

معرفی و آزمایش یک مدل لایه مرزی با بستار مرتبه دوم

مجید مزرعه فراهانی^{۱*}، علی جلالی^۲ و محمد علی ثقفی^۳

^۱ استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ کارشناس ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۲/۲۹، پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱۱)

چکیده

مدل ملور-یامادا یکی از مدل‌های رایج در شبیه‌سازی لایه مرزی است که در مدل‌های پیش‌بینی عددی کاربرد فراوان دارد. این مدل جمله‌های تالطمی را براساس بستار مرتبه دوم پارامترسازی می‌کند. با وجود استفاده گسترده از مدل ملور-یامادا، این مدل معایبی نیز دارد که از دقت آن می‌کاهد. مهم‌ترین ضعف این مدل ناتوانی در تشخیص مولفه‌های قائم و افقی انرژی جنبشی پیچکی از یکدیگر است (این مدل مقدار $1/2 v'^2$ را برابر با $1/2 w'^2$ پیش‌بینی می‌کند). همچنین در این مدل میزان تولید انرژی جنبشی پیچکی برابر میزان اتلاف آن در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه در پیش‌بینی تولید پیچک‌های لایه مرزی خطا رخ می‌دهد. برای بهبود و تصحیح این خطاها در مدل‌های پیش‌بینی عددی، کانونتو و همکارانش مدل جدیدی معرفی کردند که معایب پیشین را ندارد و نتایج هماهنگ‌تری با مشاهدات دارد. در این مقاله مدل کانونتو برای استفاده در مدل‌های جامع پیش‌بینی هوا تهیه می‌شود، با استفاده از داده‌های LES مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و شارهای تالطمی از جمله uw ، $v'w$ ، θw و کمیت‌های مهم در لایه مرزی مانند ارتفاع لایه مرزی و عدد ریچاردسون محاسبه می‌شود. این مدل قادر به شناسایی و تشخیص مولفه‌های افقی و قائم انرژی جنبشی تالطمی در لایه مرزی خنثی است و ارتفاع لایه مرزی با استفاده از این مدل به خوبی برآورد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شارهای تالطمی، لایه مرزی، تالطم، ملور-یامادا

Introducing and examining of a second order closure boundary layer model

Mazraeh Farahani, M.¹, Jalali, A.² and Saghafi, M. A.³

¹ Assistant Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

² Graduate student of Meteorology, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³ Research Assistant, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 19 May 2010, Accepted: 31 Jan 2012)

Abstract

One of the popular and well known models in boundary layer that is implemented in most of the operational and familiar models is the Mellor-Yamada model of atmospheric boundary layer. One reason that this model is so popular is its ability in simulations and exposing of different phenomena in the boundary layer. This model has been constructed based on second order closure hypothesis. Beside all of the positive properties that make this model admirable, it has some deficiency and insufficient accuracy in approximating turbulent terms in relevant equations. The most important weakness of this model is its inability of differentiation between vertical and horizontal components of turbulent kinetic energy (it can not separate $1/2 v'^2$ from $1/2 w'^2$). This feature of model make it unable to distinguish large eddies which grow up in depth of boundary layer from smaller

one that has similar scales in both vertical and horizontal directions. In addition this model assumes that the production of turbulent kinetic energy is equivalent to the consumption of it. This characteristic results in error in small eddies simulation in the boundary layer.

The shortcoming of mentioned model motivate scientist to introduce new models without those deficiencies. Canuto and his team recently introduced a model more compliance with ongoing phenomena in the boundary layer. This model is discussed extensively here and for being implemented in the numerical weather prediction models, it is examined by available Large Eddy Simulation data. The turbulent fluxes such as uw , v_w , θ_w are calculated and discussed with details of achievements. The other important variables in the boundary layer that has critical role on setting up of fluxes and currents in turbulent boundary layer like dept of boundary layer and Richardson number are also computed and analyzed.

Results show that the proposed new model is able to distinguish between large and small eddies by differentiating between vertical and horizontal component of variables specially of turbulent kinetic energy. The resulted height of boundary layer has a very good agreement with observation. Various simulations in different scientific centers are presented and are compared with new model results. It is clear in the figures that this model could approximate the turbulent currents better than previous ones.

Key words: Boundary layer model, Mellor-Yamada model, Closure problem, Numerical weather prediction, TKE Budget

۱ مقدمه

هنگامی که مرتبه بستر مدل تلاطمی افزایش پیدا می کند، در واقع معادله ها کامل ترند و سازوکارهای فیزیکی بیشتری بر تلاطم حاکم می شود. این سازوکارها شامل همبستگی های فشار - سرعت و فشار - دما و متغیرهای اتلاف می شوند که با بالاتر رفتن مرتبه باید کامل تر شوند. البته این مسئله در عمل ناممکن است و در واقع سامانه های تلاطمی که دارای مرتبه محدود هستند، تقریبی از واقعیت اند. در نتیجه بر سازوکارها محدودیت اعمال می شود و به این دلیل همبستگی های تلاطمی مدل سازی می شوند. یکی از مدل های تلاطمی که بستارهای تلاطمی را در یک چارچوب قرار می دهد، مدل ملور و یامادا (۱۹۷۴) است که در آن با فرض هایی به ساده سازی معادلات پرداخته شده است. گرچه این ساده سازی ها به کاسته شدن از دقت مدل می انجامد، ولی ساختار ذاتی را نگه می دارد. در این مدل از متغیرهای زیادی شامل متغیرهای تلاطمی، میدان میانگین تلاطمی، انرژی میانگین

به طور کلی مدل های عددی که در بررسی لایه مرزی جو مورد استفاده قرار می گیرند، به مدل های پیش یابی و مدل های فرایابی تقسیم می شوند. در مدل های پیش یابی، معادله های تکانه به همراه معادله های انرژی ترمودینامیکی و پیوستگی به صورت زمانی و مکانی انتگرال گیری می شوند. در این معادله ها تعداد مجهول ها از معلوم ها بیشتر است و یکی از مسئله های مهم، روش تعیین جمله های واگرایی شار تلاطمی است که شامل واریانس ها و کواریانس های مجهول اند. برای حل این معادله ها از معادله های دیگری استفاده می کنیم که باعث ساده سازی جمله های واگرایی شار می شوند. این روش، بستر خوانده می شود. در این روش برای وصف ریاضی وار تلاطم، با استفاده از جمله های معلوم و تقریب برخی جمله ها در معادله های حاکم، جمله های مجهول تعیین می شوند. هر بستر با توجه به معادله ها و ساده سازی هایی که در آن صورت گرفته است، دارای مرتبه متفاوتی است.

صورت گرفته است. در این مقاله با تمرکز بر پارامترسازی کامل همبستگی فشار- سرعت و فشار- دما که از سوی کانوتو (۲۰۰۱) عرضه شده است، به بررسی آن پرداخته می‌شود. در این مدل با ساده‌سازی‌ها، دو معادله دیفرانسیل به دست می‌آید که با حل آنها، حل بقیه معادله‌ها نیز حاصل می‌شود.

۲ مدل پیراسته ملور- یامادا

در این مدل از معادله‌های میانگین شامل سرعت میانگین و دمای پتانسیل میانگین و معادله‌های تلاطمی شامل تنش‌های رینولدز، انرژی جنبشی تلاطمی، شار گرما و واریانس دما استفاده شده است. معادله‌های مولفه‌های U و V سرعت میانگین و Θ ، دمای پتانسیل میانگین که انتگرال‌گیری زمانی و مکانی می‌شوند، به صورت زیرند.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f(V - Vg) - \frac{\partial uw}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -f(U - Ug) - \frac{\partial vw}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} w\theta \quad (3)$$

$$+ \frac{f}{g\alpha} \left(V \frac{\partial U_g}{\partial z} - U \frac{\partial V_g}{\partial z} \right) - W \frac{\partial \Theta}{\partial z}$$

در این روابط U_g و V_g مولفه‌های باد زمین‌گرد، t زمان، Z فاصله شبکه‌ای در راستای قائم، f پارامتر کوریولیس α و ضریب انبساط حجمی هستند. با استفاده از معادله‌های کمکی که برای تعیین مقیاس زمان و اتلاف در معادله‌های حاکم و بسترهای تلاطمی که در مقاله چنگ و همکاران (۲۰۰۲) به صورت کامل آمده است، معادلات شامل واریانس‌ها و کواریانس‌های مجهول حاصل می‌شوند.

تلاطمی و همچنین ثابت‌های زیادی استفاده شده است. ساده‌سازی‌های صورت گرفته در این مدل به صورت سامان‌مند و برپایه مشاهدات، پارامترهای موثری اعمال شده است که در معادله‌ها، دارای درجه ناهمساگردی کوچک‌اند. مدل ملور و یامادا (۱۹۷۴) با وجود کاربرد گسترده‌ای که در مدل‌های پیش‌بینی پیدا کرده است، دارای کاستی‌هایی است که برای نمونه می‌توان به مواردی اشاره کرد. این مدل توانایی تشخیص مولفه‌های قائم و افقی انرژی جنبشی تلاطمی در جو خنثی را ندارد. در نتیجه در لایه مرزی خنثی، مقدار $\frac{1}{2}w^2$ هم‌مرتبه با $\frac{1}{2}w^2$ محاسبه می‌شود، درحالی‌که داده‌های آزمایشگاهی و واقعی نشان می‌دهند که w^2 همیشه به مقدار قابل توجهی کوچک‌تر از v^2 است. یکی دیگر از این ضعف‌ها برآورد کمتر از انتظار ارتفاع لایه مرزی است. با توجه به این ضعف‌ها و استفاده گسترده آن در مدل‌ها افراد گوناگونی سعی در تصحیح و بهبود این مدل کردند که از میان آن‌ها می‌توان به ناکانیشی (۲۰۰۱) و چنگ و همکاران (۲۰۰۲) اشاره کرد. جلالی (۱۳۸۸) نیز به بررسی این موضوع پرداخته است. یکی دیگر از ضعف‌هایی که کانوتو (۲۰۰۱) به آن اشاره کرد این است که به دلیل اینکه در مدل، تولید انرژی جنبشی تلاطمی برابر اتلاف است، عدد ریچاردسون بحرانی در شارهای با چینه‌بندی پایدار داده‌های (LES) (Large Eddy Simulation)، چهار برابر کوچک‌تر پیش‌بینی می‌شود. دو دلیل برای به وجود آمدن این کاستی‌ها در مدل وجود دارد. در این مدل از یک مقیاس طول اصلی و واحد استفاده شده است، یعنی همه مقیاس‌های طول برای فرایندهای متفاوت و پیچک‌های با اندازه‌های متفاوت، متناسب با این مقیاس طول اصلی هستند. دلیل دیگر این است که پارامترسازی همبستگی فشار- سرعت و فشار- دما به صورت ناقص صورت پذیرفته و یا به عبارتی بیش از اندازه ساده‌سازی

$$\left. \frac{\partial \overline{w\theta}^n}{\partial z} \right|_k^C = \frac{\overline{w\theta}_{k+1}^n - \overline{w\theta}_{k-1}^n}{2\Delta z} \quad (۹)$$

در این رابطه‌ها فرض‌های زیر نیز اعمال شده است.

$$W \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (۱۰)$$

$$U_{geo} = cte, V_{geo} = cte,$$

$$\frac{\partial U_{geo}}{\partial z} = cte, \frac{\partial V_{geo}}{\partial z} = cte$$

شرایط مرزی مدل به این صورت است که مرز پایین، زمین و یا به عبارتی مرز سخت است که در آن باد در سطح زمین برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و دمای پتانسیل در سطح با توجه به داده‌های مورد نظر تعیین می‌شود. در معادله‌های (۴) و (۵) و (۶) U و V و Θ ، نخستین تراز شبکه تا $k-1$ آمین نقطه محاسبه می‌شوند. از آنجاکه برای تعیین کمیت‌های میانگین در نقطه $k-1$ به مقادارهای $\overline{u'w'}$ و $\overline{v'w'}$ و $\overline{w'\theta'}$ در نقطه K نیاز داریم، مقدار این کمیت‌ها در نقطه k برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$\overline{u'w'} \Big|_k = 0 \quad (۱۲)$$

$$\overline{v'w'} \Big|_k = 0 \quad (۱۳)$$

$$\overline{w'\theta'} \Big|_k = 0 \quad (۱۴)$$

$$U \Big|_k = U_{geo} \quad (۱۵)$$

$$V \Big|_k = V_{geo} \quad (۱۶)$$

$$\Theta \Big|_k = \Theta \Big|_{k-1} \quad (۱۷)$$

همچنین برای محاسبه کمیت‌های میانگین در نخستین نقطه شبکه، شارها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$\overline{u'w'} \Big|_s = \overline{u'w'} \Big|_1 \quad (۱۸)$$

$$\overline{v'w'} \Big|_s = \overline{v'w'} \Big|_1 \quad (۱۹)$$

۳ حل عددی مدل

برای گسسته‌سازی معادله‌های (۱) تا (۳) از طرح‌واره برای گسسته‌سازی معادله‌های (۱) تا (۳) استفاده می‌شود. در این طرح‌واره بخش زمانی معادله‌ها به صورت پیش‌رو و بخش مکانی به صورت مرکزی گسسته می‌شوند. شکل گسسته معادله‌های (۱) تا (۳) با استفاده از این روش به (طولوت زیر است:

$$U_k^{n+1} = U_k^n + \Delta t \left[f(V_k^n - V_g) - \left. \frac{\partial \overline{uw}^n}{\partial z} \right|_k^C \right] \quad (۴)$$

$$V_k^{n+1} = V_k^n - \Delta t \left[f(U_k^n - U_g) - \left. \frac{\partial \overline{vw}^n}{\partial z} \right|_k^C \right] \quad (۵)$$

$$\Theta_k^{n+1} = \Theta_k^n + \Delta t \left[\frac{f}{g\alpha} (V_k^{n+1} \frac{\partial U_g}{\partial z} - U_k^{n+1} \frac{\partial V_g}{\partial z}) - \left. \frac{\partial \overline{w\theta}^n}{\partial z} \right|_k^C - W \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (۶)$$

در این رابطه‌ها از بالانویس n برای نمایش گسسته‌سازی زمانی و پایین‌نویس k برای نمایش گسسته‌سازی مکانی (راستای قائم) متغیرها استفاده شده است. بالانویس C نشان‌دهنده عملگر مرکزی است و مشتق مرتبه اول متغیرها به صورت زیر برآورد می‌شود:

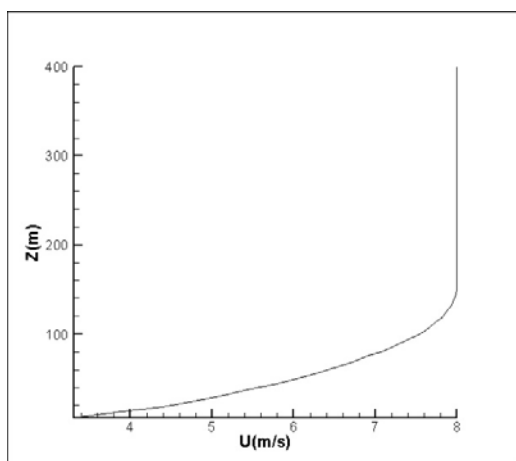
$$\left. \frac{\partial \overline{uw}^n}{\partial z} \right|_k^C = \frac{\overline{uw}_{k+1}^n - \overline{uw}_{k-1}^n}{2\Delta z} \quad (۷)$$

$$\left. \frac{\partial \overline{vw}^n}{\partial z} \right|_k^C = \frac{\overline{vw}_{k+1}^n - \overline{vw}_{k-1}^n}{2\Delta z} \quad (۸)$$

است. این گروه‌ها شامل هفت سازمان هواشناسی کشوری، هفت دانشگاه و دو مرکز تحقیقاتی و مرکز اروپایی ECMWF هستند. نام مدل‌ها به‌همراه حالت کاربردی و نوع و مرجع آنها در جدول ۱ آورده شده است. شرح داده‌های ناکانیشی به تفصیل در (ناکانیشی، ۲۰۰۱) آمده است. این داده‌های LES شامل شش دسته داده است که سه مورد مربوط به لایه مرزی پایدار و سه مورد مربوط به لایه مرزی ناپایدار یا همرفتی هستند. تعداد نقاط شبکه‌ای در راستای قائم ۶۰ عدد با فاصله ۴ متر و باد زمین‌گرد نیز در آن ۲ متر بر ثانیه است.

۵ نتایج اجرای مدل با داده‌های GABLS

در این اجرا انتگرال‌گیری برای مدت ۹ ساعت و با گام زمانی ۱۰ ثانیه و فاصله شبکه ای ۶/۲۵ متر صورت می‌گیرد. نتایج و خروجی‌های مدل برای هر ساعت میانگین‌گیری شده‌اند. نیم‌رخ اولیه باد در شکل ۱، نیم‌رخ دمای پتانسیل در شکل ۳، نتایج شبیه‌سازی این کمیت‌ها با مدل جدید و مدل‌های دیگر در شکل ۲ و شکل ۴، شارها در شکل ۵ و شکل ۶، عدد ریچاردسون در شکل ۷ و در پایان ارتفاع لایه مرزی مدل کنونی و مدل‌های دیگر در شکل ۸ آمده‌اند.



شکل ۱. نیم‌رخ سرعت باد اولیه داده‌های گبلز.

$$\overline{w'\theta'} \Big|_s = \overline{w'\theta'} \Big|_1 \quad (20)$$

به این صورت مرز بالا مرز ثابت می‌شود. در این مدل به‌علت اینکه مدل برای شرایط خنثی طراحی شده است، جمله آخر در رابطه (۶) برابر صفر است. به دلیل تغییرات کم چگالی در لایه مرزی، چگالی در آن ثابت در نظر گرفته شده و نیروی کوریولیس نیز ثابت فرض شده است.

$$f = 1.39 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \quad (21)$$

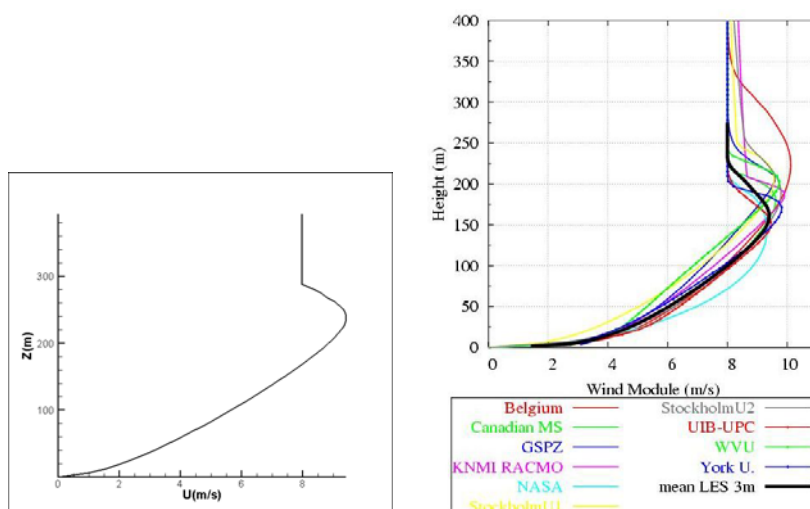
گام زمانی Δt برای اجرای مدل با توجه به شرط $\frac{c\Delta t}{\Delta z} \leq 1$ تعیین می‌شود که در آن Δz که دارای مقداری ثابت است، با استفاده از داده‌های اولیه به دست می‌آید و c برابر باد زمین‌گرد در نظر گرفته می‌شود.

۴ داده‌های اولیه

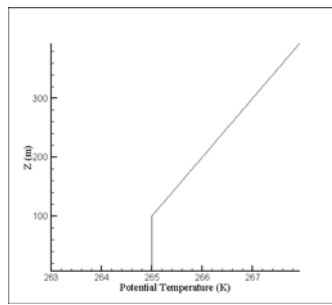
داده‌هایی که برای خوراندن به مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند، شامل داده‌های (Large Eddy Simulation) LES گبلز (کوکسارت، ۲۰۰۶) و ناکانیشی (ناکانیشی، ۲۰۰۱) هستند. گبلز کوتاه‌نوشت GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study یا طرحی تحقیقاتی برای بررسی لایه مرزی جو است. این طرح شامل شبیه‌سازی مدل‌های متفاوت با شرایط اولیه کاری و کوزووویچ (کوزووویچ و کاری، ۲۰۰۰) در لایه مرزی پایدار و مقایسه آنها است. گستره قائم این داده‌ها ۴۰۰ متر با فاصله شبکه‌ای ۶/۲۵ متر، شامل ۶۴ نقطه شبکه‌ای قائم است. هر گام زمانی آن ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است که با توجه به مدل عددی، کاهش هم می‌یابد. باد زمین‌گرد در راستای X با ارتفاع، ثابت و برابر با ۸ متر بر ثانیه است و مدل به مدت ۹ ساعت اجرا می‌شود. ۱۶ گروه تحقیقاتی در مقایسه‌ای که با این داده‌ها صورت گرفته است با ۲۰ طرح‌واره متفاوت شرکت کرده‌اند که نام مراکز تحقیقاتی مربوط به هریک در جدول ۱ آورده شده

جدول ۱. نام مدل‌ها به همراه حالت کاربردی و نوع و مرجع آنها (کوکسارت، ۲۰۰۶).

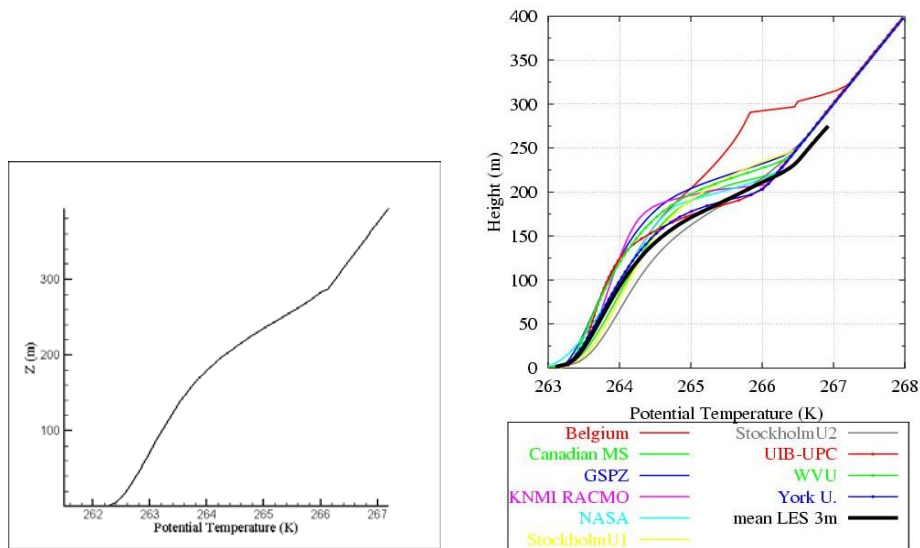
Model	Use	Type	Ref
ECMWF	Operational	1st order	Beljaars and Viterbo (1998)
ECMWF-MO	Operational-test	1st order	
NOAA-NCEP	Operational	1st order	Hong and Pan (1996)
MeteoFrance	Operational	1st order	Louis et al. (1982)
JMA	Operational	1st order	Mellor and Yamada (1974)
MetOffice	Operational	1st order	Louis (1979)
MetOffice-res	Research	1st order	Williams (2002)
WageningenU	Research	1st order	Duynkerke (1991)
SandiaLabs	Research	ODT	Kerstein et al. (2001)
MSC	Operational	e-1	Belair et al. (1999)
KNMI-RACMO	Operational	e-1	Lenderink and Holtslag (2004)
UIB-UPC	Research	e-1	Cuxart et al. (2000)
NASA	Research	e-1	Xue et al. (2000)
WVU	Research	e-1	Sykes and Henn (1989)
YorkU	Research	e-1	Weng and Taylor (2003)
LouvainU-L	Research	e-1	Therry and Lacarr'ere (1983)
LouvainU-eps	Research	e-E	Duynkerke (1988)
SwedishMS	Research	e-E	
StockholmU	Research	e-1	Andren (1990)
StockholmU-sim	Research	e-02	Mauritsen et al. (2004)



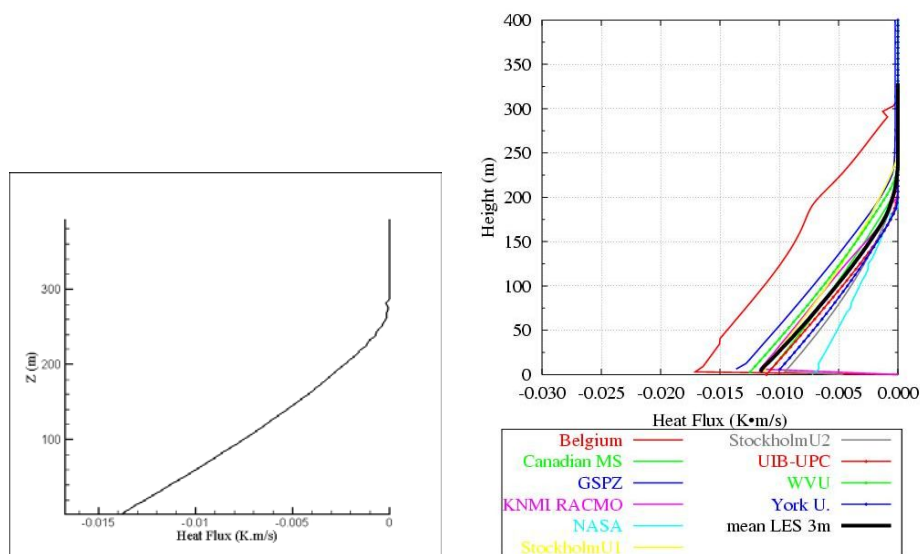
شکل ۲. نیم‌رخ باد شبیه‌سازی شده با مدل جدید (چپ) داده‌های گبلز پس از ۹ ساعت و نیم‌رخ باد شبیه‌سازی شده با مدل‌های متفاوت (راست) پس از ۹ ساعت.



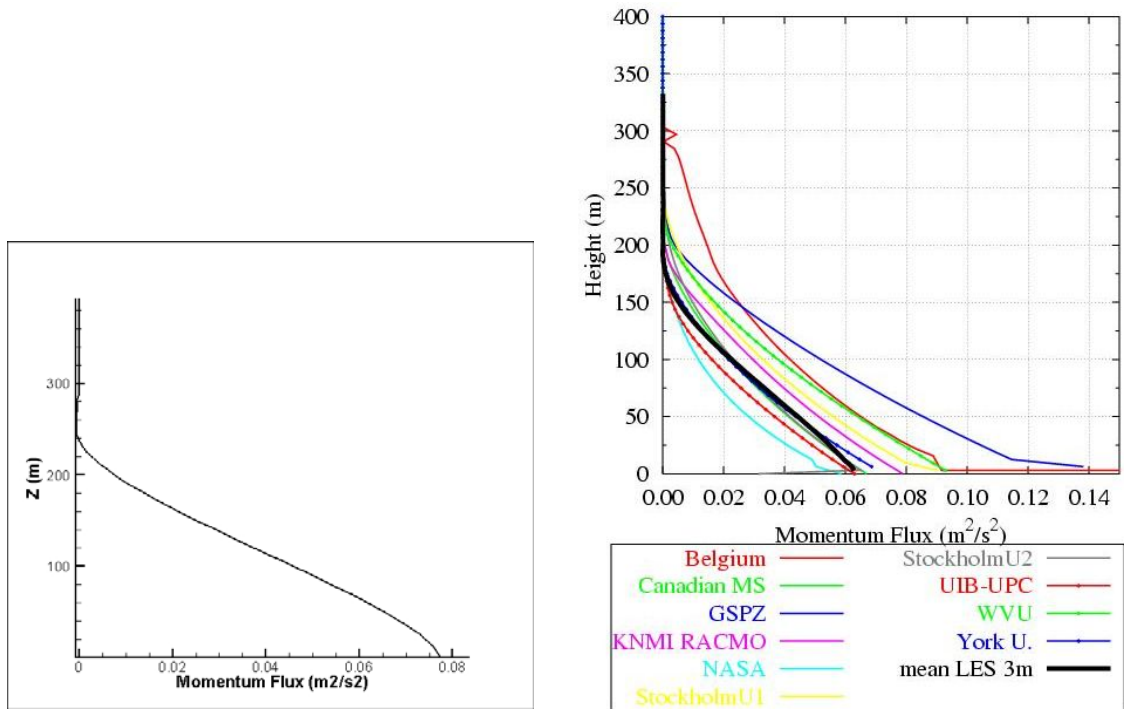
شکل ۳. نیم‌رخ دمای پتانسیل اولیه داده‌های گبلز.



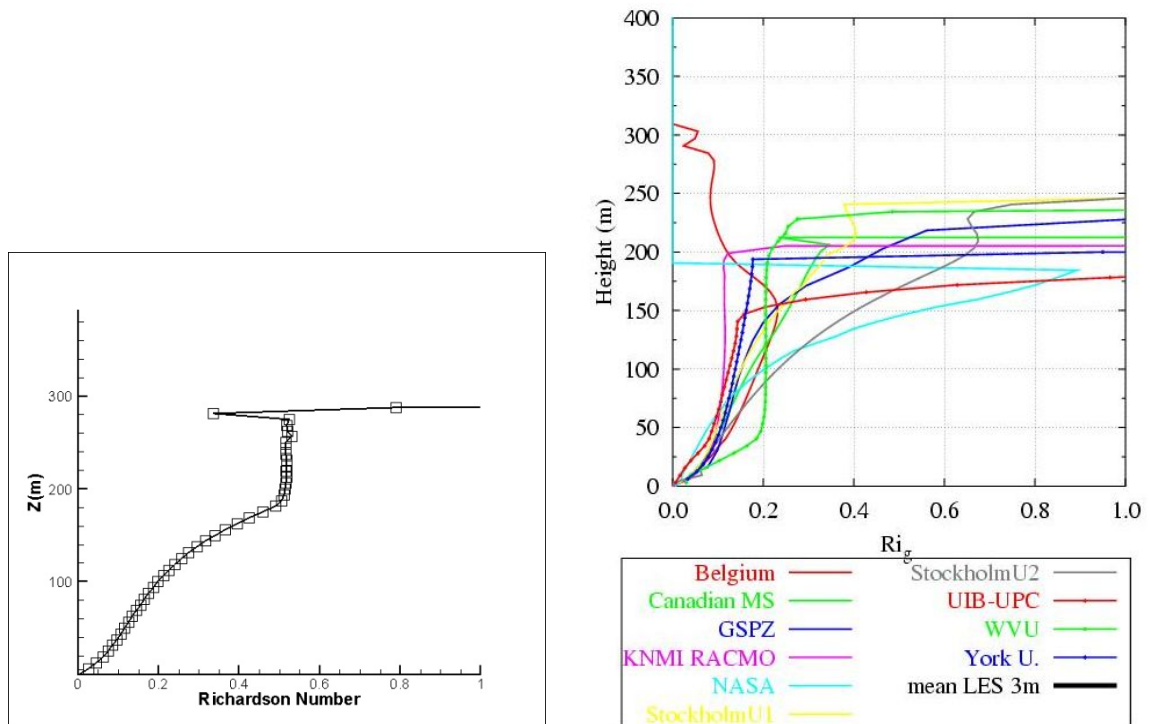
شکل ۴. نیم‌رخ دمای پتانسیل شبیه‌سازی شده با مدل جدید (چپ) داده‌های گبلز پس از ۹ ساعت و نیم‌رخ دمای پتانسیل شبیه‌سازی شده با مدل‌های متفاوت (راست) پس از ۹ ساعت.



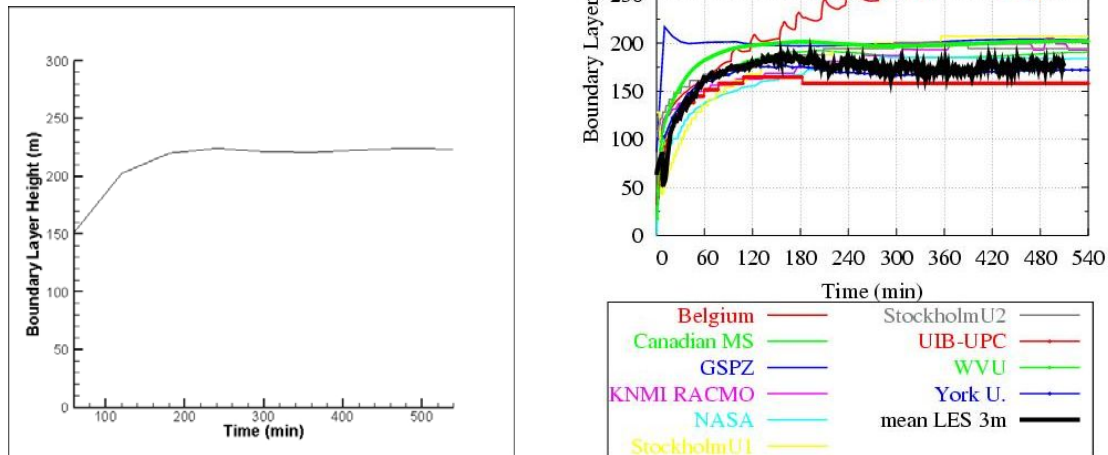
شکل ۵. شار گرمای محاسبه شده با مدل جدید (چپ) داده‌های گبلز پس از ۹ ساعت و شار گرمای محاسبه شده با مدل‌های متفاوت (راست) پس از ۹ ساعت.



شکل ۶. شار تکانه محاسبه شده با مدل جدید (چپ) داده‌های گبلز پس از ۹ ساعت و شار تکانه محاسبه شده با مدل‌های متفاوت (راست) پس از ۹ ساعت.



شکل ۷. عدد ریچاردسون داده‌های گبلز مدل جدید و مدل‌های متفاوت پس از ۹ ساعت.



شکل ۸. ارتفاع لایه مرزی داده‌های گبلز محاسبه‌شده با مدل‌های متفاوت و مدل کنونی.

نمایانگر رخداد جت سطح پایین است. وجود باد بیشینه در طول وارونگی شبانه باعث کاهش و به صفر رسیدن تنش‌های تلاطمی در بالای لایه مرزی پایدار می‌شود. در چنین شرایطی تعادل زمین‌گرد برقرار است و باعث به وجود آمدن نوسان‌های لختی می‌شود و تولید تلاطم که مربوط به جت و میرایی آن که مربوط به تنش‌های تلاطمی است به تعادل می‌رسند. با مقایسه شکل‌های ۲ و ۴ که در آنها نتایج باد و دمای پتانسیل حاصل از این مدل با بقیه مدل‌ها مقایسه شده‌است، مشاهده می‌شود دمای پتانسیل و باد شبیه‌سازی شده در این مدل و مدل LES کاملاً با یکدیگر منطبق‌اند. بیشتر طرح‌واره‌های عملیاتی، دمای پتانسیل را در زیر لایه مرزی پایدار، گرم‌تر از داده‌های LES و در بالای آن گرم‌تر برآورد کرده‌اند و طرح‌واره‌های مرتبه بالاتر، آن را به‌خوبی برآورد کرده‌اند. مدل‌های عملیاتی که دارای اختلاف زیادی هستند، توانایی تولید باد بیشینه در نزدیکی بالای لایه مرزی پایدار را ندارند. در شکل ۵، شار گرما و در شکل ۶، شار تکانه

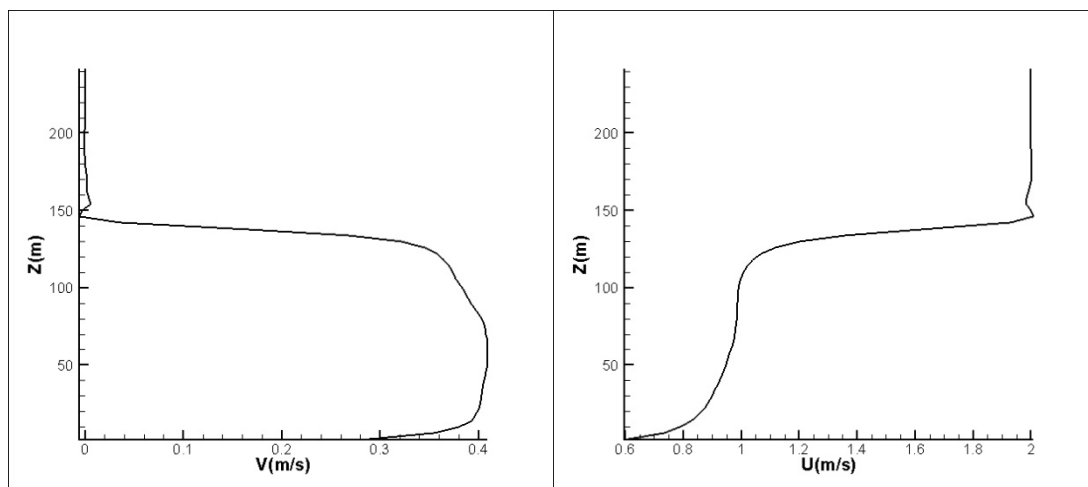
این گروه داده‌ها تحت سرمایش سطحی و شار گرمای سطحی پایین‌سو، باد زمین‌گرد نسبتاً قوی و وجود وارونگی دما تقریباً پایدار است که این موضوع کاملاً در نیم‌رخ دمای پتانسیل شبیه‌سازی شده مشهود است. همچنین شرط مرزی اعمال‌شده به این داده‌ها (که دمای سطح زمین با آهنگ ثابتی با گذشت زمان کاهش می‌یابد) موثر است. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ تا ارتفاع ۱۰۰ متری شرایط تقریباً خنثی و از آنجا به بالا وارونگی دما آغاز و جو پایدار می‌شود. با گذشت زمان ارتفاع لایه وارونگی افزایش پیدا می‌کند و عمق لایه آمیخته در طول شبیه‌سازی مقداری افزایش پیدا می‌کند. در زیر ارتفاع وارونگی که ساختار لایه مرزی دارای شرایط نسبتاً خنثی است، اثرات تلاطمی نمایان است و از آنجا به بالا که وارونگی وجود دارد، شناوری فروکش می‌کند و اثرات تلاطمی قابل تشخیص نیست. شار گرما تقریباً تا ارتفاع ۲۰۰ متری امتداد یافته است ولی مقادیر قابل توجه آن تا ارتفاع ۱۰۰ متری است. وجود باد بیشینه در چینه‌بندی پایدار لایه مرزی

اساس رشد نیافتن بسیار زیاد لایه مرزی پایدار را توجیه می‌کنند، در صورتی که مدل‌های مرتبه یک به صورت نوعی از عدد ریچاردسون بحرانی استفاده نمی‌کنند. این توضیحات در مورد سرعت باد و شار تکانه هم صادق است.

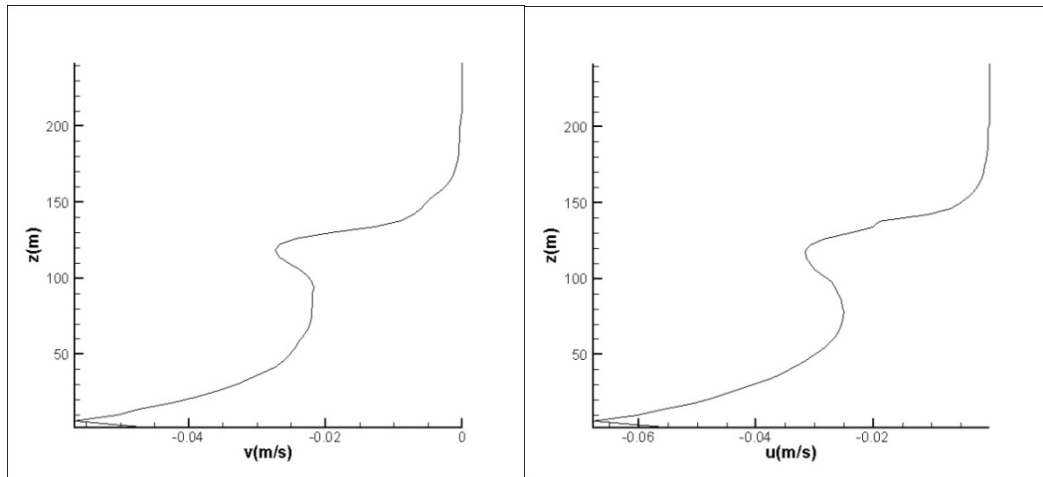
۶ نتایج اجرای مدل با داده‌های ناکائیشی

شش دسته داده ناکائیشی، حالت ناپایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. ناپایداری به صورت افزودن پریشیدگی سرعت به سرعت میانگین وارد می‌شود که این پریشیدگی سرعت در شکل ۱۰ آورده شده است. در این داده‌ها انتگرال‌گیری به مدت ۹۰ دقیقه و با گام زمانی ۰/۲ ثانیه و فاصله شبکه ای ۴ متر صورت می‌گیرد. نتایج و خروجی‌های مدل برای هر ۱۵ دقیقه میانگین‌گیری شده‌اند. نیم‌رخ اولیه باد در شکل ۹ و شبیه‌سازی آن در شکل ۱۱ و دمای پتانسیل اولیه و نتیجه حاصل از مدل در شکل ۱۲ آورده شده‌اند. شار گرما و تکانه حاصل در شکل ۱۳ و واریانس v'^2 و واریانس w'^2 در شکل ۱۴ آورده شده‌اند. عدد ریچاردسون در شکل ۱۵ و ارتفاع لایه مرزی در شکل ۱۶ مشاهده می‌شوند.

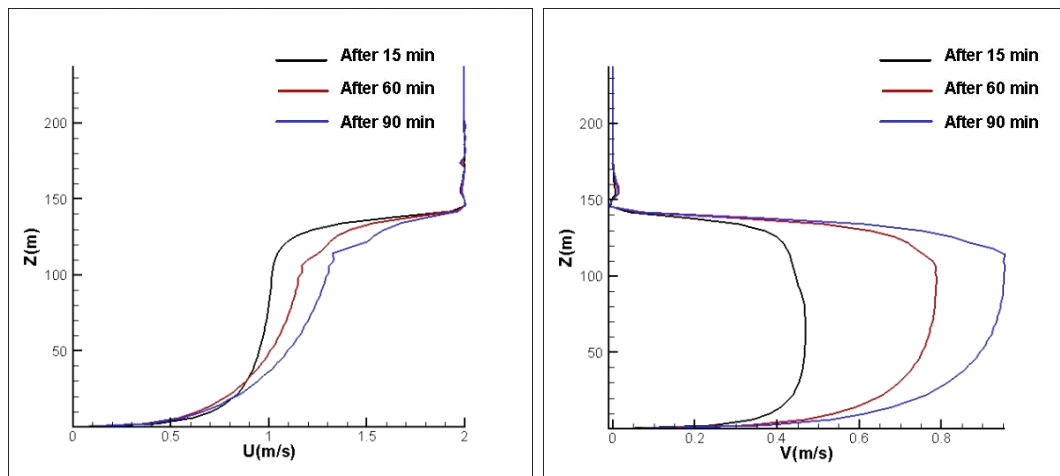
مقایسه شده‌اند. شار گرمای مدل‌های تحقیقاتی و مرتبه بالا دارای نتایج نزدیک به داده‌های LES هستند، در صورتی که مدل‌های مرتبه یک و عملیاتی دارای مقادیر بزرگ‌تری هستند. شارهای محاسباتی این مدل با نتایج LES برابر است. عدد ریچاردسون برای این داده‌ها به دلیل پایداری، دارای مقادیر بسیار بزرگ‌تر از یک هستند و در اینجا مقدار بحرانی آن به ۰/۸ می‌رسد. با توجه به شارها در این مدل، ارتفاع لایه مرزی با دقت بسیار خوبی برآورد شده است. مقدارهای پراکنده‌ای برای ارتفاع لایه مرزی نسبت به پارامترهای دیگر با مدل‌های متفاوت برآورد شده است. عمق لایه مرزی پایدار مدل‌های عملیاتی، بسیار بزرگ‌تر از داده‌های LES و در مقابل، مدل‌های تحقیقاتی دارای عمق کمتر و نزدیک‌تر به نتایج LES هستند. این تفاوت در مدل‌های هم‌مرتبه، به طول اختلاط و توابع پایداری آنها مربوط است. ارتفاع زیاد لایه مرزی در مدل‌های عملیاتی، بیانگر ضریب‌های تبادل بزرگ بین سطوح متفاوت در آنها است که باعث انتقال ویژگی‌های هوا در لایه سطحی به جو آزاد و از دست دادن برخی ویژگی‌های خاص، مانند وارونگی در سطوح بالا می‌شود. به‌طور کلی مدل‌های دارای مرتبه بالاتر با توجه به نتایج آنها بر عدد ریچاردسون بحرانی دلالت دارند و بر همین



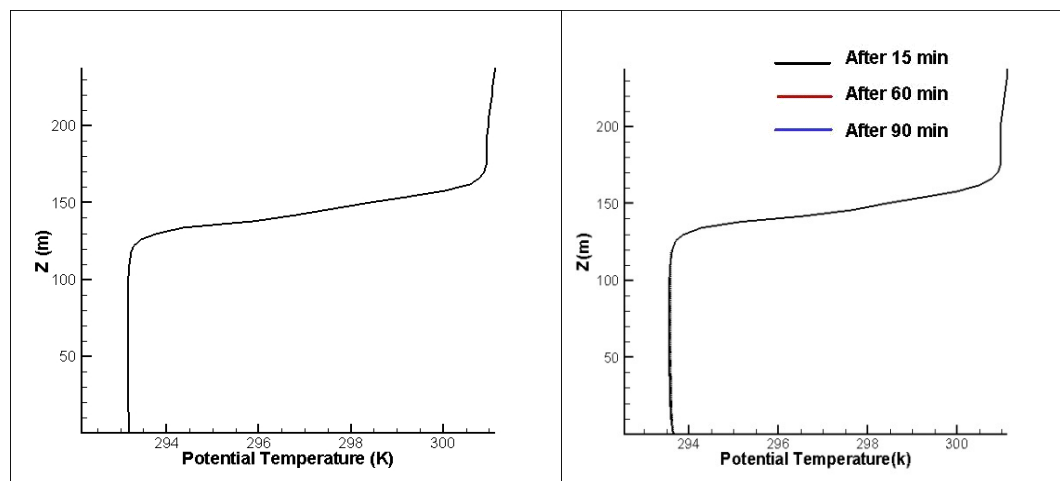
شکل ۹. نیم‌رخ باد اولیه مولفه u (چپ) و مولفه v (راست) داده‌های ناکائیشی.



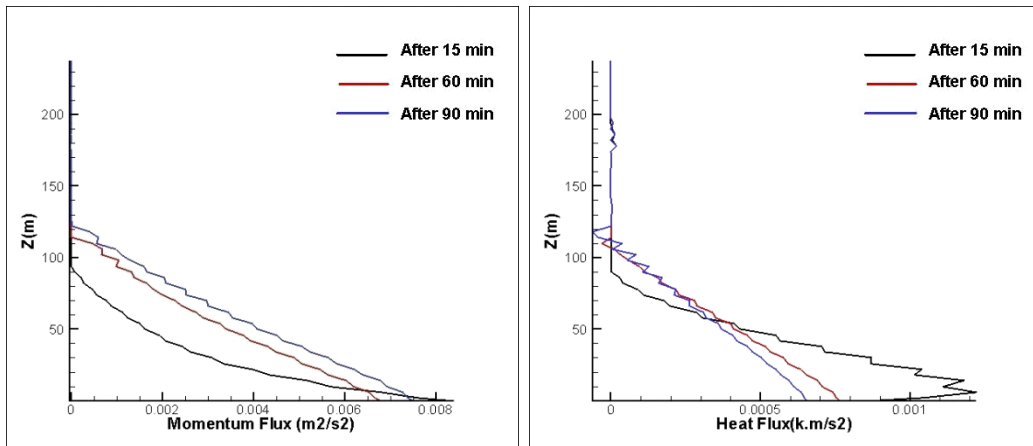
شکل ۱۰. نیمرخ پریشیدگی کاتوره‌ای سرعت داده ناکائیشی که به نیمرخ باد اولیه اضافه می‌شود.



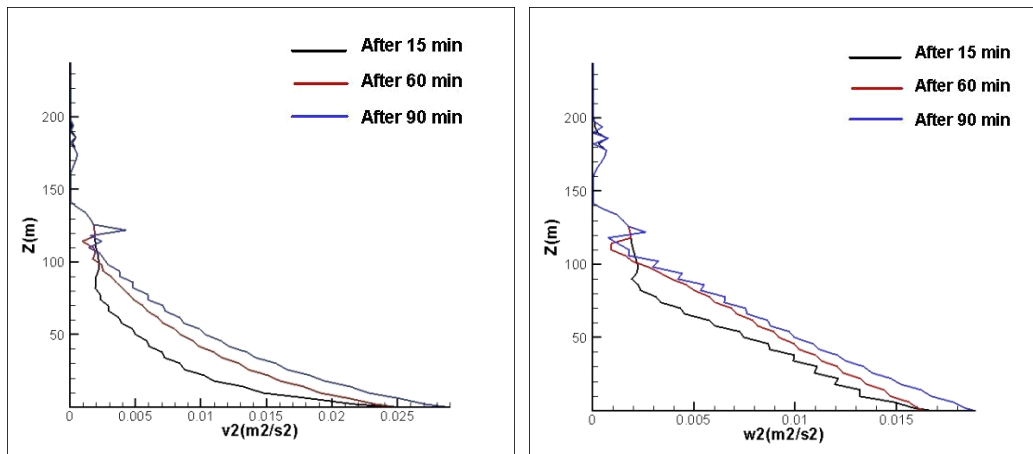
شکل ۱۱. نیمرخ باد شبیه‌سازی شده داده‌های ناکائیشی با مدل جدید برای ۹۰ دقیقه، مولفه U و مولفه V.



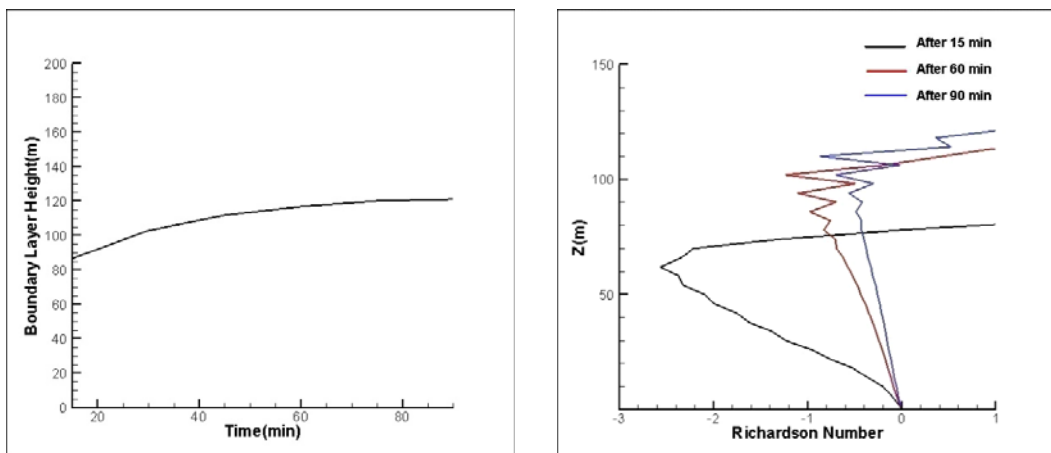
شکل ۱۲. نیمرخ دمای پتانسیل اولیه (چپ) داده های ناکائیشی و نیمرخ دمای پتانسیل شبیه‌سازی شده (راست).



شکل ۱۳. شار تکانه (چپ) و شار گرما (راست) داده‌های ناکائیشی محاسبه شده برای ۹۰ دقیقه.



شکل ۱۴. واریانس v^2 و واریانس w^2 داده‌های ناکائیشی محاسبه شده برای ۹۰ دقیقه با مدل جدید.



شکل ۱۶. ارتفاع لایه مرزی محاسبه شده داده‌های ناکائیشی با مدل جدید.

شکل ۱۵. عدد ریچاردسون داده‌های ناکائیشی.

با مدل‌های گوناگونی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آنها در دسترس قرار دارد، قابل مقایسه با مدل‌های دیگر است. این مدل عدد ریچاردسون بحرانی را با ثابت‌ها و روشی که آن را تعیین کرده است، تقریباً برابر یک به دست می‌دهد در صورتی که در اغلب مدل‌های پیشین این مقدار برابر ۰/۲۵ است.

منابع

- جلالی، ع.، ۱۳۸۸، شبیه‌سازی لایه مرزی اکمن براساس یک مدل بستر مرتبه دوم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Canuto, V. M., Cheng, Y., and Howard, A. 2001, New third-order moments for the convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **58**, 1169-1172.
- Cheng, Y., Canuto, V. M., and Howard, A. M., 2002, An improved model for the turbulent PBL. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1550-1565.
- Cuxart, J., 2006, Description of single-column arctic stable boundary layer case for GABLS. URL: turbulencia.uib.es/gabls/gabls1d_desc.pdf
- Kosovic, B., and Curry, J. A., 2000, A large eddy simulation of a quasi-steady, stably stratified atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1052-1068.
- Mellor, G. L., and Yamada, T., 1974, A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.
- Nakanishi, M., 2001, Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data, *Bound.-Layer Meteor.*, **99**, 349-378.

در نیم‌رخ پریشیدگی باد، شکل ۱۰، ناپایداری تا ارتفاع ۱۵۰ متر آشکار است. با گذشت زمان مقدار باد در زیر لایه وارونگی افزایش پیدا می‌کند ولی در بالای لایه وارونگی ثابت می‌ماند. دمای پتانسیل تا ارتفاع ۱۲۰ متری دارای نیم‌رخ خنثی است و در بالای آن به وارونگی می‌رسد. وارونگی موجود در دمای پتانسیل در فاصله بین ۱۲۲ تا ۱۶۲ متر باعث محدود شدن رشد PBL می‌شود و در طول زمان بدون تغییر باقی می‌ماند. شار تکانه در طول زمان شبیه‌سازی افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن افزایش سرعت باد در زیر لایه وارونگی است. در مقابل شار گرما در طول زمان شبیه‌سازی کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، یکی از ضعف‌های مدل‌های لایه مرزی، ناتوانی در شناسایی بین واریانس v'^2 و واریانس w'^2 است که آنها را هم‌مرتبه محاسبه می‌کنند. بررسی این مسئله در این مدل با توجه به شکل ۱۴ آشکار می‌شود. در این شکل اختلاف بین واریانس v'^2 و واریانس w'^2 به‌خوبی پیدا است و این موضوع نشانگر این مسئله است که مدل به‌خوبی توانایی شناسایی و تمایز بین این دو کمیت را دارد. تحول عدد ریچاردسون در طول زمان، بیانگر این موضوع است که شرایط از ناپایداری شدید به سمت پایداری حرکت می‌کند. ارتفاع لایه مرزی مطابق با مقادیر شارها و باد و دمای پتانسیل به‌خوبی برآورد شده است.

۷ نتیجه‌گیری

این مدل براساس بستر مرتبه دوم است و با پارامترسازی کامل همبستگی‌های فشار-سرعت و فشار-دما، قادر به تمایز و شناسایی مولفه‌های افقی و قائم انرژی جنبشی تلاطمی در لایه مرزی خنثی است. در همه داده‌ها با این روش، ارتفاع لایه مرزی با استفاده از این مدل به‌خوبی برآورد شده است که این موضوع به‌دلیل اینکه داده گلبز