

# معرفی یک روش چند بلوکی بهبود یافته برای جریانهای اغتشاشی

محسن گودرزی\* و پیمان لشگری\*\*  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۵/۲۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۱۲/۱۹)

چکیده -

k-ε

واژگان کلیدی:

## Introducing an Improved Multi-block Method for Turbulent Flows

M. Goodarzi and P. Lashgari

Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University

**Abstract:** *A major part of the flow field has no complicated turbulent behavior in many turbulent flows. In order to reduce memory and CPU time, the flow field was decomposed to several blocks in which different turbulence models were employed. A two dimensional backward facing step was considered in this research. Four combinations of the Prandtl mixing length and standard k-ε models were implemented. In addition to the numerical convergence and accuracy of the results obtained, computer memory usage and CPU time consumption were investigated. Comparisons showed that employing a suitable combination of the turbulence models for individual blocks led to the results which were as accurate as those resulting from the application of high order turbulence model for all of them. The results revealed that the memory usage and CPU time were considerably decreased.*

**Keywords:** *Multi-block method, Turbulence modeling, Computer memory, CPU time.*

\*\* - کارشناسی ارشد

\* - استادیار

$C_\mu$	ثابت مدل اغتشاشی	$y$	محور مختصات
$k$	انرژی اغتشاشی	$\varepsilon$	استهلاک انرژی اغتشاشی
$l_m$	طول اختلاط	$\mu_t$	ویسکوزیته اغتشاشی
$p$	فشار استاتیک	$\nu_{eff}$	ویسکوزیته مؤثر
$u$	مؤلفه سرعت در جهت $x$	$\delta$	فاصله مرکز سلول با وجه آن
$v$	مؤلفه سرعت در جهت $y$	$\phi$	کمیت فیزیکی جریان
$x$	محور مختصات	$\rho$	چگالی سیال

## ۱- مقدمه

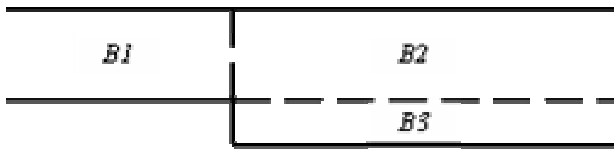
یکی از روشهای حل عددی جریان سیال، روش چندبلوکی است. در این روش، میدان جریان به نواحی یا بلوکهای مجزا تقسیم شده و در هر بلوک شبکه مناسب تولید می‌شود. حل میدان جریان از حل همزمان معادلات حاکم در تمام بلوکها با به کارگیری شرایط مرزی در مرزهای کل میدان و مرزهای بین بلوکها حاصل می‌شود. به خصوص اگر از سیستم پردازش موازی استفاده شود محدودیت تعداد نقاط شبکه کمتر شده که باعث کاهش چشمگیر زمان انجام حل معادلات و حافظه مورد نیاز می‌شود. از مهمترین ویژگیهای این روش به تولید شبکه سازمان یافته بر روی هندسه‌های پیچیده و امکان پردازش موازی می‌توان اشاره کرد.

شبکه‌های سازمان یافته چندبلوکی در دهه هشتاد میلادی، به دنیای دینامیک سیالات عددی پا گذاشت. مقاله ویدریل و فورسی [۱] در کنفرانس دینامیک سیالات *AIAA* سال ۱۹۸۴، برای اولین بار توجه همه را به روش چندبلوکی سازمان یافته جلب کرد. آتکینز [۲] ترکیبی از روش چندبلوکی و چند شبکه‌ای را برای حل معادلات اویلر و ناویر استوکس با تقریب لایه مرزی نازک و مدل اغتشاشی بالدوین لوماکس به کار برد. حیدری و طیبی رهنی [۳] برای شبیه‌سازی جریان مافوق صوت مغشوش حول اجسام مدور، روش چندبلوکی با مرز بلوکی انطباقی را به کار بردند. در زمینه استفاده از

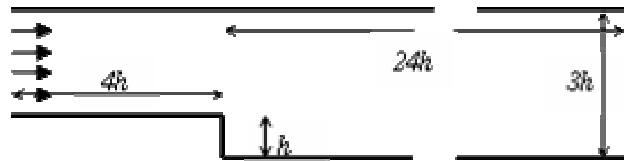
روش چندبلوکی برای پردازش موازی به تحقیقات دریکاکیس [۴] برای حل جریان تراکم‌ناپذیر سه بعدی درون کانال با خم ۹۰ درجه و حل عددی جریان تراکم‌ناپذیر دو بعدی حول ایرفویل NACA0012 با شبکه‌بندی متحرک توسط تسای و همکارانش [۵]، می‌توان اشاره کرد.

در تمام کارهای انجام شده به روش چند بلوکی با یک پردازشگر یا چند پردازشگر، معادلات حاکم و روشهای میانبایی کمیتها در نقاط شبکه ای برای کلیه بلوکها یکسان بوده است. کیم و همکارانش [۶]، برای غلبه بر مشکل شکستگی شبکه در نوک و انتهای ایرفویل از روش چند بلوکی استفاده کردند. ایشان در مرز بین بلوکها از روش میان‌بایی پیشرو یا پسرو متغیرهای جریان را در شکل منفصل شده معادلات محاسبه کردند. استفاده از روش میانبایی متفاوت در مرزهای بین بلوکها به عنوان نوآوری این کار تحقیقاتی معرفی شده است.

حل عددی جریانهای مغشوش به مدلسازی اغتشاشات نیاز دارد. مدل‌های اغتشاشی مختلفی برای جریانهای گوناگون معرفی و به کار گرفته شده‌اند. مدل‌های جبری ساده تا مدل‌های تنش رینولدز مرتبه بالا همگی معادلاتی‌اند که به همراه معادلات پیوستگی و اندازه حرکت باید حل شوند. استفاده از مدل‌های اغتشاشی مرتبه بالا مستلزم حل معادلات بیشتری خواهد بود که در این صورت علاوه بر افزایش زمان محاسباتی،



شکل ۲- بلوک‌بندی میدان جریان



شکل ۱- ابعاد کانال با پله

مغشوش با در نظر گرفتن مفهوم ویسکوزیته ادیها به شکل زیرند [۸]:  
معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0.0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت در جهت x:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

معادله اندازه حرکت در جهت y:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

که در آن  $u$  و  $v$  مولفه‌های سرعت در جهات دستگاه مختصات،  $p$  فشار استاتیکی،  $\rho$  چگالی و  $v_{\text{eff}}$  ویسکوزیته کل هستند. مقدار ویسکوزیته کل برابر با مجموع ویسکوزیته

$$\text{مولکولی و ویسکوزیته ادیهاست} \left( v_{\text{eff}} = \frac{\mu + \mu_t}{\rho} \right).$$

به معادلات فوق باید معادلات مربوط به مدل سازی اغتشاشات را اضافه کرد که در این تحقیق از مدل طول اختلاط پرائنل [۹] به عنوان یک مدل اغتشاشی مرتبه پایین و از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد [۱۰] به عنوان یک مدل اغتشاشی مرتبه بالا استفاده شده است.

با توجه به هندسه جریان باید آن را به سه بلوک مجزا تقسیم کرد. شکل (۲) نحوه بلوک‌بندی میدان جریان را نشان می‌دهد. در بلوک اول صرفاً یک جریان برشی برقرار بوده و در گذر از روی پله به علت اینرسی حرکتی سیال یک ناحیه جدایش جریان در بلوک سوم قابل پیش بینی است. شکل (۳) به صورت نمادین خطوط جریان را نشان می‌دهد. خطوط جریان در بلوک دوم نیز تا حد زیادی رفتار جریان برشی را

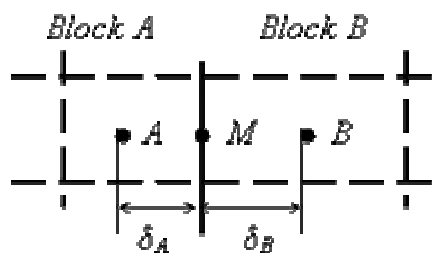
حافظه رایانه‌ای بیشتری هم مورد نیاز است. استفاده از ابررایانه‌ها و یا پردازش موازی راه حلی برای غلبه بر این محدودیتهاست. اما امروزه محققان به دنبال روشهای ساده‌تری‌اند که هزینه آنها از نظر سخت افزاری پایین باشد و بتوان با یک رایانه شخصی حل عددی مناسبی از میدانهای جریان پیچیده به دست آورد.

بسیاری از جریانهای اغتشاشی به گونه ای هستند که در بخش وسیعی از آنها پیچیدگی جریان به حدی کم است که مدل‌های اغتشاشی مرتبه پایین به خوبی رفتار اغتشاشی آن قسمت را پیش بینی می‌کنند و نیازی به استفاده از مدل‌های اغتشاشی مرتبه بالا و پر هزینه ندارند. در این‌گونه از جریانها تنها بخش کوچکی از میدان جریان دارای پیچیدگیهای اغتشاشی زیاد است و فقط در این بخش از جریان به مدل اغتشاشی مرتبه بالا نیاز است.

## ۲- معرفی روش عددی

روش عددی بهبود یافته را می‌توان با در نظر گرفتن یک هندسه خاص برای میدان جریان به عنوان هندسه مورد مطالعه بهتر توضیح داد. در این تحقیق جریان اغتشاشی عبوری از روی یک پله عقب گرد که دارای نواحی متفاوتی از نظر میزان پیچیدگیهای اغتشاشی است، مورد توجه قرار گرفته و روش عددی بهبود یافته برای شبیه سازی عددی آن توصیف و به کار گرفته شده است. بدین ترتیب گامهای اساسی برای معرفی روش عددی به صورت مرتب زیر قابل بررسی‌اند. این کانال دوبعدی توسط کیم و همکارانش [۷] به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل (۱) ابعاد این کانال را نشان می‌دهد.

معادلات حاکم بر جریان دوبعدی دائم تراکم ناپذیر



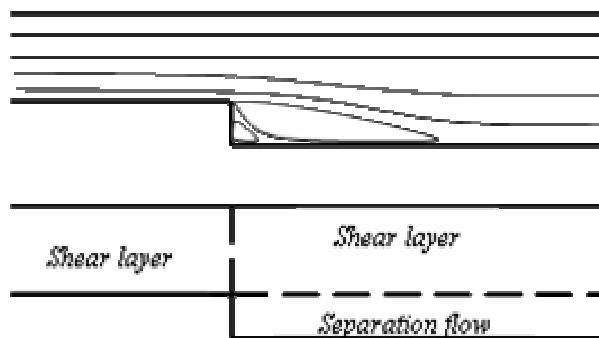
شکل ۴- سلولهای دو بلوک در مجاورت مرز مشترک

مرز مشترک بلوکها با میانبایی خطی محاسبه شده است. شکل (۴) دوسلول مجاور مرز مشترک بین دو بلوک مجاور را نشان می‌دهد. با توجه به ابعاد مشخص شده روی شکل و کمیتهای هندسی آن از رابطه عمومی زیر برای میانبایی کمیتهای استفاده شده است

$$\varphi_M = \frac{\delta_B \varphi_A + \delta_A \varphi_B}{\delta_A + \delta_B} \quad (۴)$$

بسیاری از محققان از این رابطه که دارای دقت مرتبه دوم است برای میانبایی مقادیر روی مرز مشترک بلوکها استفاده کرده‌اند. البته برای جلوگیری از مشکل نواسانات احتمالی (نه حتمی) چند راهکار مورد استفاده قرار می‌گیرد. اولین راهکار این است که مرز بین بلوکها باید جایی انتخاب شود که ناپیوستگی در کمیتهای میدانی جریان وجود نداشته باشد. در بلوک‌بندی میدان جریان مورد مطالعه به این موضوع توجه شده است. در ضمن میدان جریان یکنواخت به عنوان حدس اولیه در تمام سلولهای بلوکهای سه گانه انتخاب شد که از بروز ناپیوستگیهای اولیه نیز جلوگیری شود.

دومین راهکار این است که روش میانبایی برای سلولهای مجاور مرز مشترک بلوکها مرتبه اول انتخاب شود تا اندکی خاصیت استهلاکی در این منطقه حاصل شود. در روش عددی به کار رفته در این تحقیق از روش پیوندی مرتبه اول در مجاور مرز بلوکها استفاده شد تا این تأثیر استهلاکی ایجاد شود. علاوه بر تمهیدات فوق استفاده از ضرایب زیر تخفیف مناسب می‌تواند از نواسانات احتمالی جلوگیری کند. در تحقیق حاضر به علت مقایسه زمانهای محاسباتی از ضرایب زیر تخفیف یکسان برای حالت‌های چهارگانه استفاده شده است. با این حال در روند ابتدایی حل عددی و قبل از رسیدن به جوابهای همگرا



شکل ۳- پیش بینی خطوط جریان و مکانیزمهای اغتشاشی در مناطق مختلف میدان جریان

خواهند داشت، اما ناحیه جدایش ایجاد شده در بلوک سوم پیچیدگی پدیده‌های اغتشاشی این ناحیه را افزایش می‌دهد. برای شبیه سازی پدیده‌های اغتشاشی نواحی با رفتار لایه برشی از مدل اغتشاشی طول اختلاط پرانتل می‌توان بهره گرفت که با دقت مناسبی این جریانها را توصیف می‌کند. اما برای ناحیه جدایش جریان استفاده از مدل طول اختلاط پرانتل مناسب نبوده و باید از مدل‌های اغتشاشی مرتبه بالاتر استفاده کرد. هرچند که مدل  $k-\epsilon$  استاندارد برای پیش بینی نواحی جدایش جریان خیلی مناسب نیست اما چون هدف این تحقیق معرفی یک روش عددی با ترکیب مدل‌های اغتشاشی در بلوکها به منظور کاهش حافظه رایانه‌ای و زمان محاسبات است، از این مدل برای شبیه سازی استفاده شده است.

هر بلوک با مرزهایی احاطه شده که شرایط مرزی را بر حل عددی آن بلوک تحمیل می‌کند. در مرزهای شامل دیوار صلب از شرط عدم لغزش به همراه قانون دیوار استفاده شده است. در بلوک (۱) یک مرز ورودی جریان وجود دارد که توزیع سرعت و کمیتهای دیگر جریان در آن مشخص شده است [۷]. در مرز خروجی کانال که شامل دو بلوک (۲) و (۳) می‌شود از شرط جریان توسعه یافته استفاده شده است. مهمترین مسئله در روش عددی حاضر نحوه مرتبط کردن و تبادل کمیتهای اغتشاشی متفاوت بین دو بلوک مجاور در مرز آنهاست.

معادلات حاکم در بلوکها با الگوریتم سیمپل [۱۱] و در شبکه تلفیقی حل شده‌اند. مقدار کمیتهای جریان در روی

نوسانات کوچکی در مرز بلوکها مشاهده می‌شد.

$$k = I_m^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon = C_\mu I_m^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^3 \quad (10)$$

بنابراین اگر در بلوک A از مدل طول اختلاط استفاده شده باشد روی مرزهای آن از جمله مرز مشترک با بلوک مجاور به مقادیر مرزی طول اختلاط نیاز است. حال اگر در بلوک مجاور از مدل اغتشاشی  $\varepsilon - k$  استفاده شده باشد، برای تعیین مقادیر طول اختلاط روی مرز بلوک A باید ابتدا از رابطه (۸) طول اختلاط را در سلول مجاور مرز در بلوک B محاسبه کرد و سپس به کمک رابطه (۴) آن را در روی مرز مشترک میانمایی کرد. بر عکس برای تعیین مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  در مرز مشترک بلوک B ابتدا به کمک روابط (۹ و ۱۰) این مقادیر را در سلول مجاور مرز در بلوک A محاسبه کرده و سپس با رابطه (۴) این مقادیر روی مرز بلوک B میانمایی می‌شوند.

از آنجا که شبکه مورد استفاده در بلوکها شبکه‌های تلفیقی بوده‌اند از روش رای و چو [۱۳] برای ایجاد درگیری بین میدان سرعت و میدان فشار استفاده شده است. اعمال روش فوق در مرز مشترک بلوکها با توجه به شکل (۴) و با اندکی تغییر توسط رابطه زیر صورت گرفته است

$$u_M = [u_A - \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_A] \frac{\delta_B}{\delta_A + \delta_B} + [u_B - \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_B] \frac{\delta_A}{\delta_A + \delta_B} + \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_M \quad (11)$$

### ۳- نتایج عددی

برای بررسی مزایای روش عددی معرفی شده، برنامه رایانه‌ای نوشته شده براساس روش عددی توصیف شده در بخش قبل برای حل عددی جریان مغشوش عبوری از پله عقب‌گرد به کار گرفته شد. صحت، دقت، سرعت همگرایی، زمان محاسباتی، و حافظه به کار گرفته شده در چند ترکیب مدل اغتشاشی مختلف با یکدیگر مقایسه شدند.

در کانال مورد نظر پهنای پایین دست پله سه برابر آن در بالادست پله است. جریان ورودی یکنواخت و عدد رینولدز

روشهای دیگری نیز توسط محققان توصیه شده است که از جمله آنها می‌توان به روشهای بالاوزش در مرز بلوکها اشاره کرد که در این تحقیق نیازی به آن احساس نشد و برای سادگی برنامه نویسی از آنها استفاده نشد. لیکن در مواردی که مشکل احتمالی نوسانات بروز می‌کند به جای رابطه (۴) از روشهای استهلاکی مناسب برای میانمایی در مرز مشترک بلوکها می‌توان استفاده کرد.

اگر در دو بلوک مجاور از دو مدل اغتشاشی متفاوت استفاده شده باشد، باید به هنگام تبادل اطلاعات در مرز مشترک این دو بلوک کمیتهای اغتشاشی یک بلوک به کمیتهای اغتشاشی بلوک مجاور آن تبدیل شود تا بتوان از رابطه میانمایی (۴) استفاده کرد. برای این کار باید از روابط مدلهای اغتشاشی بهره گرفت. در مورد دو مدل اغتشاشی مورد نظر این تحقیق می‌توان به رابطه بین ویسکوزیته اغتشاشی ( $\mu_t$ ) و طول اختلاط ( $I_m$ ) مراجعه کرد [۹]

$$\mu_t = \rho I_m \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (5)$$

که در آن  $\mu$  مؤلفه سرعت به موازات دیواره و  $\nu$  فاصله عمودی از دیوارند. همچنین طول اختلاط هم از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$I_m = \alpha y \quad (6)$$

که  $\alpha$  بر حسب فاصله  $y$  تعیین می‌شود [۹]. انرژی اغتشاشی  $k$  و نرخ استهلاک اغتشاشات  $\varepsilon$  توسط روابط زیر به ویسکوزیته اغتشاشی و طول اختلاط مرتبط می‌شوند [۱۲]

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$I_m = C_\mu \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (8)$$

که در آن  $C_\mu$  دارای مقدار ۰/۰۹ است [۱۰]. با در نظر گرفتن روابط (۵، ۷ و ۸) می‌توان انرژی اغتشاشات و نرخ استهلاک انرژی اغتشاشی را از روابط زیر بر حسب گرادیان سرعت و طول اختلاط محاسبه کرد

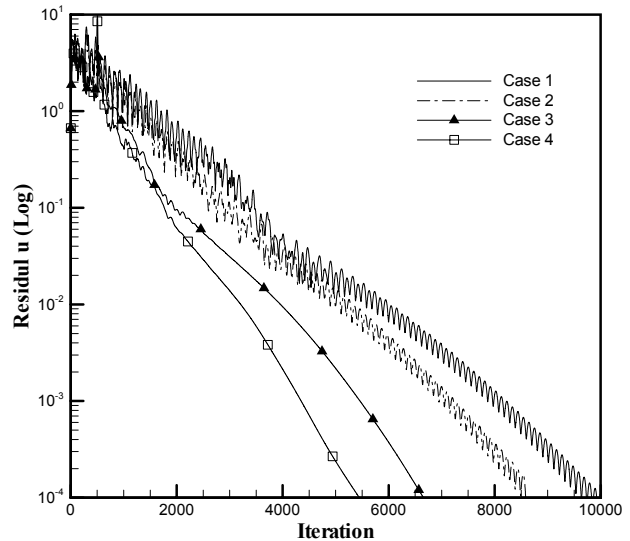
جدول ۱- انواع ترکیب بندی اغتشاشی جریان بر روی پله.

شماره حالت	مدل اغتشاشی بلوک اول	مدل اغتشاشی بلوک دوم	مدل اغتشاشی بلوک سوم
حالت اول	استاندارد $k-\varepsilon$	استاندارد $k-\varepsilon$	استاندارد $k-\varepsilon$
حالت دوم	طول اختلاط پرانتل	استاندارد $k-\varepsilon$	استاندارد $k-\varepsilon$
حالت سوم	طول اختلاط پرانتل	طول اختلاط پرانتل	استاندارد $k-\varepsilon$
حالت چهارم	طول اختلاط پرانتل	طول اختلاط پرانتل	طول اختلاط پرانتل

دوم از مدل طول اختلاط پرانتل و در بلوک سوم از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده شد. در حالت آخر در تمامی بلوکها از مدل طول اختلاط پرانتل استفاده شد.

در شکل (۵) همگرایی باقیمانده مؤلفه افقی سرعت بر حسب تعداد مراحل تکرار برای ترکیب بندیهای اغتشاشی مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مطابق این شکل ترکیب بندی حالت چهارم بیشترین سرعت همگرایی، و ترکیب بندی حالت اول کمترین سرعت همگرایی را نسبت به سایر حالات داشتند. ترکیب بندی حالت سوم نیز نسبت به حالت دوم از سرعت همگرایی بیشتری برخوردار بود.

معیار همگرایی برای تمامی ترکیب بندیهای معرفی شده براساس نزول باقیمانده‌های مؤلفه‌های سرعت و فشار به یک مقدار مشخص تعیین شده بود. از آنجا که زمان هر تکرار برای ترکیب بندیهای مختلف به علت مدل اغتشاشی به کار رفته در بلوکها با هم تفاوت دارند، شکل (۵) به تنهایی مبین سرعت همگرایی ترکیب بندیهای مختلف نمی‌تواند باشد. به همین علت زمان محاسباتی هر یک از ترکیب بندیهای فوق برای رسیدن به معیار همگرایی مورد نظر اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. در ضمن در این جدول حافظه رایانه‌ای مورد نیاز نیز برای هر یک از ترکیب بندیهای مختلف ثبت شده است. طبق مقادیر این جدول، زمان محاسباتی و حافظه رایانه‌ای مورد نیاز (هر دو مقدار گرد شده‌اند) هر دو از ترکیب بندی حالت اول به سمت حالت چهارم کاهش می‌یابند. علت کاهش مقادیر زمان محاسباتی و حافظه رایانه‌ای در حالت دوم، سوم، و چهارم کاهش تعداد بلوکهای



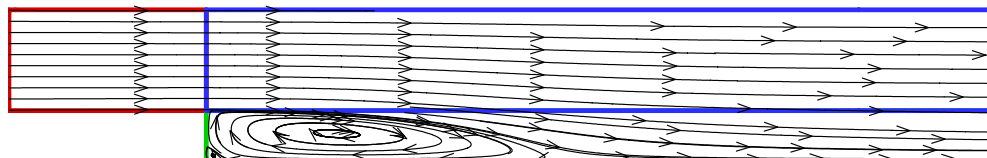
شکل ۵- مقایسه روند همگرایی مؤلفه افقی سرعت بر حسب تعداد مراحل تکرار برای ترکیب بندیهای اغتشاشی مختلف

برابر ۶۹۶۱۰ در نظر گرفته شده‌اند. برای دستیابی به شبکه بهینه ابتدا مطالعه شبکه با مدل اغتشاشی  $k-\varepsilon$  استاندارد در هر سه بلوک صورت گرفت که در نهایت شبکه بهینه شامل شبکه  $60 \times 80$  در بلوک اول، شبکه  $200 \times 80$  در بلوک دوم و شبکه  $200 \times 40$  در بلوک سوم شد.

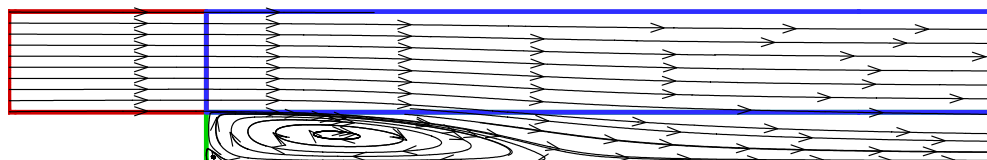
برای حل عددی جریان مغشوش با استفاده از دو مدل اغتشاشی طول اختلاط پرانتل و  $k-\varepsilon$  استاندارد، چهار ترکیب بندی اغتشاشی مختلف که در جدول (۱) معرفی شده‌اند، بررسی شد. در حالت اول در تمامی بلوکها مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد به کار گرفته شد. در حالت دوم برای بلوک اول از مدل طول اختلاط پرانتل و برای دو بلوک بعدی از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده شده است. در حالت سوم در بلوکهای اول و

جدول ۲- مقایسه مدت زمان لازم و حافظه مورد نیاز برای ترکیب بندیهای اغتشاشی مختلف

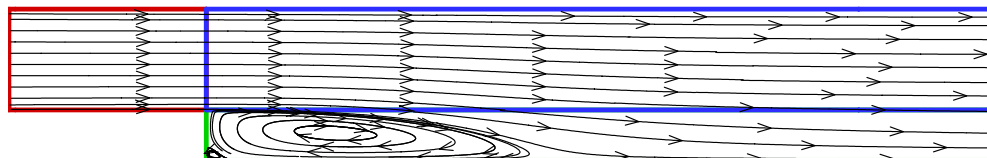
نوع بلوک بندی	مدت زمان لازم برای اجرای برنامه (Min)	حافظه مورد نیاز برای اجرای برنامه (MB)
حالت اول	۱۱۲	۱۲۵
حالت دوم	۸۳	۹۷
حالت سوم	۷۰	۸۱
حالت چهارم	۵۴	۶۸



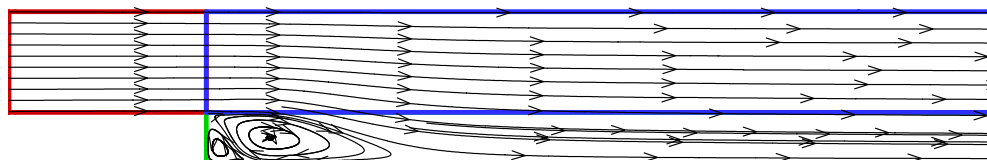
ترکیب بندی اغتشاشی حالت اول



ترکیب بندی اغتشاشی حالت دوم



ترکیب بندی اغتشاشی حالت سوم



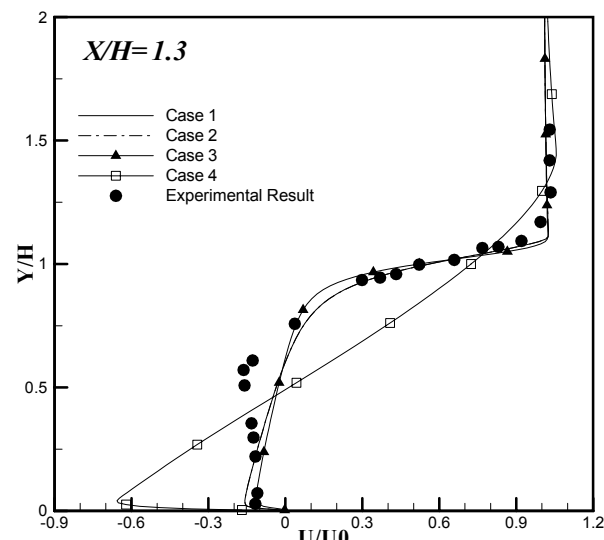
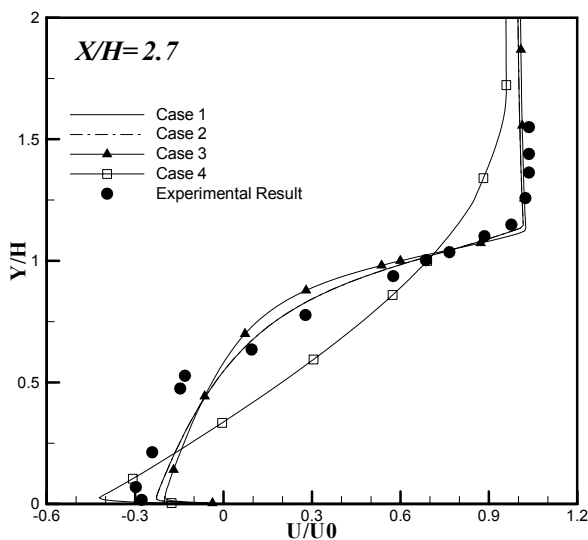
ترکیب بندی اغتشاشی حالت چهارم

شکل ۶- خطوط جریان برای ترکیب بندیهای اغتشاشی مختلف

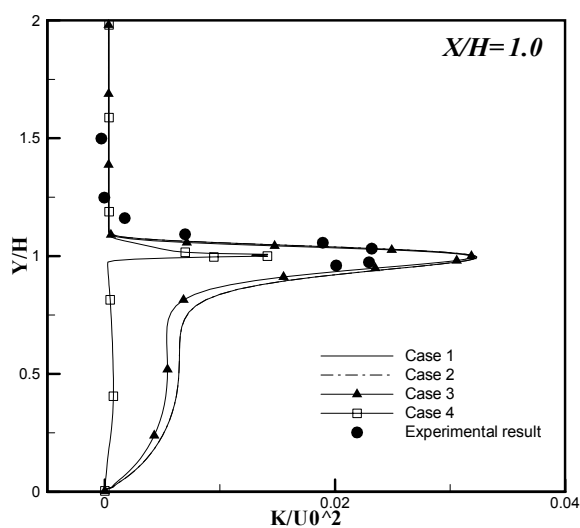
و حافظه رایانه‌ای باید نتایج عددی حاصل شده با یکدیگر و همچنین نتایج تجربی موجود مقایسه می‌شدند. شکل (۶) خطوط جریان و ناحیه جدایش پس از پله را برای ترکیب بندیهای مختلف نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که الگوی جریان و منطقه جدایش برای ترکیب بندیهایی که حداقل شامل مدل اغتشاشی  $k-\varepsilon$  استاندارد در بلوک سوم (شامل منطقه جدایش) هستند بسیار شبیه به هم بوده و تفاوت بسیار

شامل مدل اغتشاشی  $k-\varepsilon$  استاندارد در ترکیب بندی بلوکها بوده است.

مقادیر جدول (۲) نشان داد که استفاده از مدل اغتشاشی جبری هم در زمان محاسباتی و هم در مقدار حافظه رایانه‌ای مورد نیاز به میزان قابل توجهی کاهش ایجاد می‌کند. اما این امر دقت نتایج عددی حاصل را به همان میزان کاهش خواهد داد. برای بررسی میزان دقت نتایج در مقایسه با هزینه‌های محاسباتی



شکل ۷- مقایسه توزیعهای مؤلفه افقی سرعت در دو مقطع پایین دست پله برای ترکیب بندیهای مختلف با نتایج تجربی کیم [۷]



شکل ۸- مقایسه توزیع انرژی جنبشی اغتشاشی در یک مقطع پس از پله با نتایج تجربی کیم [۷]

جنبشی اغتشاشی با نتایج تجربی کیم [۷] در یک مقطع مقایسه شده‌اند. این دو شکل نشان می‌دهند که نتایج عددی دو حالت ترکیب بندی اول و دوم بر هم منطبق بوده و علاوه بر این بیشترین تطابق را با نتایج تجربی دارند. ترکیب بندی حالت سوم نیز با تقریب بسیار خوبی بر نتایج دو حالت اول و دوم منطبق می‌باشد. اما ترکیب بندی حالت چهارم نه تنها با نتایج سه حالت دیگر تطابق ندارد بلکه اختلاف زیادی با نتایج تجربی دارد.

زیادی با ترکیب بندی حالت چهارم دارند. این بدان علت است که پیچیدگی اغتشاشی جریان بیشتر در ناحیه جدایش وجود دارد و در سایر نواحی اغتشاش جریان از مکانیزم برشی ساده‌ای برخوردار است.

در شکل (۷) توزیع سرعت افقی در دو مقطع پایین دست پله برای ترکیب بندیهای مختلف با نتایج تجربی کیم و همکارانش [۷] مقایسه شده‌اند. در شکل (۸) نیز توزیع انرژی



جدول ۳- مقایسه طول ناحیه اتصال مجدد برای ترکیب بندیهای مختلف با نتایج تجربی و عددی موجود

طول ناحیه اتصال مجدد نتایج تجربی کیم [۷]	طول ناحیه اتصال مجدد حل عددی هکمن [۱۴]	طول ناحیه اتصال مجدد حل عددی حاضر	ترکیب بندی
$7/0 \pm 1/0$	۶/۵	۷/۲	حالت اول
$7/0 \pm 1/0$	۶/۵	۷/۲	حالت دوم
$7/0 \pm 1/0$	۶/۵	۶/۹	حالت سوم
$7/0 \pm 1/0$	۶/۵	۵/۶	حالت چهارم

#### ۴- نتیجه گیری

در این متن روش چند بلوکی بهبود یافته‌ای برای جریانهای مغشوش معرفی شد که از طریق به کارگیری ترکیب بندی مناسب مدل‌های اغتشاشی مرتبه بالا و مرتبه پایین در بلوکهای مختلف، قادر است با حفظ دقت متناظر به مدل‌های اغتشاشی مرتبه بالا در تمام بلوکها، به میزان قابل توجهی زمان محاسباتی و حافظه مورد نیاز کامپیوتر را کاهش دهد. این روش، شبیه سازی جریانهای مغشوشی را که با کامپیوترهای شخصی کم حافظه و کم سرعت امکانپذیر نبودند، امکان پذیر خواهد کرد.

کیم و همکارانش [۷] با توجه به آزمایشهایی که انجام دادند، طول نقطه اتصال مجدد را برای این هندسه  $7/0 \pm 1/0$  برابر ارتفاع پله گزارش کردند. هکمن و همکارانش [۱۴] نیز به روش عددی این طول را  $6/5$  برابر ارتفاع پله گزارش کرده‌اند. در جدول (۳) نتایج عددی ترکیب بندیهای معرفی شده با مقادیر این دو مرجع مقایسه شده‌اند. باز هم مشاهده می‌شود که پیش بینیهای دو حالت ترکیب بندی دوم و سوم با تقریب خوبی نتایج تجربی و عددی گزارش شده را پیش بینی می‌کنند در حالی که نتیجه عددی ترکیب بندی چهارم اختلاف زیادی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج عددی حاصل از روش عددی حاضر در موارد مناسب مورد نظر دقیقتر از نتایج عددی مرجع [۱۴] بوده و درصد خطای کمتری دارند.

#### واژه‌نامه

1. multi-block method

2. multi grid

#### مراجع

- Weatherill, N. P., and Forsey C. R., "Grid Generation and Flow Calculation for Complex Aircraft Geometries Using a Multi-Block Scheme," *AIAA Paper*, P. 85, 1985.
- Atkins, H. L., "A Multi-Block Multigrid Method for the Solution of the Euler and Navier - Stokes Equations for Three Dimensional Flows," *AIAA Paper*, pp. 91-101, 1991.
- حیدری م. ر.، طیبی رهنی م. و عظیمی ع.، "شبیه‌سازی جریان مافوق صوت اغتشاشی حول اجسام مدور به انضمام ناحیه پشت با استفاده از شبکه چندبلوکی و مرز بلوکی
- انطباقی،" نشریه علمی پژوهشی مکانیک و هوا فضا، جلد. ۱، شماره. ۱، ص ۶۶-۵۱، دانشگاه امام حسین، ۱۳۸۴.
- Drikakis, D., "A Parallel Multiblock Characteristic-Based Method for Three-Dimensional Incompressible Flow," *Advances in Engineering Software*, Vol. 26, pp. 111-119, 1996.
- Tsai, H. M, Wong, A. S. F, Cai, J., and Liu, F., "Unsteady Flow Calculations with a Parallel Multiblock Moving Mesh Algorithm," *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 6, pp. 1021-1029, 2001.
- Kim, J., and Lee, J., "Characteristic Interface Conditions for Multiblock High-Order Computation

- on singular Structured Grid," *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 12, pp. 2341-2348, 2003.
7. Kim, J., Kline, S. J., and Johnston, J. P., "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow over a Backward-Facing Step," *J. Fluid Eng., ASME Trans*, Vol. 102, pp. 302-308, 1980.
  8. Hoffmann, K.A., *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, 1993.
  9. Prandtl, L., "Über Die Ausgebildete Turbulenz," *ZAMM*, Vol.5, pp.136-139, 1925.
  10. Launder, B. E., and Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flow," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng*, Vol.3, pp. 269-289, 1974.
  11. Patankar, S., *Numerical Study Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, McGraw Hill Book Co., New York, 1980.
  12. Baldwin, B. S., and Lomax, H., "Thin Layer Approximation and Algebraic Model, for Separated Turbulent Flows," *AIAA paper*, Vol. 78, P. 257, 1984.
  13. Rhie, C. M., and Chow, W. L., "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation," *AIAA J.*, Vol. 21, pp. 1525-1532, 1983.
  14. Hackman, P. L., Raithby, G. D., and Strong, A. B., "Numerical Predication of Flows Over Backward Facing Step by a Finite Element Method; Comparison with Finite Volume Solutions and Experiments," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 4, pp. 711-724, 1984.