonal Multi-Domain RANS/LES Simulations of Turbulent Flows", *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 40, No. 7, pp. 903–925, 2002.
30. Keating, A. Piomelli, U. Balaras, E, and Kaltenbach, H.J. "A Priori and a Posteriori Tests of Inflow Conditions for Large Eddy Simulation", *Phys. Fluids*, Vol. 16, No. 12, pp.4696-4712, 2004.
31. Schlüter, J.U. Pitsch, H. and Moin, P. "Large Eddy Simulation Inflow Conditions for Coupling with Reynolds-Averaged Flow Solvers", *AIAA J.*, Vol. 42, No. 3, 2004.
8. Schlüter, J.U. Shankaran, S. Kim, S. Pitsch, H. Alonso, J.J. ,and Moin, P. "Towards Multi-Component Analysis of Gas Turbines by CFD: Integration of RANS and LES Flow Solvers", *ASME TURBO EXPO 2003 Land, Sea and Air*, GT2003-38350, Atlanta, 2003.
9. Schlüter, J.U. Wu, X. Kim, S. Alonso, J.J. and Pitsch, H. "Integrated RANS-LES Computations of Turbomachinery Components: Generic Compressor/Diffuser", *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs*, pp. 357-368, 2003.
10. Richez, F. Mary, I. Gleize, V. and Basdevant, C. "Near Stall Simulation of the Flow Around an Airfoil Using Zonal RANS/LES Coupling Method", *Computers & Fluids*, Vol. 37, No. 7, pp .857–866, 2008.
11. Claus, M.P. Morton, S.A., and Cummings, R.M. "DES Turbulence Modeling on the C-130 Comparison between Computational and Experimental Results", *AIAA 2005-884*, the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2005.
12. Morton, S.A. Steenman, M.B., Cummings, R.M. and Forsythe, J.R. "DES Grid Resolution Issues for Vortical Flows on a Delta Wing and an F-18C", *AIAA 2003-1103*, the 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003.
13. Pope, S.B. "Ten Questions Concerning the Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows", *New J. of Physics*, Vol.6, No.1, pp. 35-59, 2004.
14. Pope, S.B. "Turbulent Flows", *Cambridge University Press, Cambridge*, 2000.
15. Speziale, C.G. "Turbulence Modeling for Time-Dependent RANS and VLES: a Review", *AIAA J.*, Vol. 36, No.2, pp. 173-184, 1998.
16. Girimaji, S.S. "Partially-Averaged Navier-Stokes Model for Turbulence: a Reynolds-Averaged Navier-Stokes to Direct Numerical Simulation Bridging Method", *J. Appl. Mech.*, Vol. 73, No. 3, pp.413-421, 2006.
17. Spalart, P.R. and Allmaras, S.R. "A One-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", *La Rech Aerospace*, No.1, pp.5-21, 1994.
18. Shur, M. Spalart, P.R. Strelets, M. and Travin, A. "Detached-Eddy Simulation of an Airfoil at High Angle of Attack", Edited by Rodi and Laurence, In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Corsica, Elsevier, Amsterdam*, pp. 669–678, 1999.
19. Spalart, P.R. "Young Person's Guide to Detached-Eddy Simulation Grids", *NASA CR 2001-211032*, 2001.