

ارزیابی عملکرد یک طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای با استفاده از آزمایش GABLS1 در

نسخه تک‌ستونی مدل جهانی توسعه‌یافته بر مبنای تاوایی پتانسیلی

میلاذ بهروش^۱، علیرضا محب‌الحجه^۲، محمد میرزائی^{۳*} و دانیال یازجی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. پژوهشگر، گروه تحقیقات، مؤسسه هواشناسی و آب‌شناسی سوند، نورشوپینگ، سوند

(دریافت: ۹۹/۹/۱، پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۵)

چکیده

شبیه‌سازی درست ساختار لایه مرزی جو به‌ویژه در شرایط پایدار از موضوعات چالش‌انگیز در مدل‌های عملیاتی جوی است. آزمایش‌های مقایسه متقابل مدل‌ها همچنان اختلاف‌های شایان توجهی را در پیش‌بینی متغیرهای لایه مرزی جو در مدل‌های عملیاتی و تحقیقاتی نشان می‌دهند. در این مطالعه، یک طرح‌واره لایه مرزی مرتبه ۱/۵ برای ارزیابی عملکرد پیوند آن با هسته دینامیکی مدل جهانی دانشگاه تهران (UTGAM) با کاربست نسخه تک‌ستونی مدل یادشده و استفاده از آزمایش‌های استاندارد مقایسه متقابل GABLS1 بررسی شده است. همچنین، عملکرد مختصات قائم سیگما-تتا و سیگما-پی در دو حالت با تفکیک‌پذیری قائم مختلف ۱۴ و ۳۳ تراز تا زیر ارتفاع ۳ کیلومتر ارزیابی شد. در مجموع اختلافی جزئی بین مختصات سیگما-تتا و سیگما-پی در حالت‌های تفکیک پایین با هم و همچنین حالت‌های تفکیک بالا با هم مشاهده شد که این اختلاف در تفکیک‌پذیری پایین بیشتر نمایان است. در هر دو مجموعه از آزمایش‌ها، بهبود نتایج شبیه‌سازی‌ها با افزایش تفکیک‌پذیری هویدا است. علاوه بر اینها به‌نظر می‌رسد که نزدیک‌تر کردن موقعیت قرارگیری پایین‌ترین تراز صحیح از سطح در حالت با تفکیک‌پذیری بالا بر بهبود نتایج در این حالت مؤثر بوده است. مقایسه نیم‌رخ قائم باد با سایر مدل‌های عملیاتی شرکت‌کننده در آزمایش GABLS1 عملکرد بهتر طرح‌واره لایه مرزی استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد اما برای نیم‌رخ قائم دمای پتانسیلی در ارتفاعات پایین، آریبی محسوس منفی شبیه‌سازی شده است. برطبق نتایج، طرح‌واره لایه مرزی استفاده‌شده همچون سایر مدل‌های عملیاتی پیش‌بینی وضع هوا، برای شرایط پایدار پخش تکانه و گرما را بیش‌برآورد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، GABLS1، لایه مرزی پایدار، مختصات قائم، ضرایب پخش، UTGAM.

۱. مقدمه

شبیه‌سازی لایه مرزی پایدار از بخش‌های به‌طور خاص چالش‌انگیز در مدل‌های عددی محسوب می‌شود. بهبود پخش تلاطمی در شرایط پایدار می‌تواند موجب بهبود عملکرد پیش‌بینی مدل‌های جوی برای دمای نزدیک سطح و چرخندهای همدیدی شود (سندو و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین نمایش درست شارهای سطحی اثر شایان توجهی بر پیش‌بینی جوی میان‌مدت داشته و نقش مهمی را در انتخاب بستر مناسب و در نتیجه تعداد پارامترسازی‌ها ایفا می‌کند (بلجارس، ۱۹۹۲). پیوند پارامترسازی لایه مرزی با هسته دینامیکی مدل‌های گردش کلی جو فرایند ارزیابی خاصی را ایجاب می‌کند.

فرایندهای لایه مرزی با مقیاسی از چند متر تا بیشینه‌شان یعنی عمق لایه مرزی سیاره‌ای در تفکیک‌پذیری فعلی مدل‌های آب‌ایستای گردش کلی جو به‌خوبی نمایش داده نمی‌شوند (پیتان و همکاران، ۲۰۱۵). برای در نظر گرفتن حرکت‌های تلاطمی با مقیاس چند متر تا عمق لایه مرزی سیاره‌ای، پارامترسازی آنها ضروری است. امری شناخته شده است که نمایش درست ساختارهای تفکیک‌نشده می‌تواند اثر شگرفی بر بهبود پیش‌بینی‌های جوی داشته باشد (کوهن و همکاران، ۲۰۱۵). برای مواجهه با چالش ساختارهای تفکیک‌نشده، طرح‌واره‌ها و روش‌های پارامترسازی مختلفی توسعه یافته‌اند. در این میان،

هدف آزمایش‌های GABLS بهبود شبیه‌سازی فرایندهای لایه مرزی در مدل‌های منطقه‌ای و بزرگ‌مقیاس جوی است (کوکسارت و همکاران، ۲۰۰۶؛ هلت‌اسلگ و همکاران، ۲۰۱۳). مورد انتخابی در اینجا همانند کوکسارت و همکاران (۲۰۰۶) بر مبنای آزمایش ارائه شده توسط گُویچ و کوری (۲۰۰۰) است. دلیل این انتخاب همراهی مشاهدات آزمایش پوشنی شمالگان دریای بوفورت، (BASE) (Beaufort Sea Arctic Stratus Experiment) با یک لایه مرزی نسبتاً پایدار است که برای شرایط اولیه این آزمایش مناسب است (بیر و همکاران، ۲۰۰۶). GABLS1 اولین سری آزمایش‌ها برای بررسی لایه مرزی پایدار در مدل‌هایی با پیچیدگی‌های مختلف بود (هلت‌اسلگ، ۲۰۰۳). کوکسارت و همکاران (۲۰۰۶) در طراحی این آزمایش از مجموعه‌ای از طرح‌واره‌های تلاطمی عملیاتی و تحقیقاتی استفاده کردند و یازده مدل شبیه‌سازی پیچک بزرگ‌مقیاس (LES) که قابلیت شبیه‌سازی با تفکیک‌پذیری‌های مختلف داشتند را به‌عنوان راهنمای مرجع به‌کار بردند (بیر و همکاران، ۲۰۰۶). مدل‌های ECMWF، ECMWF-MO، NOAA، MetOffice، JMA، Meteo France، NCEP و KNMI-RACMO هشت مدل عملیاتی استفاده شده در این آزمایش هستند که در زمان انجام این آزمایش تنها در دو مدل آخر از طرح‌واره مرتبه ۱/۵ استفاده شده بود و سایر مدل‌ها از طرح‌واره مرتبه یکم استفاده می‌کردند. پس از انجام آزمایش GABLS1 برخی از مدل‌ها در مراکز مختلف مانند مدل عملیاتی ARPEGE و مدل منطقه محدود ALADIN-MF طرح‌واره‌های لایه مرزی خود را از مرتبه یکم به مرتبه ۱/۵ تغییر دادند (بازیل و همکاران، ۲۰۱۱).

در ادامه و در بخش دوم مقاله، طرح‌واره لایه مرزی پیوند یافته با نسخه تک‌ستونی UTGAM توصیف شده است. در بخش سوم، تنظیمات فیزیکی آزمایش GABLS1 مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها آورده شده است. در بخش چهارم بحث و نتایج این پژوهش همراه با

نسخه تک‌ستونی مدل‌ها راه حلی ارزان و اغلب در دسترس برای ارزیابی فرایندهای فیزیکی مانند لایه مرزی در مدل‌های گردش کلی جو است که در واقع فرایندهای رخ داده در یک ستون قائم را برای یک تک‌نقطه شبکه ارزیابی می‌کند. باید توجه داشت که نسخه‌های تک‌ستونی برای پیش‌بینی شرایط جوی کاربردی ندارند بلکه تنها از آنها برای آزمایش و توسعه مدل‌های جهانی استفاده می‌شود. فرایندهای فیزیکی زیر شبکه‌ای با توجه به تفکیک‌پذیری پایین بیشتر مدل‌های جهانی، فقط مؤلفه راستای قائم آنها در پارامترسازی‌های فیزیکی در طرح‌واره‌ها وارد شده و از مؤلفه افقی آنها چشم‌پوشی می‌شود. در مقاله حاضر از نسخه تک‌ستونی مدل جهانی توسعه یافته بر مبنای تکمیل هسته دینامیکی ارائه شده توسط محب‌الحجه و همکاران (۲۰۱۶) استفاده شده است. برای ارجاع، از این پس مدل جهانی دانشگاه تهران UTGAM نامیده می‌شود.

همواره آزمایش و ارزیابی مدل‌های گردش کلی جو برای توسعه و بهبود آنها حائز اهمیت بوده است (رید و یابلونوسکی، ۲۰۱۲). بنابراین آزمایش‌های گوناگونی برای هسته دینامیکی و فرایندهای فیزیکی مدل‌ها جداگانه طراحی و توسعه یافته‌اند. در سال ۲۰۰۱ گروه (Global Energy and Water Cycle) GEWEX (Experiment) مجموعه آزمایش‌های GABLS (GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study) (کوکسارت و همکاران، ۲۰۰۶؛ اسونسون و همکاران، ۲۰۱۱؛ بُسولِد و همکاران، ۲۰۱۴ و هلت‌اسلگ و همکاران، ۲۰۱۳) را که امکان مقایسه متقابل مدل‌ها را در شبیه‌سازی فرایندهای لایه مرزی سیاره‌ای در شرایط پایدار فراهم می‌آورد، ارائه داد. تاکنون چهار آزمایش مقایسه متقابل GABLS توسعه داده شده است که مقاله حاضر اثر پارامترسازی لایه مرزی را در نسخه تک‌ستونی مدل گردش کلی جو توسعه یافته بر مبنای تاوایی پتانسیلی با استفاده از آزمایش GABLS1 (کوکسارت و همکاران، ۲۰۰۶) بررسی می‌کند.

جملات تنش رینولدز در معادلات تکانه پس از میانگین‌گیری رینولدز اشاره کرد که تراورد قائم تکانه افقی را ناشی از حرکت تلاطمی تفکیک‌نشده نشان می‌دهند و برای حل آنها روش‌های بستر تلاطمی مختلفی توسعه یافته‌اند. در اینجا و در طرح‌واره لایه مرزی شارها به ترتیب در داخل جو، سطح و بام جو به‌شيوه زیر محاسبه می‌شوند (جیورجتا و همکاران، ۲۰۱۳):

$$\overline{w'\chi'} = -K_X \frac{\partial X}{\partial z} \quad (۳)$$

$$\overline{w'\chi'_{sfc}} = -C_X |\overline{V}| (X_{nlev} - X_{sfc}) \quad (۴)$$

$$\overline{w'\chi'_{TOA}} = 0 \quad (۵)$$

که در رابطه ۳، K_X ضریب پخش و در رابطه ۴، C_X ضریب تبادل کپه‌ای، $|\overline{V}|$ قدرمطلق اختلاف بردار باد در سطح و پایین‌ترین تراز مدل، زیرنویس nlev نزدیک‌ترین تراز به سطح و sfc نشان‌دهنده سطح است. همچنین در رابطه ۵، زیرنویس TOA بام جو را نشان می‌دهد. در داخل جو ضرایب پخش از رابطه ۶ محاسبه می‌شوند (جیورجتا و همکاران، ۲۰۱۳):

$$K_X = l_{m,h} f_X \sqrt{E} \quad (۶)$$

که f_X تابع پایداری است و برای محاسبه ثابت‌های آن از روابط ملر و یامادا (۱۹۸۲) استفاده می‌شود. همچنین، $l_{m,h}$ طول آمیختگی تلاطمی است که از رابطه بلک‌ادر (۱۹۶۲) به‌صورت زیر برای محاسبه آن استفاده شده است:

$$\frac{1}{l_{m,h}} = \frac{1}{kz} + \frac{1}{\lambda_{m,h}} \quad (۷)$$

که $k=0.4$ ثابت وُن کارمن، z ارتفاع ژئوپتانسیلی بالای سطح و $\lambda_{m,h}$ طول آمیختگی مجانبی است. این طرح‌واره از نظر طول آمیختگی تمایزی بین تکانه و سایر نرده‌ای‌ها قائل نیست. همچنین برای طول آمیختگی مجانبی برای تکانه و گرما هم مقدار ثابت ۱۵۰ متر در لایه مرزی (همانند مدل‌های ECMWF و ECHAM6) انتخاب شده است و بالاتر از لایه مرزی، $\lambda_{m,h}$ آهنگی کاهشی را

شبه‌سازی‌های انجام‌شده ارائه شده و درنهایت، نتایج برجسته آزمایش به‌کاررفته در اینجا به‌طور خلاصه در بخش آخر بیان شده است.

۲. توصیف طرح‌واره لایه مرزی

طرح‌واره لایه مرزی استفاده‌شده در این مقاله یک طرح‌واره TKE مرتبه ۱/۵ بر مبنای برینکاپ و روئکنر (۱۹۹۵) با کمی تغییرات برای استفاده در مدل جهانی مانند جفت‌شدگی ضمنی بین فرایندهای سطح و جو است که پیش‌تر در مدل ECHAM استفاده شده (جیورجتا و همکاران، ۲۰۱۳) و اکنون به‌عنوان طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای به هسته دینامیکی مدل گردش کلی جو دانشگاه تهران پیوند داده شده است. در این مرحله از شبه‌سازی‌ها اثر ردیاب‌ها و به‌ویژه دی‌اکسیدکربن در طرح‌واره لایه مرزی لحاظ نشده است. طرح‌واره‌های TKE در نمای کلی در سه مورد ثابت‌های استفاده‌شده، پارامترسازی مورد استفاده آنها برای تعیین طول‌ها و توابع پایداری از یکدیگر متمایز می‌شوند. بیشتر طرح‌واره‌ها از روش میانگین‌گیری رینولدز استفاده می‌کنند که در آن شارش کل (χ) به دو بخش شارش میانگین تفکیک‌شده (X) و بخش افت‌وخیزهای تلاطمی (χ') تقسیم می‌شود (رابطه ۱). با کاربست این روش و استفاده از تقریب‌های آب‌ایستا و بوسینسک و انجام ساده‌سازی‌های لازم، گرایش متغیر پیش‌یابی X فقط به‌دلیل حرکت تلاطمی (بدون در نظر گرفتن سایر جملات) را می‌توان به‌شيوه رابطه ۲ نوشت (جیورجتا و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\chi = X + \chi' \quad (۱)$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_{\text{turb}} = - \frac{\partial \overline{w'\chi'}}{\partial z} \quad (۲)$$

مشاهده می‌شود که استفاده از روش میانگین‌گیری رینولدز منجر به پیدایش جملاتی مانند $\overline{w'\chi'}$ می‌شود که برای دانستن آنها کاربست روش‌های پارامترسازی مختلفی در سطح و در داخل جو نیاز است. برای نمونه می‌توان به

مرزی خنثی و چینه‌بندی شده پایدار (SBL) و لایه مرزی همرفتی (CBL) را دارد. دلیل این کار آن است که طرح‌واره در هر دو شرایط پایدار و ناپایدار بهترین تخمین ممکن را از ارتفاع لایه مرزی ارائه دهد. برای محاسبه ارتفاع لایه مرزی چینه‌بندی شده پایدار از رابطه زیر استفاده می‌شود (استیونس و همکاران، ۲۰۱۳):

$$h_{SBL} = \frac{C_n u_*}{\max(f, 5 \times 10^{-5})} \quad (9)$$

که h_{SBL} ارتفاع لایه مرزی چینه‌بندی شده پایدار، u_* سرعت اصطکاکی سطحی یا جذر شار تکانه سطحی، f پارامتر کوریولیس و C_n یک ضریب بی‌بعد با مقدارهای بین ۰/۱ تا ۰/۵ است که مقادیر بزرگ‌تر مربوط به شرایط خنثی هستند (ویکرز و مارت، ۲۰۰۴). البته مقدارهای دیگری هم در شبیه‌سازی‌های مختلف علاوه بر بازه ذکر شده، برای این ضریب استفاده شده که می‌توان به مقدار ۰/۰۶ مارت (۱۹۸۲) اشاره کرد که مقدار اریبی ۲۴/۴- متر به همراه خطای میانگین مربعی ۱۸ متر و همبستگی ۰/۴۸ را نسبت به مشاهدات در شبیه‌سازی آنها نشان داد (زیلیتینکوویچ و باکلانوف، ۲۰۰۲). مقدار این ضریب بی‌بعد در مدل ECHAM3، ۰/۵، مدل ECHAM6، ۰/۳ و برای انجام آزمایشات در این نسخه تک‌ستونی مدل دانشگاه تهران ۰/۱ در نظر گرفته شده است. استفاده از ثابت بسیار کوچک 5×10^{-5} در مخرج کسر به دلیل جلوگیری از صفر شدن آن در استوا است. در آزمایش GABLS1 برای همسان بودن نحوه محاسبه ارتفاع لایه مرزی در مدل‌های مختلف از شرطی ویژه استفاده شده که در بخش بعد در مورد آن توضیح داده شده است. همچنین در مقاله حاضر با توجه به تمرکز کار بر روی شبیه‌سازی لایه مرزی پایدار، شیوه محاسبه لایه مرزی همرفتی در این طرح‌واره آورده نشده است. همچنین، با توجه به هدف آزمایش‌های مقایسه متقابل GABLS که شبیه‌سازی لایه مرزی پایدار را بر روی ساده‌ترین سطوح ممکن دنبال می‌کند به اثر سطح و شبیه‌سازی شارهای آن پرداخته نشده است.

به‌شیوه‌نمایی دارد تا به کمینه مقدارش یعنی یک متر در پوشش سپهر زیرین می‌رسد. در رابطه ۶، E انرژی جنبشی تلاطمی است. این طرح‌واره از یک معادله پیش‌یابی ساده شده برای محاسبه انرژی جنبشی تلاطمی به صورت زیر استفاده می‌کند (جیورجتا و همکاران، ۲۰۱۳):

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \left(-\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{g}{\Theta_v} \overline{w'\theta'_v} - \frac{\partial \overline{w'e}}{\partial z} - \varepsilon \quad (8)$$

که U و V مؤلفه‌های میانگین باد، g شتاب گرانی، Θ_v و θ'_v دمای پتانسیلی مجازی و پریشیدگی آن، e انرژی جنبشی کل، $\overline{u'w'}$ و $\overline{v'w'}$ شارهای تکانه، $\overline{w'\theta'_v}$ شار گرما، جمله شامل $\overline{w'e}$ انتقال تلاطمی و ε اتلاف است. رابطه ۸ شامل جملات چشمه، چاه و انتقال است. دو جمله اول سمت راست جملات تولید چینی یا تولید مکانیکی تلاطم با چینی باد هستند و انرژی شارش میانگین را به تلاطم تبدیل می‌کنند. جمله سوم جمله شناوری و یا تولید تلاطم با شناوری و تبدیل انرژی پتانسیلی جو به تلاطم و یا برعکس است. جمله چهارم انتقال قائم انرژی تلاطمی را با اُفت‌وخیزهای تلاطمی نشان می‌دهد. جمله آخر اتلاف است که انرژی جنبشی تلاطمی را با اصطکاک مولکولی در مقیاس‌های بسیار کوچک به گرما تبدیل می‌کند.

فرمول‌بندی محاسبه ارتفاع لایه مرزی چینه‌بندی شده پایدار به دو گروه شکل‌های عدد ریچاردسون که چینه‌بندی کپ‌های و چینی باد در آن نقش دارند و گروه فرمول‌بندی بر پایه شار سطحی که نیاز به تخمین شارهای تکانه و گرما در سطح دارند، تقسیم می‌شود (ویکرز و مارت، ۲۰۰۴). روش‌های بر مبنای محاسبه عدد ریچاردسون فقط برای برآوردی تقریبی از ارتفاع لایه مرزی پایدار توصیه می‌شوند (زیلیتینکوویچ و باکلانوف، ۲۰۰۲). در اینجا از یکی از شکل‌های رابطه بر پایه شار سطح ارائه شده توسط راسبی و مونتگومری (۱۹۳۵) برای محاسبه ارتفاع لایه مرزی استفاده می‌شود. طرح‌واره لایه مرزی به کاررفته در اینجا توانایی محاسبه ارتفاع لایه

۳. تنظیمات فیزیکی آزمایش

رطوبت در نظر گرفته نشده و با مقدار صفر آغازگری می‌شود. دمای پتانسیلی تا ارتفاع ۱۰۰ متری ۲۶۵ کلوین است و پس از آن با آهنگ ۰/۰۱ کلوین بر متر افزایش می‌یابد. دمای سطح نیز در ابتدا ۲۶۵ کلوین است و سپس با آهنگ ثابت ۰/۲۵ کلوین بر ساعت در تمام طول مدت آزمایش کاهش می‌یابد. برای ساخت نیم‌رخ قائم ابتدایی برای انرژی جنبشی تلاطمی از رابطه $0.4(1-z/250)^3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ برای $0 \leq z \leq 250 \text{ m}$ و مقدار صفر برای ارتفاع بالاتر از این بازه استفاده شده است. تندی باد در سطح به مقدار صفر تنظیم شده و طول زبری آئرودینامیکی برای تکانه و گرما به ۰/۱ متر تنظیم شده است. سایر ثابت‌های این آزمایش یعنی فشار سطح ۱۰۱۳/۲ هکتوپاسکال و شتاب گرانی ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه هستند.

از آنجایی که مدل‌های عملیاتی و تحقیقاتی از روش‌های مختلفی برای محاسبه ارتفاع لایه مرزی استفاده می‌کنند برای ایجاد امکان مقایسه متقابل نتایج مدل‌ها در آزمایش GABLS1، ارتفاع لایه مرزی پایدار به شیوه ارتفاعی که در آن شار تکانه به ۵ درصد مقدار سطحی‌اش تقسیم بر ۰/۹۵ می‌رسد، تعریف می‌شود. از همین تعریف برای محاسبه ارتفاع لایه مرزی پایدار در شبیه‌سازی‌های LES استفاده شده است (بیر و همکاران، ۲۰۰۶). گام زمانی استفاده‌شده برای خروجی‌ها یک دقیقه خواهد بود. در اینجا برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی لایه مرزی از نتایج LES با تفکیک‌پذیری ۳۰۱۲۵ (بیر و همکاران، ۲۰۰۶) برای حالت مرجع استفاده شده است. در این تفکیک‌پذیری ۸ مدل LES مشارکت داشته‌اند.

در پژوهش حاضر به منظور آشنایی با رفتار پارامترسازی لایه مرزی در مختصه‌های مورد استفاده در مدل جهانی، آزمایش GABLS1 با دو مختصه قائم سیگما-پی (اکرمن، ۲۰۰۸) و سیگما-تا (کونور و آراکوا، ۱۹۹۷)، هر دو در شبکه چارنی-فیلیس، پیاده‌سازی و اجرا شده است. در مختصه سیگما-پی، فشار در هر تراز کسری مشخص شده

در آزمایش GABLS1 یک مورد آرمانی با واداشتی ساده برای ارزیابی طرح‌واره‌های لایه مرزی با کاربردهای تحقیقاتی و عملیاتی و همچنین مدل‌های "شبیه‌سازی پیچک بزرگ" موسوم به LES استفاده می‌شود (هلت‌اسلگ و همکاران، ۲۰۱۲). برای آماده‌سازی لایه مرزی نسبتاً پایدار در آزمایش GABLS1 از مشاهدات انجام‌شده در آزمایش کسوویچ و کوری (۲۰۰۰) استفاده شده است. آنها از مجموعه داده‌های مشاهداتی آزمایش پوشنی شمالگان دریای بوفورت برای ساخت شرایط اولیه و مرزی استفاده کردند. در این آزمایش واداشت لایه مرزی با باد زمینگرد فشارورد تحمیل شده به همراه سرمایش سطحی از پیش تعیین‌شده انجام می‌شود (کوکسارت و همکاران، ۲۰۰۶). مقدار باد زمینگرد به $u_g = 8 \text{ ms}^{-1}$ و $v_g = 0 \text{ ms}^{-1}$ و مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری هم به $u = u_g$ و $v = v_g$ تنظیم می‌شوند. عرض جغرافیایی 33°N و پارامتر کوریولیس $f = 1.39 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ منطبق بر محل آزمایش ارائه شده توسط کسوویچ و کوری (۲۰۰۰) است. با توجه به اینکه تعداد متغیرهای تأثیرگذار در این آزمایش خیلی زیاد هستند و مدل‌های مختلف از ثابت‌ها، توابع پایداری و روش‌های مختلف محاسباتی چه در خود طرح‌واره‌های لایه مرزی و چه در سایر بخش‌هایشان استفاده می‌کنند و همچنین در گام‌های زمانی و مکانی مختلفی اجرا می‌شوند، برای کمینه کردن چشمه‌های اختلاف در تمامی مدل‌ها و طرح‌واره‌های استفاده‌شده در این آزمایش سعی شده است تا جایی که امکان دارد تنظیمات به‌طور کامل وارد شود. هرچند انجام تمامی تنظیمات به‌ویژه در مدل‌های اقلیمی و گردش کلی جو امکان‌پذیر نیست. اما اعمال شرط‌های اصلی فیزیکی یعنی باد زمینگرد و سرمایش یکنواخت سطح ضروری هستند. در این آزمایش طرح‌واره تابش خاموش می‌شود تا چشمه‌های ایجاد اختلاف در شبیه‌سازی‌ها کاهش یابد. مدت‌زمان این آزمایش نه ساعت (۵۴۰ دقیقه) است.

با نماد η بر مبنای فشار سطح زمین p_s و فشار مرجع p_{ref} با رابطه $p(\eta) = a(\eta)p_{ref} + b(\eta)p_s$ تعیین می‌شود. در اینجا برای فشار مرجع از مقدار 101320 پاسکال استفاده شده است. در آزمایش تک‌ستونی، در طی زمان فشار سطح زمین ثابت و در نتیجه فشار بر روی هر تراز کسری ثابت است؛ بدین ترتیب تنها دمای پتانسیلی که در شبکه چارنی-فیلیس بر روی ترازهای کسری قرار می‌گیرد در اثر آهنگ تغییر دمای ناشی از پارامترسازی تغییر می‌کند. در مختصه سیگما-تتا، مختصه قائم ξ با رابطه $\xi = F(\sigma, \theta)$ تابعی از مختصه سیگما $\sigma = (p - p_{top}) / (p_s - p_{top})$ و مختصه هم‌دمای پتانسیلی θ است (برای جزئیات شکل تابعی F رجوع شود به محب‌الحجه و همکاران، ۲۰۱۶). برای فشار بام مدل p_{top} از مقدار 100 پاسکال استفاده شده است. در مختصه قائم سیگما-تتا، گرایش زمانی دما بر روی ترازهای صحیح حاصل از پارامترسازی لایه مرزی شار قائم جرم و از طریق آن به‌طور غیرمستقیم دمای پتانسیلی را بر روی ترازهای کسری تغییر می‌دهد.

۴. بحث و نتایج

برای انجام شبیه‌سازی‌های تک‌ستونی و دست‌یابی به فهمی بهتر از تأثیر تفکیک‌پذیری قائم بر نتایج و همچنین اثرگذاری فاصله نزدیک‌ترین تراز صحیح مدل از سطح، دو مجموعه شبیه‌سازی با تعداد لایه‌ها یا ترازهای صحیح متفاوت در وردسپهر زیرین تا 3 کیلومتر از سطح زمین، یکی با 14 تراز صحیح و دیگری 33 تراز صحیح، در مختصات سیگما-پی و سیگما-تتا با استفاده از تنظیمات آزمایش مقایسه متقابل GABLS1 انجام شده است. در حالت 14 ترازه، نزدیک‌ترین تراز صحیح به سطح در ارتفاع تقریبی 28 متر و اولین تراز کسری

بالای سطح، در ارتفاع تقریبی 57 متر قرار می‌گیرد. در حالت 33 ترازه، نزدیک‌ترین تراز صحیح به سطح در ارتفاع تقریبی 9 متر و اولین تراز کسری بالای سطح، در ارتفاع تقریبی 18 متر قرار گرفته است. در ساختارهای 14 و 33 ترازه به ترتیب 5 و 12 تراز صحیح در زیر 400 متر قرار داده شده است که به معنای میانگین تفکیک قائم برابر با به ترتیب 80 و 33 متر است. برای مقایسه، تعداد 12 تراز صحیح در 400 متر اول دو برابر ترازهای مدل MetOffice، 5 تراز بیشتر از مدل ECMWF و ECMWF-MO و همچنین 4 تراز بیشتر از مدل NOAA-GABLS1 است (کوکسارت و همکاران، ۲۰۰۶). برای سادگی ارجاع از این پس به تفکیک قائم با 14 (۳۳) تراز در 3 کیلومتر اول به نام تفکیک پایین (بالا) اشاره می‌شود. شایان گفتن است که مکان اولین تراز صحیح بالای سطح از اهمیت قابل توجهی در مدل‌های عددی برخوردار است. شین و همکاران (۲۰۱۲) حساسیت پارامترهای سطحی را به ارتفاع اولین تراز صحیح بالای سطح در هنگام روز و شب به‌طور جداگانه در سه طرح‌واره مختلف در مدل WRF بررسی کردند. آنها نشان دادند که متغیرهای سطحی به انتخاب نزدیک‌ترین تراز صحیح مدل، هنگامی که آن تراز در زیر ارتفاع 12 متری قرار دارد در روز هنگام حساس هستند. همچنین شب‌هنگام حساسیت متغیرهای سطحی را با تغییر ارتفاع نزدیک‌ترین تراز صحیح نسبت به سطح در زیر ارتفاع 40 متر مشاهده کردند. در اینجا هم برای بررسی بهتر همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد دو ساختار مختلف با ترازهای صحیح نزدیک سطح مختلف آزمایش شده‌اند. جدول ۱ خلاصه کوتاهی از مشخصه‌های گفته‌شده را که برای درک بهتر شکل‌هایی که در ادامه آورده شده ضروری است، نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات مختصه قائم به‌همراه تعداد ترازها در ۳ کیلومتر زیرین.

آزمایش	مختصه قائم	تعداد تراز*	گام زمانی	ارتفاع تراز**
sp-1	سیگما-پی	۱۴	۶۰ ثانیه	۲۸ متر
st-1	سیگما-تتا	۱۴	۶۰ ثانیه	۲۸ متر
sp-h	سیگما-پی	۳۳	۶۰ ثانیه	۹ متر
st-h	سیگما-تتا	۳۳	۶۰ ثانیه	۹ متر

* منظور تعداد تراز صحیح تا ارتفاع ۳ کیلومتر است.

** منظور ارتفاع تقریبی نزدیک‌ترین تراز صحیح از سطح است.

نشان می‌دهد ولی به‌نظر می‌رسد که در هر دو تفکیک قائم پایین و بالا، مختصه سیگما-تتا چند گام زمانی زودتر به ارتفاع نهایی لایه مرزی در مقایسه با مختصه سیگما-پی رسیده است. هرچند همان‌طور که اشاره شد در نهایت این‌بار مختصه سیگما-پی به‌طور خیلی جزئی بهتر عمل کرده است؛ اگرچه این اختلاف در تفکیک پایین ۶ متر و در تفکیک بالا فقط ۵ متر بوده است. ارتفاع بیشتر لایه مرزی چه در حالت پیش‌فرض مدل و چه با استفاده از شرط GABLS1 نسبت به نتایج LES با توجه به آنکه طرح‌واره استفاده‌شده در اینجا در یک مدل عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد کاملاً قابل پیش‌بینی بوده است و به‌نظر می‌رسد که این طرح‌واره آمیختگی را در لایه عمیق‌تری در لایه مرزی جو شبیه‌سازی می‌کند.

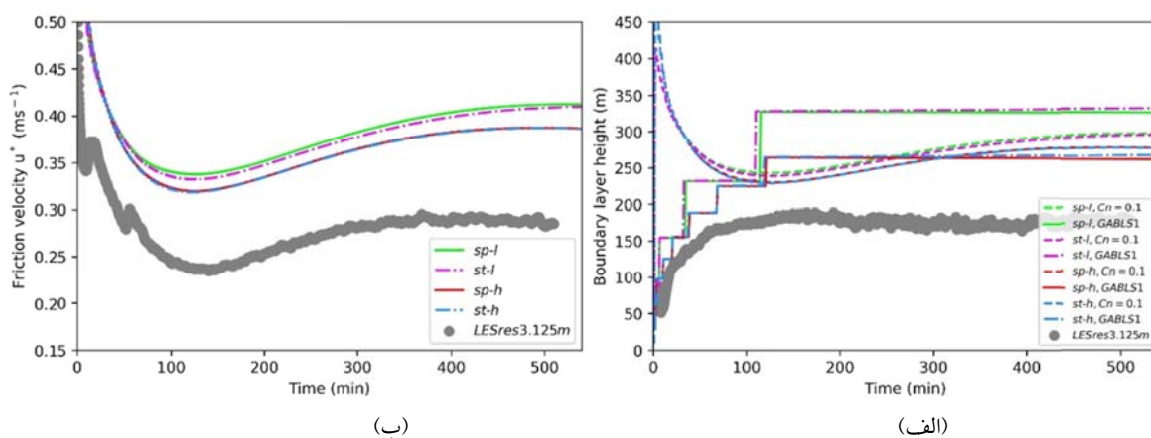
شکل ۱-ب، سرعت اصطکاکی سطحی را در چهار آزمایش مختلف، در مقایسه با شبیه‌سازی‌های LES در تنظیمات GABLS1 نشان می‌دهد. در اینجا مشاهده می‌شود که در تفکیک پایین مختصه سیگما-تتا عملکرد جزئی‌بتری را در طول مدت شبیه‌سازی نسبت به مختصه سیگما-پی نشان داده است، هرچند که اختلاف مشاهده‌شده در انتهای شبیه‌سازی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است و در تفکیک بالا چنین اختلافی هویدا نیست. جدول ۲ مقادیر تقریبی نهایی را در هنگام پایان شبیه‌سازی (ساعت نهم) با استفاده از تنظیمات آزمایش GABLS1 برای ارتفاع لایه مرزی پایدار و سرعت اصطکاکی نشان می‌دهد. مورد قابل‌توجه دیگر در سری‌های زمانی ارتفاع و سرعت اصطکاکی این است که در نتایج LES پس از گذشت ۵ ساعت حالت تعادلی

شکل ۱-الف، ارتفاع لایه مرزی شبیه‌سازی‌شده را در آزمایش GABLS1 در مقایسه با نتایج LES نشان می‌دهد. در این شکل ناحیه سایه‌دار خاکستری معرف شبیه‌سازی‌های LES است. نتایج LES بازه ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر را در پایان شبیه‌سازی برای ارتفاع لایه مرزی نشان می‌دهند. خط‌چین‌های رنگی مطابق راهنمای شکل ۱-الف، ارتفاع لایه مرزی را در فرمول‌بندی پیش‌فرض طرح‌واره لایه مرزی مطابق رابطه ۹ نشان می‌دهند اما برخلاف مدل عملیاتی در اینجا از ضریب $C_n = 0.1$ به جای مقدار پیش‌فرض $C_n = 0.3$ برای نزدیک‌تر کردن مقادیر به نتایج LES استفاده شده است. ملاحظه می‌شود که هم در حالت پیش‌فرض مدل و هم با استفاده از شرط GABLS1 برای محاسبه ارتفاع لایه مرزی (خط‌های پُر و خط‌نقطه‌چین‌های رنگی)، این ارتفاع در پایان مدت زمان شبیه‌سازی بالاتر از بازه LES قرار گرفته است. همچنین، افزایش تعداد لایه‌ها در نزدیک سطح، موجب بهبود عملکرد مدل در محاسبه ارتفاع لایه مرزی هم در حالت پیش‌فرض و هم با استفاده از شرط GABLS1 شده است. تغییر در نوع مختصه قائم اختلاف زیادی را در محاسبه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای نشان نداده است اما به‌نظر می‌رسد مختصه سیگما-تتا در حالت پیش‌فرض مدل (خط‌چین‌ها) در تفکیک پایین به مقدار بسیار کمی عملکرد بهتری داشته است؛ هرچند این مورد در تفکیک بالا چندان محسوس نیست. همچنین در حالتی که از شرط GABLS1 برای محاسبه ارتفاع لایه مرزی استفاده شده، برخلاف حالت پیش‌فرض در هر دو تفکیک قائم مختصه سیگما-پی (خط‌های توپُر رنگی) عملکرد جزئی‌بتری را

بالتر در بازه ۲۰۰ تا ۲۶۰ متر و با بیشینه در حدود ۲۳۰ متر را نشان می‌دهد که همه مقادیر گفته شده با ارتفاع لایه مرزی شبیه‌سازی شده همخوانی خوبی دارند. هر دو مختصه سیگما-تتا و سیگما-پی ساختارهایی بسیار نزدیک به هم را برای نیم‌رُخ قائم باد شبیه‌سازی کرده‌اند. در مورد نیم‌رُخ قائم دمای پتانسیلی طرح‌واره لایه مرزی هم در بخش پایین و هم در بخش بالا نسبت به نتایج LES دارای اُریبی محسوس منفی است. در عین حال، تفکیک بالا به‌ویژه با مختصه سیگما-پی در این حالت عملکرد بهتری را از خود نشان داده است. تقریباً وجود وارونگی بالای ارتفاع لایه مرزی پایدار در مختصه سیگما-پی کمی بهتر نسبت به مختصه سیگما-تتا در مقایسه با نتایج LES قابل مشاهده است. وارونگی شدید مشاهده شده در مختصه سیگما-تتا و به‌ویژه در تفکیک پایین می‌تواند ناشی از نامناسب بودن مقدار ضریب پخش گرما در ارتفاعات پایین باشد.

مشاهده می‌شود که این حالت برای ارتفاع لایه مرزی محاسبه شده با شرط‌های آزمایش در هردو تفکیک پایین و بالا به‌نظر زودتر رُخ داده و نوسانات ایجاد شده در ادامه بسیار جزئی بوده است. همچنین، همان‌طوری که اشاره شد مقادیر زیادتر مشاهده شده برای ارتفاع و سرعت اصطکاکی در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب به‌خوبی نشان‌دهنده آن است که مدل‌های عملیاتی ضرایب تبادل بزرگ‌تری را برای انتقال از لایه سطحی به جو آزاد دارا هستند و به‌نظر می‌رسد این طرح‌واره نیز از این قاعده مستثنی نیست.

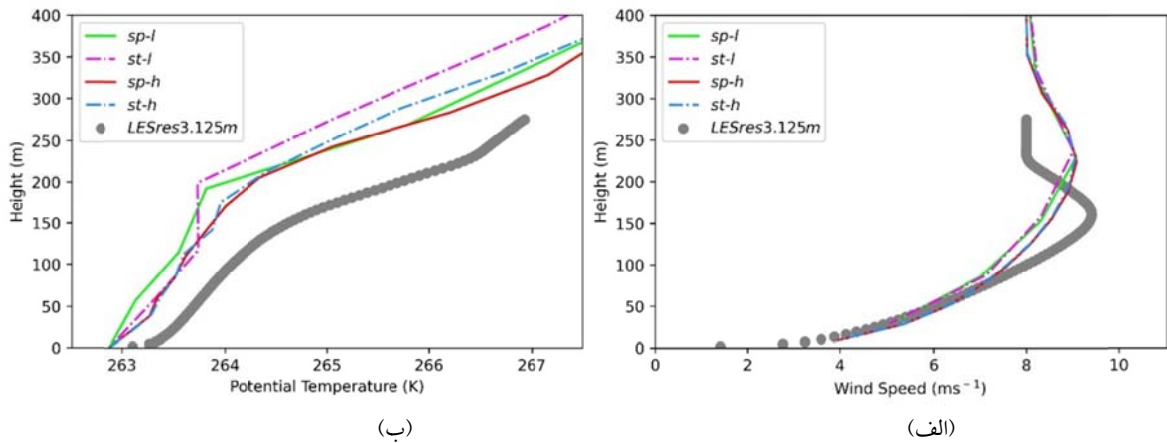
شکل‌های ۲-الف و ۲-ب نیم‌رُخ‌های قائم باد و دمای پتانسیلی را برای میانگین ساعت نهم شبیه‌سازی در مقایسه با شبیه‌سازی‌های LES در همین زمان نشان می‌دهد. مشخص است که مقدار بیشینه باد در نتایج LES بین ارتفاع ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر قرار گرفته در حالی که نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با طرح‌واره لایه مرزی ارتفاعی



شکل ۱. سری زمانی شبیه‌سازی‌های GABLS1 برای (الف) ارتفاع لایه مرزی و (ب) سرعت اصطکاکی سطحی. نمودار ضخیم سایه‌دار خاکستری معرف نتایج LES در آزمایش GABLS1 با تفکیک‌پذیری ۳/۱۲۵ متر است. نتایج مربوط به مختصه قائم سیگما-پی در تفکیک‌های پایین و بالا با خط پُر به ترتیب سبز و قرمز، و نتایج متناظر برای مختصه سیگما-تتا در تفکیک‌های پایین و بالا با خط‌نقطه‌چین به ترتیب بنفش و آبی نشان داده شده است. همچنین، خط‌چین‌ها در قسمت الف با همان ترتیب رنگی گفته شده برای خطوط پُر و خط‌نقطه‌چین‌ها، نشان‌دهنده نتایج با مقادیر پیش‌فرض طرح‌واره لایه مرزی و بدون استفاده از شرط آزمایش GABLS1 برای محاسبه ارتفاع هستند.

جدول ۲. مقادیر تقریبی ارتفاع لایه مرزی پایدار و سرعت اصطکاکی در پایان شبیه‌سازی GABLS1 با تنظیمات مختلف مدل.

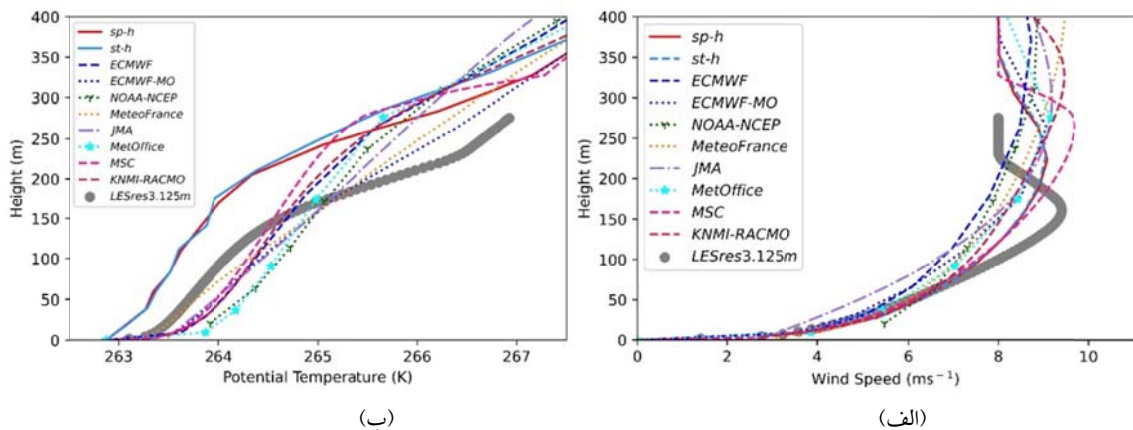
آزمایش	ارتفاع (متر)	سرعت اصطکاکی (متر بر ثانیه)
sp-l	۳۲۶	۰/۴۱۳
st-l	۳۳۲	۰/۴۱۰
sp-h	۲۶۳	۰/۳۸۷
st-h	۲۶۸	۰/۳۸۷



شکل ۲. شبیه‌سازی‌های GABLS1 برای میانگین ساعت نهم (الف) نیم‌رخ قائم باد و (ب) نیم‌رخ قائم دما. نمودار ضخیم سایه‌دار خاکستری معرف نتایج LES در آزمایش GABLS1 با تفکیک‌پذیری ۳/۱۲۵ متر است. نتایج مربوط به مختصه قائم سیگما-پی در تفکیک‌های پایین و بالا با خط پُر به ترتیب سبز و قرمز، و نتایج متناظر برای مختصه سیگما-تا در تفکیک‌های پایین و بالا با خط‌نقطه‌چین به ترتیب بنفش و آبی نشان داده شده است.

فرایندهای لایه مرزی را انجام می‌دادند. با مقایسه نیم‌رخ‌های قائم باد در شکل ۳-الف به خوبی عملکرد بهتر طرح‌واره‌های TKE نمایان است. همچنین به نظر می‌رسد که ساختار استفاده‌شده در مقاله حاضر نیم‌رخ بهتری را برای باد در مقایسه با همه مدل‌های عملیاتی شرکت‌کننده در آزمایش مقایسه متقابل GABLS1 شبیه‌سازی کرده است. بررسی نیم‌رخ قائم دمای پتانسیلی همچنان، آریبی منفی را در ارتفاعات پایین هم در مقایسه با نتایج LES و هم مدل‌های عملیاتی شرکت‌کننده در آزمایش GABLS1 نشان می‌دهد.

در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب برای بررسی بهتر ساختارهای قائم باد و دمای پتانسیلی، شبیه‌سازی‌های دو مختصه سیگما-پی و سیگما-تا با تفکیک بالا در UTGAM با نتایج شبیه‌سازی‌های مدل‌های عملیاتی شرکت‌کننده در آزمایش GABLS1 مقایسه شده است (نتایج مربوط به مدل‌های تحقیقاتی آورده نشده است). در زمان آزمایش از میان مدل‌های عملیاتی شرکت‌کننده در آزمایش GABLS1 فقط مدل‌های MSC و KNMI-RACMO از طرح‌واره‌های TKE استفاده می‌کردند و سایر مدل‌های عملیاتی یا طرح‌واره مرتبه یکم پارامترسازی



شکل ۳. مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل‌های عملیاتی استفاده‌شده در آزمایش GABLS1 با شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر در مختصات سیگما-تا و سیگما-پی با تفکیک بالا برای (الف) نیم‌رخ قائم باد و (ب) نیم‌رخ قائم دما. نمودار ضخیم سایه‌دار خاکستری معرف نتایج LES در آزمایش GABLS1 با تفکیک‌پذیری ۳/۱۲۵ متر است. خط پُر قرمز تفکیک بالای سیگما-پی، خط‌چین آبی روشن در قسمت الف و خط پُر آبی روشن در قسمت ب تفکیک بالای سیگما-تا و شبیه‌سازی سایر مدل‌های عملیاتی برطبق رنگ و نشانه‌های ارائه‌شده در راهنمای شکل‌ها به ترتیب برای مدل‌های ECMWF، ECMWF-MO، NOAA-NCEP، MeteoFrance، JMA، MetOffice، MSC، KNMI-RACMO و LESres3.125m آورده شده است.

از همان روابط استفاده شده است.

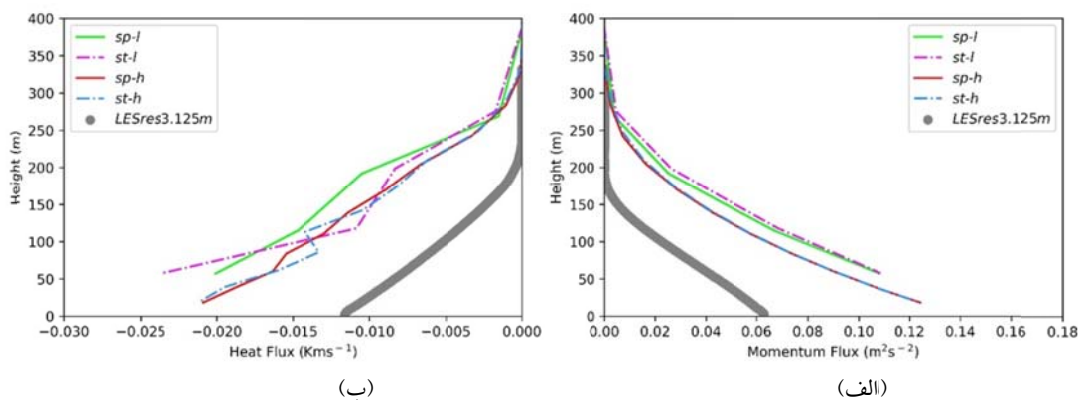
$$l_m = \frac{K_m}{\sqrt{E}} \quad (10)$$

$$l_h = \frac{K_h}{\sqrt{E}} \quad (11)$$

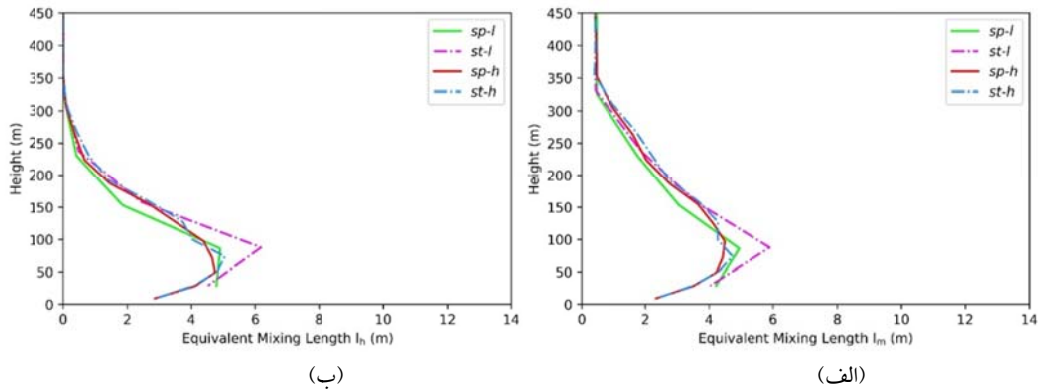
در رابطه‌های ۱۰ و ۱۱، l_m و l_h به ترتیب طول‌های معادل تکانه و گرما، K_m و K_h به ترتیب ضرایب پخش تکانه و گرما و E انرژی جنبشی تلاطمی است. میانگین طول آمیختگی معادل تکانه در آزمایش GABLS1 حدود ۱ متر تعیین شده بود (کوکسارت و همکاران، ۲۰۰۶) (شکل LES آورده نشده است) و بیشتر مدل‌ها هم طول کمتر از ۵ متر را برای لایه مرزی پایدار شبیه‌سازی کرده بودند. در اینجا هم مقادیر شبیه‌سازی شده در بازه قابل قبولی برای تکانه و گرما قرار دارند. ضمن آن‌که الگوهای نسبی مشابهی هم بین طول‌های معادل تکانه و گرما دیده می‌شود. به نظر می‌رسد که مختصه سیگما-تتا در تفکیک پایین و در ارتفاع حدود ۱۰۰ متری در مکان پیشینه‌اش، اریبی بیشتری را نسبت به سایر آزمایش‌ها نشان داده است. برای ملموس‌تر بودن نتایج تقریبی مقدار میانگین طول‌های آمیختگی تکانه و گرما در زیر ۴۰۰ متر به ترتیب در مختصه تفکیک پایین سیگما-پی ۲/۹ و ۲/۴ متر، تفکیک پایین سیگما-تتا ۳/۲ و ۲/۷ متر، تفکیک بالای سیگما-پی ۲/۹ و ۲/۵ متر و تفکیک بالای سیگما-تتا ۲/۹ و ۲/۵ متر است.

شکل‌های ۴-الف و ۴-ب به ترتیب شبیه‌سازی‌های شار تکانه و گرما را برای میانگین ساعت نهم آزمایش نشان می‌دهند. بیشتر بودن مقادیر شار تکانه و کمتر بودن شار گرما از مقادیر LES در هر دو شکل کاملاً مشخص است. این‌طور به نظر می‌آید که طرح‌واره لایه مرزی هردوی پخش تکانه و گرما را بیشتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌کند. تمایز چندانی در شبیه‌سازی شار تکانه بین مختصات سیگما-تتا و سیگما-پی به جز نزدیک‌تر شدن مقادیر به نتایج LES در حالت‌های با تفکیک بالا مشاهده نمی‌شود اما در محاسبه شار گرما این‌گونه نیست. در ادامه برای بررسی دقیق‌تر شکل‌های طول آمیختگی معادل ضرایب پخش آورده شده است.

شکل‌های ۵-الف و ۵-ب به ترتیب طول آمیختگی معادل را برای تکانه و گرما در آخرین گام زمانی شبیه‌سازی نشان می‌دهند. در اینجا برای محاسبه طول آمیختگی معادل تکانه و گرما به ترتیب از رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ استفاده شده است (کوکسارت و همکاران، ۲۰۰۶). همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد طرح‌واره لایه مرزی UTGAM مقادیر یکسانی را برای طول‌های آمیختگی تکانه و گرما مطابق رابطه ۷ به کار می‌گیرد اما از آنجا که مدل‌های مختلف از روابط مختلفی برای محاسبه این طول‌ها استفاده می‌کنند، برای اینکه بتوان مقایسه‌ای بین همه آنها انجام داد از روابط معادل در آزمایش GABLS1 استفاده شده است. در اینجا هم برای حفظ اصول آزمایش



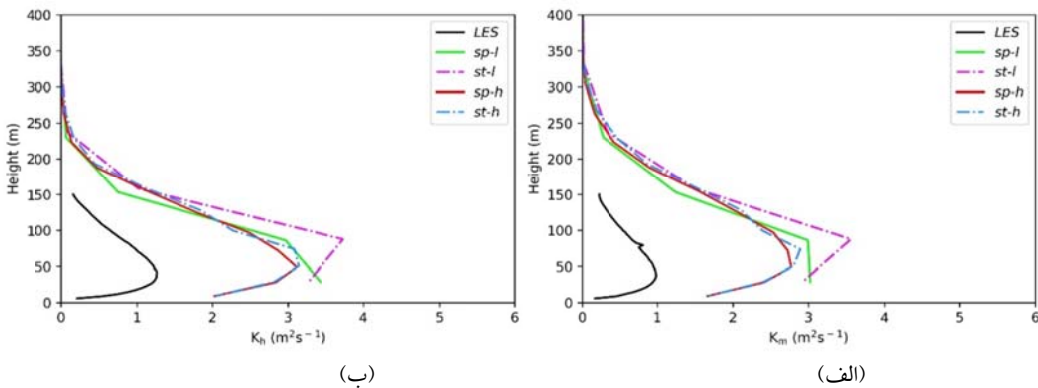
شکل ۴. شبیه‌سازی‌های GABLS1 برای میانگین ساعت نهم (الف) شار تکانه و (ب) شار گرما. نمودار ضخیم سایه‌دار خاکستری معرف نتایج LES در آزمایش GABLS1 با تفکیک‌پذیری ۳/۱۲۵ متر است. نتایج مربوط به مختصه قائم سیگما-پی در تفکیک‌های پایین و بالا با خط پُر به ترتیب سبز و قرمز، و نتایج مناظر برای مختصه سیگما-تتا در تفکیک‌های پایین و بالا با خط‌نقطه‌چین به ترتیب بنفش و آبی نشان داده شده است.



شکل ۵. شبیه‌سازی‌های GABLS1 در آخرین گام زمانی برای (الف) طول آمیختگی معادل تکانه و (ب) طول آمیختگی معادل گرما. نتایج مربوط به مختصه قائم سیگما-پی در تفکیک‌های پایین و بالا با خط پُر به‌ترتیب سبز و قرمز، و نتایج متناظر برای مختصه سیگما-تا در تفکیک‌های پایین و بالا با خط نقطه‌چین به‌ترتیب بنفش و آبی نشان داده شده است.

را نسبت به سایر آزمایش‌ها نشان داده است. شکل ۷ نیم‌رُخ قائم عدد پرائتل تلاطمی را نشان می‌دهد. در این شکل خط مشکی نشان‌دهنده نتایج LES است. عدد پرائتل نسبت پخش تلاطمی تکانه را به پخش تلاطمی گرما نشان می‌دهد. بسیاری از مدل‌ها به‌طور صریح مقدار یک را برای این عدد در لایه سطحی در نظر می‌گیرند اما مقادیر آن بین ۰/۷ تا یک در لایه سطحی برآورد شده است (پیتان و همکاران، ۲۰۱۵). شیوهای دما و رطوبت در نزدیک سطح کاملاً به این عدد وابسته هستند و محاسبه درست آن از اهمیت شایان توجهی در پیش‌بینی‌های مدل‌های عملیاتی برخوردار است. نتایج LES مقدار میانگینی حدود ۰/۸ را تا پایه وارونگی نشان داده است (کوکسارت و همکاران، ۲۰۰۶).

شکل‌های ۶-الف و ۶-ب به‌ترتیب نیم‌رُخ‌های قائم ضرایب پخش تکانه و گرما را در آخرین گام شبیه‌سازی نشان می‌دهند. خط مشکی در هر دو شکل نتایج LES را نشان می‌دهد. از هر دو شکل کاملاً هویدا است که ضرایب پخش تکانه و گرمای شبیه‌سازی‌شده در این آزمایش‌ها از مقادیر LES بیشتر هستند. همچنین، شکل ضرایب پخش گرما همخوانی زیادی را با ضرایب پخش تکانه نشان می‌دهد. رفتار خطی در نزدیکی سطح به‌ویژه در تفکیک بالا که پایین‌ترین تراز صحیح نزدیک‌تر به سطح است، مشاهده می‌شود. علاوه بر این، مقدارهای بیشینه‌ای در ارتفاع‌های بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر مشاهده شده است. در اینجا نیز همانند طول آمیختگی معادل به‌نظر می‌رسد که مختصه سیگما-تا در تفکیک پایین و در ارتفاع حدود ۱۰۰ متری در مکان بیشینه‌اش، اریبی بیشتری

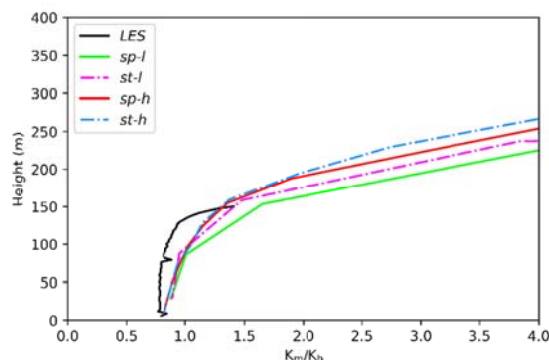


شکل ۶. شبیه‌سازی‌های GABLS1 در آخرین گام زمانی برای (الف) ضریب پخش تکانه و (ب) ضریب پخش گرما. نتایج مربوط به مختصه قائم سیگما-پی در تفکیک‌های پایین و بالا با خط پُر به‌ترتیب سبز و قرمز، و نتایج متناظر برای مختصه سیگما-تا در تفکیک‌های پایین و بالا با خط نقطه‌چین به‌ترتیب بنفش و آبی نشان داده شده است. خط پُر سیاه نتایج LES را نشان می‌دهد.

همچنین، در حالت sp-h3 نزدیک‌ترین تراز صحیح به سطح در ارتفاع تقریبی ۲/۳ متری و اولین تراز کسری بالای سطح در ارتفاع تقریبی ۴/۶ متری قرار گرفته است (جدول ۳).

شکل‌های ۸-الف و ۸-ب شبیه‌سازی‌های حساسیت‌سنجی به موقعیت نزدیک‌ترین تراز صحیح از سطح را به ترتیب برای ارتفاع لایه مرزی و سرعت اصطکاکی سطحی نشان می‌دهند. اثر افزایش تفکیک قائم بر بهبود شبیه‌سازی‌ها در هر دو شکل آشکار است اما مورد جالب توجه مقایسه حالت sp-h1 با sp-h2 است که در حالت دوم اگرچه اولین تراز صحیح بالای سطح به سطح نزدیک‌تر شده اما نتایج بهبود نیافته است. دلیل این موضوع به اختلاف زیاد ایجاد شده با تراز بالایی در این حالت مربوط می‌شود. بنابراین لزوماً نزدیک کردن پایین‌ترین تراز صحیح به سطح را نمی‌توان عاملی برای بهبود شبیه‌سازی‌ها دانست بلکه باید علاوه بر آن به موقعیت قرارگیری ترازهای بالاتر هم توجه شود. مورد جالب توجه دیگر در شبیه‌سازی ارتفاع لایه مرزی در شکل ۸-الف میل کردن مقادیر محاسبه‌شده در حالت پیش‌فرض مدل به مقدار محاسبه‌شده با به‌کارگیری شرط GABLS1 در حالت sp-h3 با فقط یک متر اختلاف در پایان شبیه‌سازی است. مقدار نهایی ارتفاع در حالت پیش‌فرض در sp-h3 با به‌کارگیری $C_n = 0.1$ حدود ۲۶۴ متر و مقدار محاسبه‌شده با استفاده از شرط GABLS1 در این حالت حدود ۲۶۳ متر است.

شکل‌های ۹-الف و ۹-ب به ترتیب شار تکانه و گرما را در شبیه‌سازی‌های حساسیت‌سنجی به موقعیت قرارگیری پایین‌ترین تراز صحیح نشان می‌دهند. در اینجا هم نزدیک‌تر شدن مقادیر شبیه‌سازی شده به نتایج LES با افزایش تفکیک‌پذیری دیده می‌شود اما همچنان مقادیر شبیه‌سازی‌شده با نتایج LES دارای اختلاف هستند. این اختلاف‌ها همان‌طور که پیش‌تر نیز بدان اشاره شد از بزرگ بودن مقایر ضرایب پخش تکانه و گرما ناشی شده‌اند.



شکل ۷. عدد پراتل تلاطمی در گام زمانی آخر شبیه‌سازی آزمایش GABLS1. نتایج مربوط به مختصه قائم سیگما-پی در تفکیک‌های پایین و بالا با خط پُر به ترتیب سبز و قرمز، و نتایج متناظر برای مختصه سیگما-تا در تفکیک‌های پایین و بالا با خط نقطه‌چین به ترتیب بنفش و آبی نشان داده شده است. خط پُر سیاه نتایج LES را نشان می‌دهد.

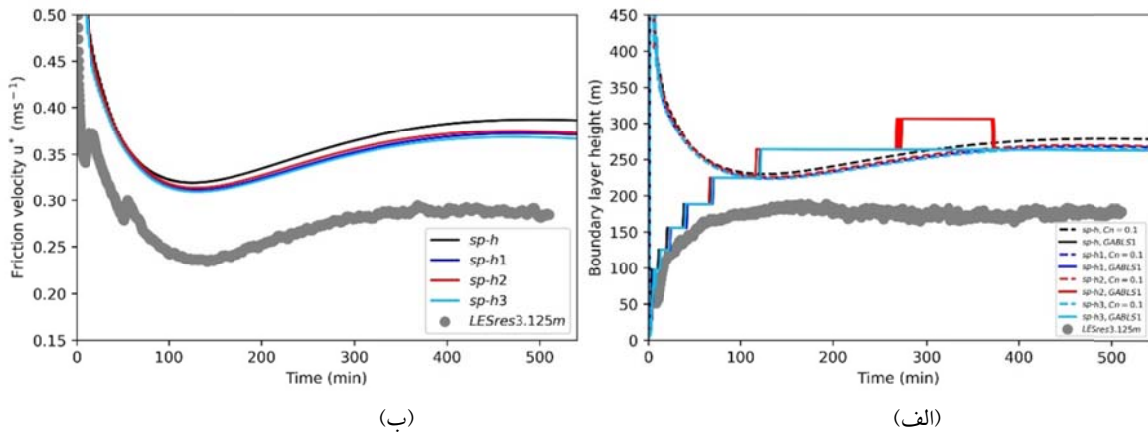
در ادامه برای بررسی حساسیت شبیه‌سازی‌ها در مدل UTGAM به موقعیت نزدیک‌ترین تراز صحیح از سطح، سه شبیه‌سازی جدید انجام گرفته و نتایج آنها با نتایج تفکیک بالای مختصه سیگما-پی مقایسه شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد در تفکیک بالای سیگما-پی (sp-h) ۳۳ تراز در زیر ۳ کیلومتر قرار دارد و ارتفاع تقریبی نزدیک‌ترین تراز صحیح به سطح و اولین تراز کسری بالای سطح به ترتیب ۹ و ۱۸ متر است. در شبیه‌سازی‌های جدید و مطابق جدول ۳ در حالت sp-h1 نسبت به sp-h یک تراز در نزدیک سطح اضافه شده و بنابراین ۳۴ تراز در زیر ۳ کیلومتر قرار گرفته است. در این حالت نزدیک‌ترین تراز صحیح به سطح در ارتفاع تقریبی ۴/۶ متری و اولین تراز کسری بالای سطح در ارتفاع تقریبی ۹ متری قرار دارد. در حالت sp-h2 نسبت به sp-h1 هیچ تراز جدیدی اضافه نشده و همان ۳۴ تراز در زیر ۳ کیلومتر وجود دارد اما ارتفاع نزدیک‌ترین تراز صحیح به سطح نزدیک‌تر شده است و تقریباً ۲/۳ متر بالای سطح قرار گرفته است (جدول ۳). همچنین، اولین تراز کسری بالای سطح در ارتفاع تقریبی ۱۱/۴ متری در این حالت قرار دارد. در شبیه‌سازی sp-h3 نسبت به sp-h دو تراز در نزدیکی سطح افزوده شده است و بنابراین در این حالت ۳۵ تراز در زیر ارتفاع ۳ کیلومتری قرار گرفته است.

جدول ۳. مشخصات آزمایش حساسیت‌سنجی به ارتفاع نخستین تراز صحیح از سطح.

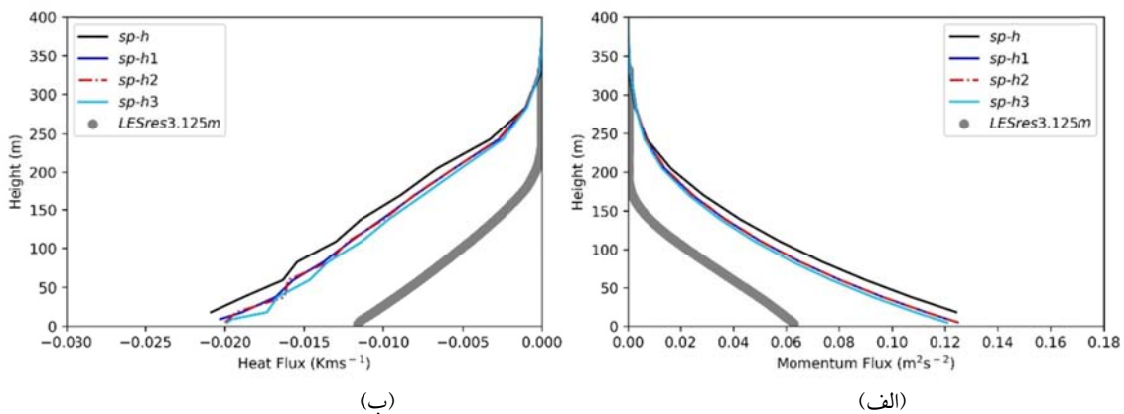
آزمایش	تعداد تراز	تراز صحیح*	تراز کسری**
sp-h	۳۳	۹	۱۸
sp-h1	۳۴	۴/۶	۹
sp-h2	۳۴	۲/۳	۱۱/۴
sp-h3	۳۵	۲/۳	۴/۶

* ارتفاع اولین تراز صحیح از سطح برحسب متر.

** ارتفاع اولین تراز کسری بالای سطح برحسب متر.



شکل ۸. شبیه‌سازی‌های حساسیت‌سنجی به موقعیت قرارگیری نزدیک‌ترین تراز صحیح به سطح برای (الف) ارتفاع لایه مرزی و (ب) سرعت اصطکاکی. نمودار ضخیم سایه‌دار خاکستری معرف نتایج LES در آزمایش GABLS1 با تفکیک‌پذیری ۳/۱۲۵ متر است. خط پُر سیاه اجرای با ۳۳ تراز (sp-h)، خط پُر آبی تیره اجرای با ۳۴ تراز (sp-h1)، خط پُر قرمز اجرای با ۳۴ تراز (sp-h3) ولی با نزدیک‌تر کردن پایین‌ترین تراز صحیح به سطح در مقایسه با حالت قبل و خط آبی روشن اجرای با ۳۵ تراز را همگی در مختصه قائم سیگما-پی نشان می‌دهند. همچنین، خط‌چین‌ها در قسمت الف با همان ترتیب رنگی گفته‌شده برای خطوط پُر، نشان‌دهنده نتایج با مقادیر پیش‌فرض طرح‌واره لایه مرزی و بدون استفاده از شرط آزمایش GABLS1 برای محاسبه ارتفاع هستند.



شکل ۹. شبیه‌سازی‌های حساسیت‌سنجی به موقعیت قرارگیری نزدیک‌ترین تراز صحیح به سطح برای (الف) شار تکانه و (ب) شار گرما. نمودار ضخیم سایه‌دار خاکستری معرف نتایج LES در آزمایش GABLS1 با تفکیک‌پذیری ۳/۱۲۵ متر است. خط پُر سیاه اجرای با ۳۳ تراز (sp-h)، خط پُر آبی تیره اجرای با ۳۴ تراز (sp-h1)، خط‌نقطه‌چین قرمز اجرای با ۳۴ تراز (sp-h3) ولی با نزدیک‌تر کردن پایین‌ترین تراز صحیح به سطح در مقایسه با حالت قبل و خط آبی روشن اجرای با ۳۵ تراز و همگی در مختصه قائم سیگما-پی نشان می‌دهند.

۵. نتیجه‌گیری

صحیح به سطح انجام شد. در مجموع در نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده به‌خوبی بهبود عملکرد طرح‌واره لایه مرزی با افزایش تفکیک قائم و نزدیک کردن اولین تراز صحیح به سطح مشاهده شده است. در ضمن، صرف نزدیک کردن اولین تراز صحیح بالای سطح به سطح زمین برای بهبود نتایج شبیه‌سازی‌ها کافی نیست و ممکن است حتی اثری وارون داشته باشد. بنابراین، علاوه بر مکان نزدیک‌ترین تراز صحیح بالای سطح باید به موقعیت قرارگیری ترازهای بالاتر هم توجه شود. مقادیر زیاد ضریب پخش تکانه و گرمای محاسبه‌شده نیز همخوانی خوبی را مشابه با سایر مدل‌های عملیاتی استفاده‌شده در این آزمایش نشان داده است. در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی LES، طرح‌واره لایه مرزی استفاده‌شده در مدل UTGAM در شبیه‌سازی تحول تکانه موفق‌تر از گرما عمل می‌کند. آریبی منفی نیم‌رخ دمای پتانسیلی در شبیه‌سازی لایه مرزی دارای چینه‌بندی پایدار و اثرات احتمالی آن در نتایج UTGAM نیاز به بررسی بیشتری دارد که امید است در پژوهش‌های آتی به آن پرداخته شود.

مراجع

- Bazile, E., Marquet, P., Bouteloup, Y. and Bouysse, F., 2011, The Turbulent Kinetic Energy (TKE) scheme in the NWP models at Météo-France. ECMWF GABLS Workshop on Diurnal cycles and the stable boundary layer, 7-10 November 2011.
- Beare, R. J., Macvean, M. K., Holtslag, A. A. M., Cuxart, J., Esau, I., Golaz, J. C., Jimenez, M. A., Khairoutdinov, M., Kosovic, B., Lewellen, D., Lund, T. S., Lundquist, J. K., McCabe, A., Moene, A.F., Noh, Y., Raasch, S. and Sullivan, P., 2006, An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 118, 247–272, <https://doi.org/10.1007/s10546-004-2820-6>.
- Beljaars, A. C. M., 1992, Numerical Schemes for Parameterizations, ECMWF seminar Proceedings on Numerical Methods in Atmospheric Models, Reading, U.K., 9-13 September 1991, Vol II, 1–42.
- Blackadar, A. K., 1962, The vertical distribution

ارزیابی عملکرد مدل‌ها و طرح‌واره‌های جدید گامی ضروری در پیشرفت پیش‌بینی‌های مدل‌های عملیاتی جوی به حساب می‌آید. در اینجا یک طرح‌واره TKE مرتبه ۱/۵ برای لایه مرزی به هسته دینامیکی مدل گردش کلی جو دانشگاه تهران موسوم به UTGAM پیوند داده شده است. بدیهی است برای شناخت درست عملکرد این طرح‌واره انجام آزمایش‌هایی ضروری می‌باشد. از طرفی نسخه‌های تک‌ستونی مدل‌ها ابزاری ارزان و سریع برای ارزیابی طرح‌واره‌های پارامترسازی‌های فیزیکی به‌شمار می‌آیند. بدین‌منظور در این پژوهش، آزمایش مقایسه متقابل GABLS1 به‌عنوان یک آزمایش ساده ولی در عین حال پذیرفته‌شده و استاندارد، انتخاب شد. برای ارزیابی عملکرد طرح‌واره لایه مرزی، چهار تنظیم ساختار قائم مختلف از لحاظ تعداد تراز و نوع مختصه برای انجام شبیه‌سازی‌های GABLS1 در نسخه تک‌ستونی UTGAM طراحی، پیاده و مقایسه شد. نتایج به‌دست آمده در این آزمایش عملکرد این طرح‌واره را با توجه به کاربرد آن در یک مدل عملیاتی جهانی در رده قابل‌قبولی قرار می‌دهد. شبیه‌سازی‌هایی هم برای بررسی حساسیت مدل به موقعیت قرارگیری نزدیک‌ترین تراز

of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 67, 3095–3102, <https://doi.org/10.1029/jz067i008p03095>.

- Bosveld, F. C., Baas, P., van Meijgaard, E., de Bruijn, E. I. F., Steeneveld, G. J. and Holtslag, A. A. M., 2014, The Third GABLS Intercomparison Case for Evaluation Studies of Boundary-Layer Models. Part A: Case Selection and Set-Up. *Boundary-Layer Meteorol.*, 152, 133–156, <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9917-3>.
- Bosveld, F. C., Baas, P., Van Meijgaard, E., De Bruijn, E. I. F., Steeneveld, G. J. and Holtslag, A. A. M., 2014, The Third GABLS Intercomparison Case for Evaluation Studies of Boundary-Layer Models. Part B: Results and Process Understanding. *Boundary-Layer Meteorol.*, 152, 157–187, <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9919-1>.
- Brinkop, S. and Roeckner, E., 1995, Sensitivity of a general circulation model to parameterizations of cloud-turbulence

- interactions in the atmospheric boundary layer. *Tellus A*, 47, 197–220, <https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1995.t01-1-00004.x>.
- Cohen, A. E., Cavallo, S. M., Coniglio, M. C. and Brooks, H. E., 2015, A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U.S. cold season severe weather environments. *Weather Forecast.*, 30, 591–612, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00105.1>.
- Cuxart, J., Holtslag, A. A. M., Beare, R. J., Bazile, E., Beljaars, A., Cheng, A., Conangla, L., Ek, M., Freedman, F., Hamdi, R., Kerstein, A., Kitagawa, H., Lenderink, G., Lewellen, D., Mailhot, J., Mauritsen, T., Perov, V., Schayes, G., Steeneveld, G.-J., Svensson, G., Taylor, P., Weng, W., Wunsch, S. and Xu, K.-M., 2006, Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 118, 273–303, <https://doi.org/10.1007/s10546-005-3780-1>.
- Eckerman, S., 2008, Hybrid σ - p coordinate choices for a global model. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 224–245.
- Giorgetta, M. A., Roeckner, E., Mauritsen, T., Stevens, B., Bader, J., Crueger, T., Esch, M., Rast, S., Kornblueh, L., Schmidt, H., Kinne, S., Mobis, B. and Krismer, T., 2013, The atmospheric general circulation model ECHAM6 - Model description. *Berichte zur Erdsystemforsch. Reports Earth Syst. Sci.*, 173, <https://doi.org/10.1029/2010JD014036>.
- Holtslag, A. A. M., 2003, GABLS initiates intercomparison for stable boundary layers. *GEWEX News*, 13, 7–8.
- Holtslag, A. A. M., Svensson, G., Basu, S., Beare, B., Bosveld, F. C. and Cuxart, J., 2012, Overview of the GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study (GABLS). *ECMWF GABLS Workshop on Diurnal cycles and the stable boundary layer*, 7-10 November 2011. 11–23.
- Holtslag, A. A. M., Svensson, G., Baas, P., Basu, S., Beare, B., Beljaars, A. C. M., Bosveld, F. C., Cuxart, J., Lindvall, J., Steeneveld, G. J., Tjernstrom, M. and Van De Wiel, B. J. H., 2013, Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: Challenges for weather and climate models. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 94, 1691–1706, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00187.1>.
- Konor, C. S. and Arakawa, A., 1997, Design of an atmospheric model based on a generalized vertical coordinate. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1649–1673.
- Mahrt, L., 1982, Momentum Balance of Gravity Flows. *J. Atmos. Sci.* 39, 2701–2711.
- Mellor, G. L. and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys.*, 20, 851–875, <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>.
- Mohebalhojeh, A. R., Joghataei, M. and Dritschel, D. G., 2016, Toward a PV-based algorithm for the dynamical core of hydrostatic global models. *Mon. Weather Rev.*, 144, 2481–2502, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0379.1>.
- Pithan, F., Wayne, A. and Mauritsen, T., 2015, Improving a global model from the boundary layer: Total turbulent energy and the neutral limit Prandtl number. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 6, 513–526, <https://doi.org/10.1002/2013MS000282>. Received.
- Reed, K. A. and Jablonowski, C., 2012, Idealized tropical cyclone simulations of intermediate complexity: A test case for AGCMs. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 4, 1–25, <https://doi.org/10.1029/2011MS000099>.
- Rossby, C.-G. and Montgomery, R. B., 1935, The layer of frictional influence in wind and ocean currents. *Pap. Phys. Oceanogr. Meteor.*, 3 (3), 1–101.
- Sandu, I., Beljaars, A., Bechtold, P., Mauritsen, T. and Balsamo, G., 2013, Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction (NWP) models? *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5, 117–133, <https://doi.org/10.1002/jame.20013>.
- Shin, H. H., Hong, S. Y. and Dudhia, J., 2012, Impacts of the lowest model level height on the performance of planetary boundary layer parameterizations. *Mon. Weather Rev.*, 140, 664–682, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00027.1>.
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., Block, K., Brokopf, R., Fast, I., Kinne, S., Kornblueh, L., Lohmann, U., Pincus, R., Reichler, T. and Roeckner, E., 2013, Atmospheric component of the MPI-M earth system model: ECHAM6. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5, 146–172, <https://doi.org/10.1002/jame.20015>.
- Svensson, G., Holtslag, A. A. M., Kumar, V., Mauritsen, T., Steeneveld, G. J., Angevine, W. M., Bazile, E., Beljaars, A., De Bruijn, E. I. F., Cheng, A., Conangla, L., Cuxart, J., Ek, M., Falk, M. J., Freedman, F., Kitagawa, H., Larson, V. E., Lock, A., Mailhot, J., Masson, V., Park, S., Pleim, J., Soderberg, S., Weng, W. and Zampieri, M., 2011, Evaluation of the diurnal cycle in the Atmospheric Boundary Layer over land as Represented by a Variety

- of Single-Column models: The second GABLS Experiment. *Boundary-Layer Meteorol.*, 140, 177–206, <https://doi.org/10.1007/s10546-011-9611-7>.
- Vickers, D. and Mahrt, L., 2004, Evaluating formulations of stable boundary layer height. *J. Appl. Meteorol.*, 43, 1736–1749, <https://doi.org/10.1175/JAM2160.1>.
- Zilitinkevich, S. and Baklanov, A., 2002, Calculation of the height of the stable boundary layer in practical applications. *Boundary-Layer Meteorol.*, 105, 389–409, <https://doi.org/10.1023/A:1020376832738>.

Evaluating the performance of a planetary boundary layer scheme using GABLS1 experiment in a single-column version of the global model developed based on potential vorticity

Behravesht, M.¹, Mohebalhojeh, A. R.², Mirzaei, M.^{3*} and Yazgi, D.⁴

1. Ph.D. Student, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

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

4. Researcher, Research department, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden

(Received: 21 Nov 2020, Accepted: 24 Jan 2021)

Summary

Representing the boundary layer processes is crucial in simulating atmospheric phenomena in operational hydrostatic weather forecast models. Moreover, evaluating the performance of different physical processes in a variety of numerical models is an essential subject of its own. This paper presents an objective assessment of a planetary boundary layer scheme based on turbulent kinetic energy in a single-column version of the innovative atmospheric general circulation model developed based on potential vorticity at the University of Tehran, which is called UTGAM. Single-column models are a complementary tool to the atmospheric general circulation models that provide a simple framework to investigate the fidelity of the simulated physical processes.

The reliable parameterization of the boundary layer processes has got significant impacts on weather forecasts. Most of the hydrostatic models have got deficiencies in the representation of these unresolved processes, especially in stably stratified conditions, and it seems that this problem is continuing in the forthcoming future. Here we have utilized the first GABLS intercomparison experiment set up as a simple tool to evaluate the performance of the diffusion scheme in the UTGAM. Two different sigma-theta and sigma-pressure single-column grid staggering combined with, respectively, 33 and 14 vertical levels below 3 km height have been used for the low- and high-resolution simulations. The GABLS1 LES results have been used as a benchmark for comparison. The boundary layer scheme that has been explored here is the same as the one in the ECHAM model, but some simplifications have been made. For instance, in this simulation, the effects of tracers have been ignored to circumvent the complexity of the problem.

Results depict subtle nuances between the sigma-theta and sigma-pressure coordinates in intercomparison between the low and high vertical resolutions separately, which are more apparent in the lower vertical resolution. Nevertheless, it seems that the diffusion processes have been simulated rather more accurately in the high-resolution sigma-pressure vertical coordinate. The boundary layer scheme analogous with most of the operational models in the GABLS1 intercomparison experiment overestimate the momentum and the heat diffusion coefficients. The wind profile with height, depicts maxima that are higher than the corresponding LES profile. It is inferred that the scheme mixes momentum over a deeper layer than the LES, but the simulated wind profile is better in comparison with the other operational models in GABLS1. Considering the vertical profiles of potential temperature revealed that the amount of heat mixing is not suitable in this experiment, and it causes a negative bias in the lower part of the simulated boundary layer. The simulated amounts of surface friction velocity have proved significant differences with the LES results in all separate experiments. However, the latter large amounts seem unlikely to have a detrimental effect on forecast scores in the operational model. Moreover, the sensitivity of the scheme to the lowest full level has been partially explored. Decreasing the lowest full-level height concurrent with increasing the vertical resolution leads to a modest influence on the simulation of the boundary layer processes. All the results confirm notable improvements by increasing the vertical resolution in both sigma-theta and sigma-pressure coordinates.

Keywords: Simulation, GABLS1, stable boundary layer, vertical coordinate, diffusion coefficients, UTGAM.

* Corresponding author:

mirzaeim@ut.ac.ir