

## بررسی ساختار چند جریان جستانک توفان‌های همرفتی تهران با استفاده از

### داده‌های سودار

عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>\*</sup>، ندا بیوک<sup>\*</sup> و محمد علی تقفی<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۶۴۶۶

(دریافت مقاله: ۸۳/۳/۲۶، پذیرش مقاله: ۸۳/۹/۱۰)

#### چکیده

جریان‌های جبهه‌ای جستانک ناشی از توفان‌های همرفتی، اغلب به صورت پرنرژی و کوتاه مدت‌اند. مشخصات این جریان‌ها عبارت‌اند از: کاهش دما (حدود ۳ تا ۸ درجه سلسیوس)، افزایش فشار (حدود ۲ تا ۳ میلی‌بار)، افزایش ناگهانی سرعت باد (حدود ۱۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه)، تغییرات جهت باد (تا ۱۰۰ درجه) و افزایش رطوبت (حدود ۱۰ درصد) که هنگام عبور پدیده از روی ایستگاه‌های زمینی ثبت می‌شوند. در این مطالعه، ابتدا مشخصات ۱۰ مورد جبهه جستانک با استفاده از ثبت‌های هواشناختی در ایستگاه ژئوفیزیک، تعیین و کمیت‌هایی مثل سرعت افقی باد، سرعت پیشینه انتشار جبهه جستانک و عمق آن محاسبه شده است. سپس ساختار قائم این جبهه‌ها با استفاده از داده‌های سودار بررسی شده که این داده‌ها شامل سرعت افقی، سرعت قائم، جهت باد و شارهای تلاطمی  $uv$ ،  $wv$  و  $wu$  است. نتایج نشان می‌دهد که با ورود جبهه جستانک، شدت تلاطم و شارهای تلاطمی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. در نمایه‌های قائم، چیش‌های سرعت، به طور کامل مشهودند که این نشانگر نقش آن‌ها در ایجاد ساختارهای تلاطمی مشاهده شده است. این ساختارهای تلاطمی در نمودارهای پربندی ارتفاع-زمان سرعت و جهت باد و همچنین سرعت قائم دیده می‌شوند. در لحظه پیشینه‌شدن سرعت انتشار جبهه جستانک، سرعت قائم باد به پیشینه مقدار منفی خود می‌رسد که نشانگر ارتباط واگرایی‌های افقی و قائم است.

نتایج بررسی تغییرات زمانی مؤلفه قائم سرعت در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد که ساختارهای تلاطمی مذکور از پیچک‌های بزرگ بالشتک‌مانند، با اندازه حدود ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر تشکیل شده است. احتمالاً این بالشتک‌ها در اثر ناپایداری کلوین-هلمهولتز ایجاد می‌شوند. پربندهای مربوط به جریان جبهه‌ای، برای همه پدیده‌ها ساختار یکسانی از نظر اندازه نشان نمی‌دهند، گرچه شکل آن‌ها مشابه است. این موضوع ممکن است به علت پیچیدگی و چندجبهه‌ای بودن برون‌شارش‌های ناشی از توفان‌های با ابعاد متفاوت باشد. برای مطالعه تفصیلی این جبهه‌ها نیاز به کار مشاهداتی بیشتری وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: جبهه جستانک، توفان‌های همرفتی، ساختار قائم باد، بالشتک‌های کلوین-هلمهولتز

#### ۱ مقدمه

می‌گیرد (کاتن و انتیس، ۱۹۸۹). جریان گرانی حاصل از برون‌شارش در قسمت‌های مرکزی ابر، جلوتر از توفان حرکت می‌کند و باعث بالابردن هوای گرم در مسیر خود می‌شود که این امر می‌تواند موجب انتشار و تشدید توفان شود (کاتن و انتیس، ۱۹۸۹). تغییرات پارامترهای هواشناختی سطحی، مربوط به برون‌شارش‌های توفان است. (که هنگام رسیدن به سطح زمین واگرا و پاشیده می‌شود). به دلیل اهمیت این پدیده‌ها در هواشناسی، بررسی‌های متعدد محققان متفاوت با استفاده از داده‌های

پیش از بررسی ساختارهای جبهه‌های جستانک، نکاتی راجع به توفان‌های همرفتی که عامل ایجاد آن‌ها است، ارائه می‌شود. توفان‌های همرفتی که اغلب به صورت تندری ظاهر می‌شوند، پدیده‌های خرد تا میان‌مقیاس جوی‌اند که به طور معمول، پرنرژی و همراه بارعد و برق و باران‌های شدید هستند و گاهی باعث تگرگ و بادهای جستانک بسیار شدید در سطح زمین می‌شوند. نوع ابرهای همراه آن‌ها، کومه‌ای باران‌زاست و در حقیقت قسمت عمده‌ای از بارش کلی روی زمین با این نوع ابر صورت

اثرات آیرودینامیکی روی ساختارهای صنعتی شهر تهران و هواپیمایی) می‌گذارند، با اهمیت است.

## ۲ نحوه تشکیل توفان‌های همرفتی و ساختار و دینامیک برون‌شارش‌ها در آن‌ها

توفان‌های همرفتی که بارزترین شکل ناپایداری جوی‌اند، همراه با ابرهای کومه‌ای ظاهر می‌شوند. دو عامل چینش قوی باد و انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس زیاد در جو، از علل ایجاد توفان‌های همرفتی شدید. به هنگام وجود توفان همرفتی، دمای پتانسیل اشباع  $\theta_s$  ابتدا تا سطح فشاری ۷۰۰ میلی‌باری کاهش و سپس افزایش می‌یابد که علت آن سرد بودن توده هوا (به علت تبخیر قطرات باران در هوای غیر اشباع خارج از ابر در یک توفان همرفتی) است. افزایش دمای پتانسیل تر  $\theta_w$  نزدیک سطح زمین نیز به دلیل گرم‌شدن لایه مرزی در سطح زمین روی می‌دهد. این حالت در بعضی از ایام سال مانند بهار و اوایل تابستان که هوای نزدیک سطح زمین رطوبت نسبتاً زیادی دارد، یا به دلیل فرارفت هوای گرم و مرطوب از مناطق دریایی به خشکی و یا به علت صعود ناگهانی هوا در اثر کوهستان رخ می‌دهد (اتکینسون، ۱۹۸۱).

ناپایداری شدید مذکور به صورت پلوم‌هایی در لایه مرزی رشد می‌کند. هنگامی که این پلوم‌ها به ارتفاع وارونگی واقع در رأس لایه مرزی (۱ تا ۲ کیلومتر) می‌رسد (لایه وارونه به صورت درپوش عمل می‌کند)، باعث گرمایش بیشتر لایه زیرین می‌شوند و در این صورت  $\theta_w$  در لایه مرزی جو افزایش می‌یابد. هنگامی که هوایی با  $\theta_w$  زیاد به قسمت زیرین جریانهای سرد و خشک سطوح فوقانی فرارفت می‌یابد، ناپایداری شدید به صورت توفان همرفتی ایجاد می‌شود (اتکینسون، ۱۹۸۱). توفان همرفتی، از یک یا چند یاخته تشکیل شده است که هر یک دارای مرحله کومه‌ای، مرحله بلوغ و مرحله فروپاشی است.

شبکه‌های میان‌مقیاس، برج هواشناسی، داده‌های راداری و تصاویر ماهواره‌ای صورت گرفته است که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

گوف (۱۹۷۶) در تغییرات تکاملی جبهه‌های جستناک، چهار مرحله را تشخیص داده است. جبهه جستناک در مرحله اول، با برون‌شارش‌های در حال شتاب‌گیری، در مرحله دوم، با برون‌شارش‌های شبه مانا و در مرحله سوم، با برون‌شارش‌های در حال فروپاشی همراه است و در مرحله چهارم، حالت میرایی (ضعیف شدن نهایی) خود را طی می‌کند. واکیموتو (۱۹۸۲) آغاز تا پایان شکل‌گیری این برون‌شارش‌ها را براساس داده‌های سطح زمین و رادیوسوند در چهار مرحله، طبقه‌بندی کرده است. ماهوننی (۱۹۸۸)، مشخصات ترمودینامیکی و جنبش‌شناختی برون‌شارش‌های جبهه‌های جستناک توفان‌ها را با استفاده از داده‌های رادار داپلر تعیین کرد. منسه و میدلتون (۱۹۹۵)، انرژی جبهه جستناک را هنگامی که داخل لایه مرزی به صورت یک مجموعه تک‌موج ظاهر می‌شود، بررسی کرده‌اند. بیدختی و رنجبر (۱۹۹۷) نیز مطالعاتی آماری راجع به جبهه‌های جستناک حاصل از توفان‌های تهران، کرمان و اهواز انجام داده‌اند. بیدختی و بنی‌هاشم (۲۰۰۱)، ساختار بادهای جستناک را با توجه به توپوگرافی منطقه تهران مورد مطالعه قرار دادند و روشن ساختند که این جریان‌ها را می‌توان با توپوگرافی شکست. در این مطالعه، ساختار چند جبهه جستناک با استفاده از پارامترهای هواشناختی در نزدیک سطح زمین تا ارتفاع حدود ۱۷۰۰ متر برای زمان‌هایی که نمونه‌هایی از این نوع جبهه در تهران وجود داشته است، با استفاده از داده‌های سودار مستقر در مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران بررسی شده است. برای بررسی تفاوت‌های موجود بین این جبهه‌ها، نمونه‌هایی از آن‌ها که اغلب در بهار رخ می‌دهند، بررسی شده است. بررسی ساختار قائم این جریانها با توجه به اثراتی که روی لایه مرزی جو تهران (از نظر آلودگی و

ناپایدار است و گاهی باعث تشکیل بالشتک‌های کلونین-هلمهولتز (Kelvin-Helmholtz billows) می‌شود (مولر و کاربن، ۱۹۸۷). وجود چینش زیاد در نمایه سرعت باد در حضور چینه‌بندی چگالی، در حالت مذکور ( $Ri < 0.25$ )، باعث ایجاد ناپایداری از نوع کلونین-هلمهولتز می‌شود که اغلب در جو نیز به چشم می‌خورد (برای مثال، ترنر، ۱۹۷۳).

هوای جبهه جستانک، به دلیل سرد بودن، هنگام انتشار در سطح زمین می‌تواند ساختار ترمودینامیکی لایه مرزی را تغییر دهد. جبهه جستانک به‌طور معمول در قسمت جلوی جریان ضخیم‌تر است، به‌ویژه اگر نسبت به محیط، خیلی سردتر و چگال‌تر باشد. در قسمت پشت جبهه، جریان نازک‌تر و گاهی با یک دنباله تلاطمی همراه است. شکل ۱، ساختار یک جبهه جستانک در حالت بلوغ را نشان می‌دهد.

نمونه سرعت‌های انتشار جبهه جستانک،  $10 \text{ ms}^{-1}$  است، با این حال سرعت‌هایی بیش از  $20 \text{ ms}^{-1}$  نیز مشاهده شده است (گوف، ۱۹۷۶، واکیموتو، ۱۹۸۲ و ماهونی، ۱۹۸۸). گوف، واکیموتو و ماهونی، میانگین سرعت‌های جبهه جستانک را از  $4 \text{ ms}^{-1}$  تا  $15 \text{ ms}^{-1}$  و با مقدار میانگین کلی  $8/6 \text{ ms}^{-1}$  مشاهده کرده‌اند. این جریان‌ها مشابه جریان‌های گرانی‌اند و مدل جریان گرانی با در نظر گرفتن همه شرایط لازم، حرکت جبهه جستانک را به‌خوبی توصیف می‌کند. معادله سرعت سر جریان گرانی به‌صورت زیر است (سیمسون ۱۹۸۶):

$$V = k(gd \frac{\bar{\rho}_c - \bar{\rho}_w}{\bar{\rho}_w})^{1/2} \quad (1)$$

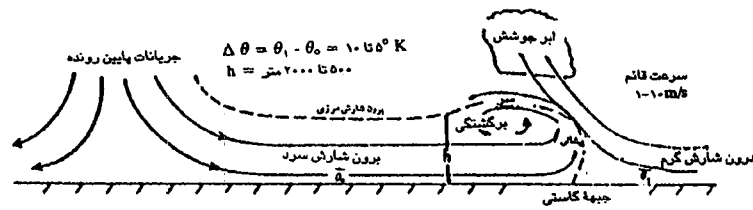
که در آن  $g$  شتاب گرانی،  $d$  عمق جریان،  $\rho_c$  و  $\rho_w$  به ترتیب میانگین چگالی هوای گرم و سرد و  $k$  عدد فرود داخلی (نسبت نیروی لختی به نیروی گرانی) است.

برای محاسبه سرعت متوسط جبهه جستانک، می‌توان از مقادیر باد میانگین در جلو و عقب جبهه به‌صورت:

سامانه‌های همرفتی شدید، اندازه‌های متفاوتی دارند. کرانه پایین ابعاد افقی آن‌ها که یاخته همرفتی منفرد است، ۵ تا ۱۰ کیلومتر طول دارد و کرانه بالای ابعاد افقی آن‌ها دارای مقیاسی در حدود پهنه جبهه‌های همدیدی است. بین این کرانه‌ها، سامانه‌های همرفتی میان‌مقیاس قرار دارند. شایان ذکر است که در بادهای همراه با سامانه‌های مذکور، تغییر ناگهانی بیش از ۸ متر بر ثانیه در مدت ۱ دقیقه، نسبت به باد میانگین، گزارش شده است (کاتن و انیس، ۱۹۸۹).

توفان‌های همرفتی به سه دسته توفان‌های تک‌یاخته‌ای، چندیاخته‌ای و ابریاخته‌ای تقسیم می‌شوند. توفان‌های تک‌یاخته‌ای، به‌طور معمول دارای پهنه افقی حدود ۵ تا ۱۰ کیلومتر هستند و طول عمر کوتاهی دارند و با زمان تغییر می‌کنند. اگر چینش قائم باد، ضعیف و کم‌تر از  $10 \text{ ms}^{-1}$  در کم‌تر از ۸ کیلومتر باشد، توفان‌های تک‌یاخته‌ای که طول عمری حدود ۳۰ دقیقه دارند، روی می‌دهند. در توفان‌های چندیاخته‌ای، یاخته‌ها به‌طور متوالی ظاهر می‌شوند و پهنه افقی ۳۰ تا ۵۰ کیلومتر دارند و گاهی به‌طور قائم تا عمق وردسپهر گسترش دارند (رواج، ۱۹۷۶). هرگاه مقدار چینش قائم به‌طور متوسط، تقریباً  $15 \text{ ms}^{-1}$  تا  $20 \text{ ms}^{-1}$  در کم‌تر از ۴ کیلومتر باشد، توفان‌های چندیاخته‌ای به‌وجود می‌آیند. وقتی چینش قائم، بزرگ‌تر از  $20 \text{ ms}^{-1}$  در کم‌تر از ۴ کیلومتر باشد، توفان‌های ابر یاخته‌ای به‌وجود می‌آیند. چنین توفان‌هایی اغلب باران شدید و تگرگ تولید می‌کنند.

وقتی هوای سرد خروجی (برون‌شارش) از توفان‌های همرفتی به سطح زمین می‌رسد، واگرا می‌شود و جریان جبهه‌ای جستانک تشکیل می‌دهد. عمق این جریان‌ها، وابسته به فاصله از توفان و اندازه توفان از ۰/۵ کیلومتر تا ۲ کیلومتر، تغییر می‌کند. قسمت فوقانی جبهه جستانک به‌دلیل ایجاد چینش شدید سرعت (با وجود پایداری ایستایی)، یعنی عدد ریچاردسون کوچک ( $Ri < 0.25$ )،



شکل ۱. ساختار یک جبهه جستانک در حالت بلوغ (کاتن وانتیس، ۱۹۸۹).

سرعت حرکت جبهه نسبت به شارش محیط، اغلب به سرعت جریانهای گرانی نزدیک است و اگر اندازه اختلاف چگالی در طول جبهه جستانک به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta \theta}{\theta_0} \quad (۴)$$

سرعت جبهه جستانک به صورت معادله زیر خواهد بود (کاتن وانتیس، ۱۹۸۹):

$$V = k \left[ g d \left( \frac{\Delta \theta}{\theta_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۵)$$

که  $\Delta \theta$  اختلاف دمای پتانسیل هوای سرد جبهه (با عمق  $d$ ) و هوای محیط،  $\theta_0$  میانگین دمای پتانسیل محیط و  $k$  عدد فرود است.

با استفاده از معادله حالت نشان داده می شود که می توان اختلاف چگالی در طول جبهه جستانک را از اختلاف فشار هیدروستاتیکی به صورت زیر تخمین زد:

$$\Delta P_h = g d \Delta \rho \quad (۶)$$

که  $\Delta \rho$ ، اختلاف چگالی هوای سرد جبهه با محیط است و می توان آن را برحسب  $\alpha \Delta T$ ، محاسبه کرد ( $\alpha$ ) ضریب انبساط گرمایی است).

بنابراین عمق برون شارش از رابطه زیر به دست می آید:

$$d = \frac{\Delta P_h}{\alpha \Delta T g} \quad (۷)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{2}(u_1 + u_2) \quad (۲)$$

استفاده کرد که  $u_1$  و  $u_2$  مؤلفه های سرعت در هوای گرم و سردند. معادله سرعت انتشار جریان گرانی، سرعت حرکت جبهه جستانک را به طور دقیق به دست می دهد و تکانه تراز بالا تأثیر کمی بر سرعت جبهه جستانک دارد (واکیموتو، ۱۹۸۲ و گوف، ۱۹۷۶). اگر فرض کنیم تغییرات فشار ( $\Delta P$ )، هیدروستاتیکی و مربوط به هوای سرد باشد، می توان سرعت متوسط جریان گرانی را هنگام عبور جبهه از محل مشاهده تخمین زد. اگر همه انرژی پتانسیل شاره به انرژی جنبشی تبدیل شود، می توان نوشت:

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = g(\Delta \rho) d \rightarrow V = \sqrt{2} \left( g \frac{\Delta \rho}{\rho} d \right)^{\frac{1}{2}}$$

که برحسب اختلاف دما عبارت است از:

$$V = k \left[ g \frac{\Delta T}{T} d \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۳)$$

که در آن  $k = \sqrt{2}$  است که با مقایسه رابطه (۳) با رابطه پیش از آن (که برحسب  $\rho$  نوشته شده)، مقدار  $\sqrt{2}$  برای  $k$  به دست می آید. البته در واقع  $k$  عدد فرود

$$\left( k \equiv F_r = \frac{V}{\left( g \frac{\Delta T}{T} d \right)^{\frac{1}{2}}} \right)$$

است که به عدد رینولدز

جریان بستگی دارد. بنابراین با دانستن پارامترهای لازم می توان سرعت جریان را به دست آورد.

$$P_{nh} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (۹)$$

که  $\rho$  چگالی هوای سرد و  $v$  سرعت باد در هوای سرد است. این معادله از معادله برنولی در نقطه سکون (نسبت به جبهه) روی خط جریان با فرض تراکم‌ناپذیر و مانابودن جریان، به دست می‌آید. این نقطه سکون (stagnation point) در پیشانی جریان جبهه‌ای قرار دارد.

افزایش فشار در اثر عبور جبهه جستانک، فقط تابعی از برون‌شارش است. برخورد هوای سرد پشت جبهه جستانک با هوای گرم‌تر محیط، افزایش فشار غیر هیدروستاتیکی را در جلوی جبهه جستانک به وجود می‌آورد. این فشار به مقدار بیشینه‌ای در مرز جبهه‌ای می‌رسد و به‌طور غیریکتوخت، دور از مرز به صفر کاهش می‌یابد. گرادیان فشار غیرهیدروستاتیکی، عامل اصلی کاهش مقدار مؤلفه سرعت باد عمود بر جبهه جستانک در هوای گرم است. بنابر مشاهدات، سرعت باد در زمان تغییر جهت باد به مقدار کمینه می‌رسد، چون احتمالاً هنوز نقطه اندازه‌گیری در هوای گرم قرار دارد و با رسیدن هوای سرد جبهه، سرعت باد افزایش می‌یابد (شکل ۲).

### ۳ بررسی جبهه‌های جستانک تهران بر اساس

#### نگاشت‌های هواشناختی سطحی

توفان‌های همرفتی، اغلب در هنگام بعد از ظهر به علت مقدار بیشینه ناپایداری در لایه مرزی جو، ناشی از گرم‌شدن سطح زمین و در فصولی که میزان رطوبت سطح زمین بالا باشد (برای مثال بهار و اوایل تابستان) رخ می‌دهند. با توجه به نگاشت‌های دما، فشار، رطوبت و سمت و سرعت باد برای ماه‌های مختلف، میزان تغییرات پارامترهای هواشناختی و نحوه تغییر آن‌ها هنگام عبور جبهه‌های جستانک از روی ایستگاه تعیین می‌شوند. از نظر جهت، اغلب جبهه‌های جستانک از سمت غرب یا شمال غرب وارد تهران می‌شوند، ولی جبهه‌های بعدی که

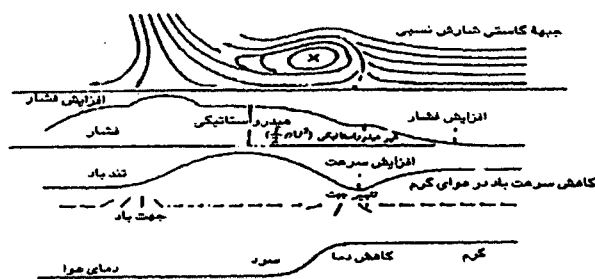
با روابط (۳) و (۷)، رابطه زیر به دست می‌آید که با استفاده از آن، سرعت تقریبی جبهه جستانک را می‌توان از افزایش فشاری که هنگام عبور جبهه ایجاد می‌شود، محاسبه کرد:

$$V = k \left( \frac{\Delta P_h}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۸)$$

این معادله در صورتی معتبر است که هوای محیط را ساکن در نظر بگیریم، یا در جلوی جبهه جستانک، باد متغیری وجود نداشته باشد. در صورتی که همه انرژی پتانسیل جریان جبهه‌ای به انرژی جنبشی تبدیل شود، سرعت جریان جبهه‌ای در قسمت سر آن از معادله (۸) به دست می‌آید و جبهه جستانک می‌تواند با مالش سطحی، تحت تأثیر قرار بگیرد که این اثرات در معادله در نظر گرفته نشده‌اند.

عبور جبهه جستانک، با توجه به سرد (سنگین) بودن هوای جریان، افزایش فشارها در سطح زمین را در پی خواهد داشت، اما گاهی اوقات افزایش فشاری، قبل از رسیدن هوای سرد دیده می‌شود. چاربا (۱۹۷۴)، افزایش فشار پیش‌جبهه‌ای را به امواج گرانی که در جلوی برون‌شارش انتشار می‌یابند نسبت داده است، در صورتی که واکیموتو (۱۹۸۲) این افزایش فشار را که افزایشی غیر هیدروستاتیکی است، به برخورد دو توده هوا با چگالی‌های متفاوت نسبت داده است. این امر وقتی روی می‌دهد که سرعت باد محیط کاهش می‌یابد و در نتیجه افزایش فشار غیرهیدروستاتیکی در جلوی جبهه ایجاد می‌شود (بر اساس معادله برنولی). افزایش فشار هیدروستاتیکی به متوسط دمای قبل و بعد از عبور جبهه جستانک بستگی دارد (واکیموتو، ۱۹۸۲).

اگر هوای محیط ساکن باشد، فشار غیر هیدروستاتیکی با برون‌شارش هوای سرد به وجود می‌آید که مقدار آن عبارت است از:

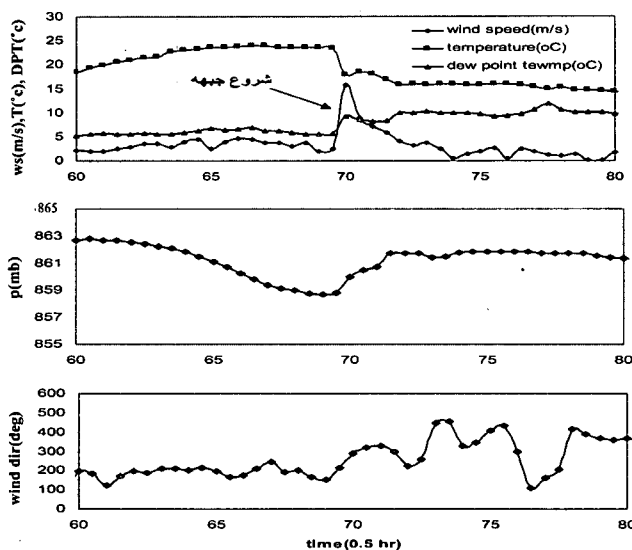


شکل ۲. تغییرات پارامترهای هواشناختی و افزایش فشار غیر هیدروستاتیکی هنگام عبور جبهه جستانک (واکیموتو، ۱۹۸۲).

هنگام عبور یک جبهه جستانک که در مؤسسه ژئوفیزیک ثبت شده‌اند، در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در نگاشت‌ها دیده می‌شود، تغییرات شامل افزایش ناگهانی تندی باد، تغییر جهت باد، کاهش دما، افزایش فشار و افزایش رطوبت نسبی است.

اثر توپوگرافی نیز ممکن است این رفتار را پیچیده‌تر کند (بیدختی و بنی‌هاشم، ۲۰۰۱). جدول ۱ مشخصات چند جبهه جستانک را که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد.

کوچک‌تر نیز هستند، در همان روز (احتمالاً یا مربوط به اثر توپوگرافی کوه‌های شمال تهران‌اند که باعث انعکاس جبهه اصلی می‌شود و جبهه شمالی را ایجاد می‌کند و یا مربوط به برون‌شارش مراحل بعدی توفان یا توفان‌های دیگر در محل هستند)، اغلب دارای جهت شمال شرقی‌اند. جبهه جستانک، اغلب به صورت چندتایی ظاهر می‌شود که این نشان‌دهنده دوره‌ای بودن برون‌شارش توفان‌هاست (گوف، ۱۹۷۶). یک نمونه از نگاشت پارامترهای هواشناختی شامل تندی، جهت باد، دما، رطوبت و فشار،



شکل ۳. نمونه‌ای از ثبت‌های تندی باد، دمای خشک، دمای تر (بالا)، فشار (وسط) و جهت باد (پایین) مربوط به یک جبهه جستانک.

جدول ۱. مشخصات چند جبهه جستانک ثبت‌شده در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک در سال ۲۰۰۲.

| روز       | ساعت شروع (GMT) | مدت زمان (دقیقه) | سرعت بیشینه ( $ms^{-1}$ ) | تغییرجهت باد (درجه) | افزایش فشار (mb) | افت دما ( $C^{\circ}$ ) | افزایش رطوبت (%) | سرعت میانگین ( $ms^{-1}$ ) | عمق جریان (km) |
|-----------|-----------------|------------------|---------------------------|---------------------|------------------|-------------------------|------------------|----------------------------|----------------|
| ۲۰۰۲/۴/۱۸ | ۱۱:۲۰           | ۴۰               | ۱۳                        | ۱۶۰                 | ۱/۴              | ۲                       | ۱۲               | ۵                          | ۲/۱۶           |
| ۲۰۰۲/۴/۱۸ | ۱۸:۰۰           | ۷۰               | ۱۸                        | ۱۴۰                 | ۲/۵              | ۳                       | ۹                | ۱۰                         | ۲/۰۵           |
| ۲۰۰۲/۴/۱۹ | ۱۱:۱۰           | ۱۰۰              | ۱۰                        | ۹۰                  | ۱                | ۷                       | ۵                | ۸                          | ۳/۲            |
| ۲۰۰۲/۴/۲۰ | ۹:۴۰            | ۴۰               | ۱۴                        | ۱۲۰                 | ۱/۲              | ۴                       | ۵                | ۱۰                         | ۰/۹            |
| ۲۰۰۲/۴/۲۰ | ۱۴:۵۰           | ۳۵               | ۱۴                        | ۹۰                  | ۱/۴              | ۴                       | ۱۰               | ۱۲/۵                       | ۱/۵۷           |
| ۲۰۰۲/۴/۲۱ | ۱۱:۱۰           | ۴۰               | ۲۰                        | ۶۰                  | ۲                | ۴                       | ۱۵               | ۱۰                         | ۱/۵۳           |
| ۲۰۰۲/۴/۲۳ | ۱۷:۴۰           | ۳۰               | ۱۲/۵                      | ۱۶۰                 | ۱                | ۴                       | ۵                | ۵                          | ۰/۷۶           |
| ۲۰۰۲/۵/۳  | ۲۱:۰۰           | ۴۰               | ۲۰                        | ۱۶۰                 | ۱/۴              | ۵                       | ۱۰               | ۱۲                         | ۰/۷۵           |
| ۲۰۰۲/۲/۳  | ۱۱:۱۰           | ۱۲۰              | ۱۴                        | ۱۴۰                 | ۲                | ۳                       | -                | ۱۰                         | ۲/۰۴           |

۲۵ وات و توان کلی ۲۲۵ وات است. سودار به روش سنجش از دور (غیرمستقیم) برای اندازه‌گیری کمیت‌های لایه مرزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سودار بر پایه نظریه پراکندگی موج گسیل شده به جو عمل می‌کند. این موج‌ها در اثر تغییرات ضریب شکست امواج صوتی ناشی از تلاطم‌های کوچک مقیاس دمایی و افت و خیزهای سرعت، به‌ویژه در مرزهای وارونگی با شیوهای تند، پراکنش می‌کند. در واقع سودار با گسیل امواج صوتی در حد شنوایی که با بلندگوهای قوی تولید می‌شوند و دریافت موج بازگشتی کار می‌کند. در حالت پس‌پراکنش، فقط افت و خیزهای دمایی با مقیاس نصف طول موج عبوری، شاخص پژواک بازگشتی هستند، ولی در بقیه جهت‌ها، افت و خیزهای دما و سرعت در تعیین ویژگی‌های پژواک بازگشتی مؤثرند، مگر در زاویه ۹۰ درجه که پس‌پراکنش برای آن وجود ندارد. سودار علاوه بر تعیین شدت پژواک دریافتی، سرعت جابه‌جایی هدف را براساس پدیده داپلر اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه کمیت‌هایی مانند سرعت افقی و قائم باد و انحراف معیار آن‌ها، جهت باد و انحراف معیار آن، ارتفاع لایه وارونگی یا لایه آمیخته و آهنگ تغییرات دما با ارتفاع را اندازه‌گیری و محاسبه می‌کند (بیدختی و مالکی فرد، ۱۳۸۱).

تغییرات دما، فشار، رطوبت، سمت و سرعت باد برای جبهه‌های جستانک از روی نمودارها استخراج و سرعت انتشار جبهه و عمق جریان جبهه‌های محاسبه شده است. در محاسبات سرعت انتشار جبهه، از رابطه (۸) با فرض  $k=0.9$  (این مقدار k در مطالعات رنجبر (۱۳۷۶) به دست آمده است و همان‌طور که پیش از این اشاره شد، عدد فرود به عدد رینولدز جریان وابسته است)، به‌طور میانگین برای جبهه‌های جستانک مورد مطالعه در مؤسسه ژئوفیزیک استفاده و  $\rho_0 = 1.35 \text{ kgm}^{-3}$  فرض شده است (رنجبر، ۱۳۷۶). عمق متوسط جریان‌های جبهه جستانک مطالعه شده، ۱/۶ کیلومتر و متوسط سرعت بیشینه آن، ۱۵ متر بر ثانیه و متوسط سرعت جبهه جستانک ۹/۹ متر بر ثانیه است.

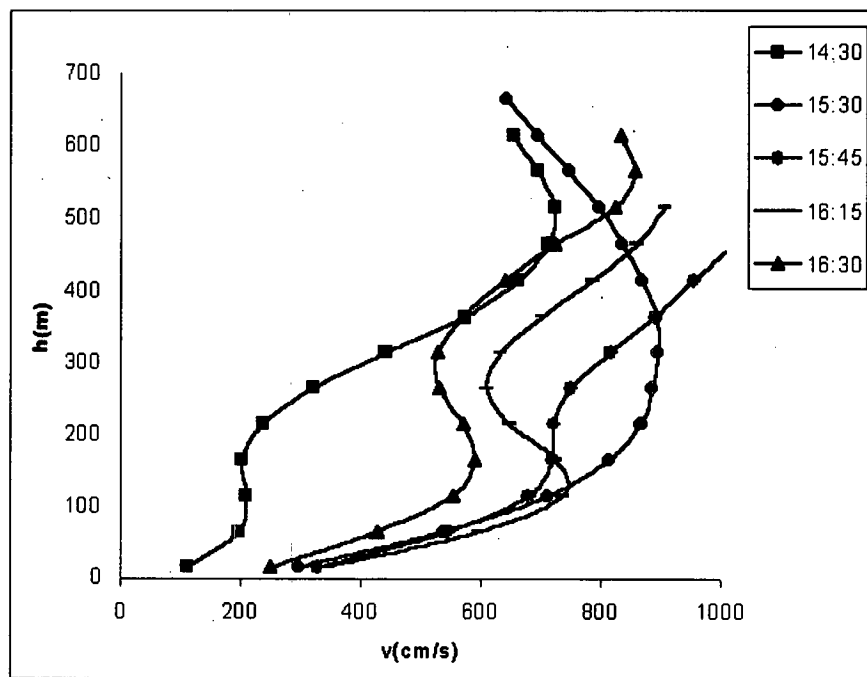
#### ۴ ساختار قائم جبهه‌های جستانک مطالعه‌شده با استفاده از داده‌های سودار

در این مطالعه از داده‌های دستگاه سودار مؤسسه ژئوفیزیک برای بررسی ساختار قائم جبهه‌های جستانک استفاده می‌شود. از این رو لازم است ابتدا راجع به دستگاه سودار و روش کار آن مطالبی ارائه شود. دستگاه سودار مورد نظر از نوع PAI با توان صوتی

تغییرات بعد از جست می‌تواند به عوامل مختلفی به‌ویژه امواج درونی ناشی از پایداری محیط (به‌دلیل حاکم‌شدن هوای سرد) وابسته باشد، ولی در زمان رسیدن جبهه، تغییرات شدیدی (برش شدید) نزدیک سطح زمین وجود دارد (مونتی و همکاران، ۲۰۰۲). شیب نمایه قائم سرعت افقی تا ارتفاع ۲۰۰ تا ۳۰۰ متری افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. از ارتفاع ۵۰۰ متری به بالا، داده‌های سودار، باد را نشان نمی‌دهد که دلیل آن سرعت زیاد باد یا محدودیت اندازه‌گیری سودار برای ارتفاع مربوطه (پیشانی و سر جبهه که به‌طور معمول ضخیم‌تر و دارای عمق بیشتری‌اند) است. در این شکل، نمایه سرعت نزدیک زمین دوباره با ارتفاع حالت افزایشی نشان می‌دهد، ولی در ارتفاع حدود ۶۰۰ متری دوباره کاهش می‌یابد. بر مبنای روند تغییرات، می‌توان ساختار قائم جریان جبهه‌ای را بازسازی کرد که در قسمت بحث نتایج ارائه خواهد شد.

شکل ۴، نمایه‌های قائم سرعت باد را قبل، در حین و بعد از جریان جبهه‌ای نشان می‌دهد. نمایه قائم سرعت افقی باد تا ارتفاع ۵۰ متری، پیش از رخداد بیشینه سرعت باد (ساعت ۱۴:۳۰)، و از ارتفاع ۵۰ متری تا حدود ۴۰۰ متری، پیش از رسیدن سرعت به مقدار بیشینه، دارای شیب مثبت است ولی بعد از رسیدن به سرعت بیشینه (ساعت ۱۵:۳۰)، شیب نمایه قائم سرعت افقی از ۵۰ تا ۲۵۰ متری منفی و از ۲۵۰ تا ۳۰۰ متری مثبت و از ۳۰۰ تا ۶۵۰ متری دوباره منفی و از ۶۵۰ به بعد، داده‌های کم‌تری موجود است.

شکل ۴ نشان می‌دهد که قبل از رسیدن جبهه جستناک، نمایه جریان دارای تغییرات عمده‌ای (شامل چند لایه برشی) است. علت این پیچیدگی به‌طور کامل مشخص نیست، ولی شاید مربوط به منشأهای مختلف هوای ورودی و به منطقه و حرکات نوسانی باشد. علت



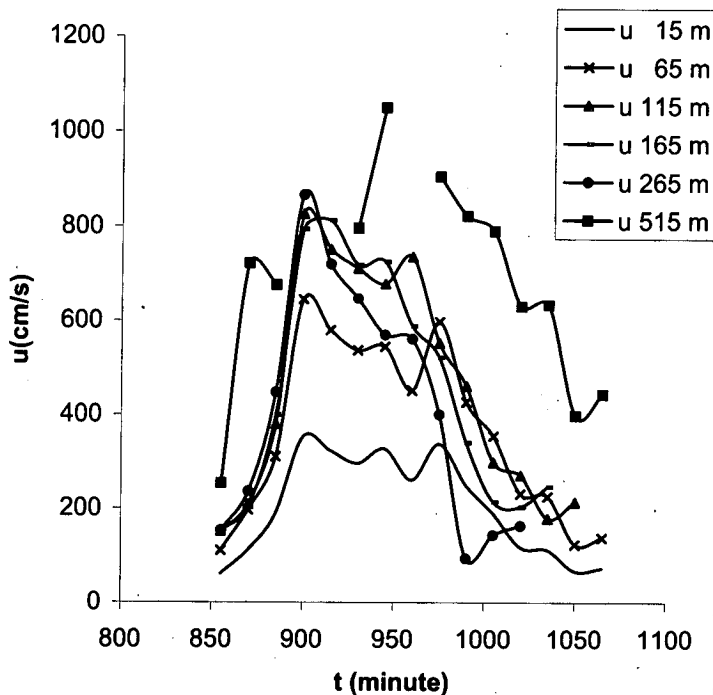
شکل ۴. نمایه‌های قائم سرعت افقی، مربوط به پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹.



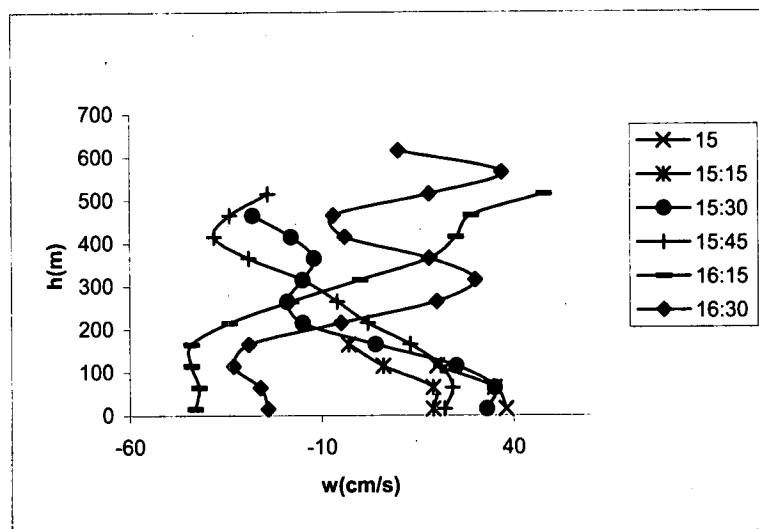
ارتفاع و در زمان‌های مربوطه است.

برای آشکار کردن ساختار حرکات قائم در زمان‌های مختلف، نمایه‌های آن در زمان‌های مختلف، با هم در شکل ۶ نشان داده شده است.  $w$  نزدیک سطح زمین، قبل از جبهه، مثبت و بعد از آن منفی می‌شود که به ترتیب مربوط به حرکات بالارو در جلوی جبهه و حرکات پایین‌رو در پشت سر جبهه است (مارتنر، ۱۹۹۶). نوسانات سرعت قائم با ارتفاع، مربوط به شکل و ساختار جبهه جستانک است. هر جبهه ممکن است شامل چندین بالشتک همراه با حرکات پایین‌رو و بالارو باشد. در مواردی نیز ممکن است گذار خیلی سریع حرکات پایین‌رو به بالارو در پشت جبهه اتفاق بیافتد (مارتنر، ۱۹۹۶) که این دو می‌توانند از علل تغییرات نوسانی حرکات قائم با ارتفاع باشند.

در شکل ۵، تغییرات زمانی سرعت افقی برای ارتفاع‌های متفاوت مشاهده می‌شود. در این شکل، محور افقی معرف زمان برحسب دقیقه است و مبدأ زمان ساعت ۰۰ محلی روز ۲۰۰۲/۴/۱۹ در نظر گرفته شده و برای مثال، عدد ۹۰۰ معرف ساعت ۱۵ (۹۰۰ دقیقه بعد از ساعت ۰۰) است. سرعت افقی قبل از رسیدن به بیشینه مقدار، افزایش پیدا می‌کند. بعد از آن، سرعت در ارتفاع‌های مختلف به صورت آرام‌تری کاهش می‌یابد. ساختار یکسانی در همه ارتفاعات مشاهده می‌شود. رسیدن به سرعت بیشینه، در زمان وقوع جبهه، به طور کامل قابل مشاهده است و نشان می‌دهد که ابتدا جبهه در ارتفاع‌های بالاتر خود را نشان می‌دهد (افزایش سرعت ابتدا در ارتفاع بالاتر رخ می‌دهد). این اختلاف فاز مربوط به ساختار قائم سر جبهه است که شکل شبه دماغی دارد. مقطع بودن منحنی ۵۱۵ متر به دلیل نگرفتن داده از سودار در آن



شکل ۵. تغییرات زمانی سرعت افقی باد در ارتفاع‌های مختلف برای پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹.



شکل ۶. نمایه‌های قائم سرعت قائم باد برای پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹.

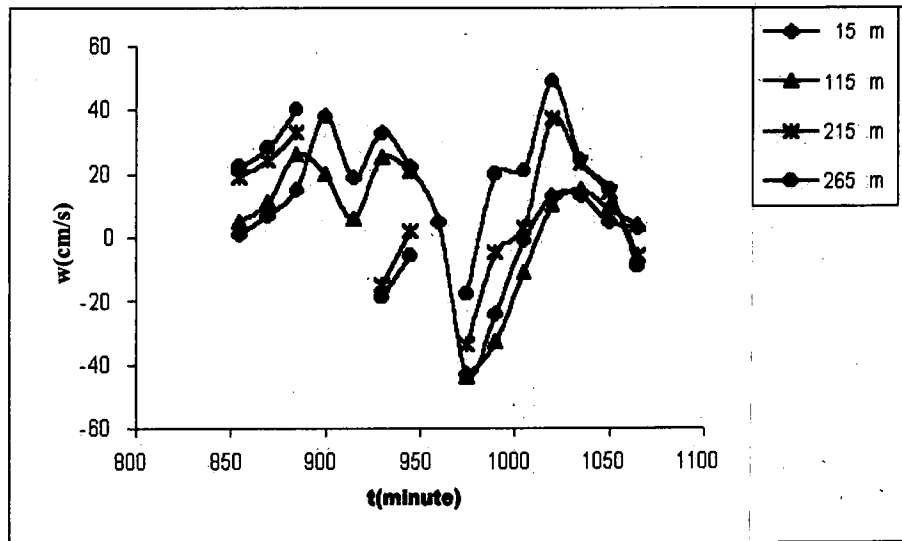
$$\frac{\Delta W}{\Delta t} \sim V \frac{\Delta W}{\Delta x} \quad (10)$$

که  $\Delta W$  تغییرات مؤلفه قائم سرعت، هنگام عبور بالشتک از روی ایستگاه است. بنابراین مقیاس افقی بالشتک عبارت است از  $\Delta x \sim V \Delta t$  که اگر برای بالشتک اولی این جریان، به ترتیب به جای  $\Delta t$  و  $V$ ،  $\Delta t \sim 3 \times 15 \times 60 \text{ s}$  و  $V \sim 8 \text{ ms}^{-1}$  را جایگزین کنیم، برای  $\Delta x$  یا پهنا افقی کلی بالشتک، مقداری حدود ۲۰ کیلومتر به دست می‌آید. بنابراین پهنا افقی بالشتک برای این گونه جریان‌های جبهه‌ای که شبیه جریان گرانی با ناهمگنی ساختاری هستند، در این منطقه، حدود ۲۰ کیلومتر به دست می‌آید. این مقیاس نسبت به مقیاس شعاع تغییر شکل راسبی که در آن اثر چرخش زمین مهم است،  $\left(\frac{g'd}{f}\right)^{\frac{1}{2}}$ ، که  $g'$  شتاب کاهش یافته و  $f$  پارامتر کوریولیس است (خیلی کوچک‌تر است) (برخلاف جبهه‌های بزرگ مقیاس). مقدار شعاع تغییر شکل راسبی برای مقادیر نمونه پارامترهای این جریان‌ها، حدود ۱۰۰ کیلومتر است.

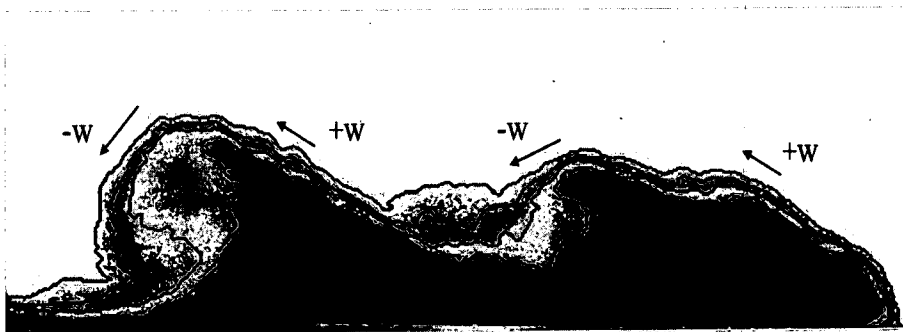
در شکل ۷، ثبت‌های زمانی سرعت قائم در ارتفاع‌های مختلف مشاهده می‌شود. این روند زمانی، حالت نوسانی دارد و می‌تواند ناهمگنی‌های میدان سرعت جریان را آشکار کند. این امر به دلیل وجود پیچک‌های همراه جریان جستنک صورت می‌گیرد که در اثر ناپایداری K-H (Kelvin-Helmholtz instability) ایجاد می‌شود (برای مثال بیدختی، ۱۳۸۳). در واقع می‌توان به این نکته اشاره کرد که در جریان خروجی، حداقل دو بالشتک وجود دارد که پشت سر هم حرکت می‌کنند و اثر خود را در سیگنال زمانی مؤلفه قائم سرعت حرکت هوا نشان می‌دهند. اگر برای بالشتک اول، مطابق شکل ۷ (شکل ۸، مشابه شکل ۷ ولی نمونه شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه است)، مدت زمان عبور را از شروع تا پایان ۴۵ دقیقه در نظر بگیریم، با استفاده از فرضیه جریان فریز شده تیلور می‌توان مقیاس افقی بالشتک را به صورت زیر محاسبه کرد، البته اگر جریان جبهه‌ای را در جهت عمود بر جبهه در نظر بگیریم (واکیموتو، ۱۹۸۲):

$$\frac{\partial W}{\partial t} \sim V \frac{\partial W}{\partial x}$$

که  $V$ ، سرعت متوسط عبور جبهه است و یا:



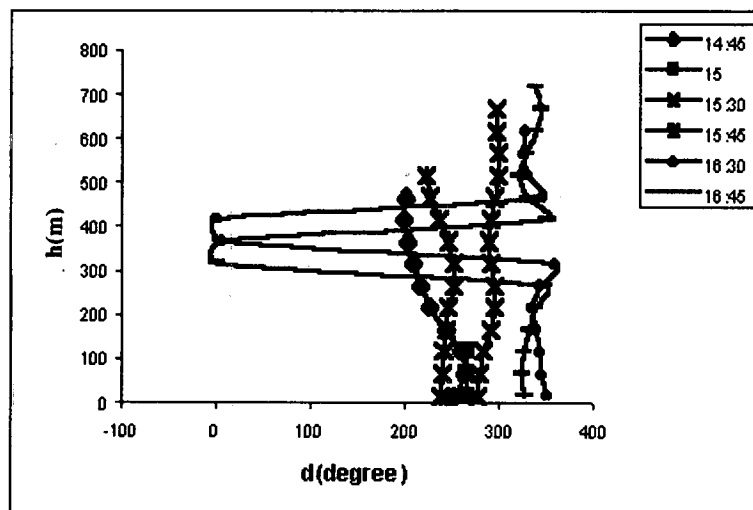
شکل ۷. تغییرات زمانی سرعت قائم برای پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹ در ارتفاع‌های مختلف، شروع جبهه جستانک، ساعت: ۱۵:۳۵-۱۶.



شکل ۸. الگوی تصویری از سرعت قائم (حرکات پایین رو و بالا رو). عکس زمینه مربوط به یک جریان گرانی آزمایشگاهی است که به سمت راست حرکت می‌کند. پرندهای موجود در شکل، پرندهای دمای شاره و بخش‌های تیره‌تر درونی نشانگر دمای کم‌تر است.

در رسیدن جبهه، جهت باد، شمالی می‌شود که نشانگر این است که جبهه از سمت شمال به ایستگاه رسیده است. هم‌چنین در ارتفاع حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر و سطح زمین، به دلیل این‌که جهت باد از ۳۶۰ درجه به صفر عبور می‌کند (انتقال صفر/۳۶۰ درجه)، تغییرات ناگهانی در این شکل دیده می‌شود.

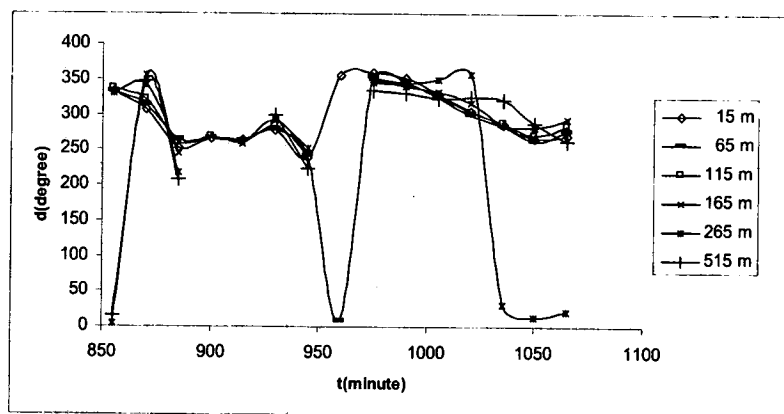
در شکل ۹، نمودار تغییرات جهت باد با بازه زمانی ۱۵ دقیقه از ساعت ۱۴:۱۵ تا ۱۶:۴۵ روز ۲۰۰۲/۴/۱۹ مشاهده می‌شود. با وجود کمبود داده‌ها قبل از وقوع جریان برای ارتفاعات بالا و هم‌چنین نبود داده در لحظه بیشینه‌شدن سرعت باد جستانک، تغییرات جهت باد با ارتفاع به‌ویژه برای زمان‌های بعد از عبور سر جریان به‌طور کامل مشهود است. جهت باد محیط غربی است ولی با



شکل ۹. تغییرات زمانی جهت باد مربوط به پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹، شروع جریان ۱۵:۱۴.

موانع نزدیک سطح زمین و ایستگاه‌های سطحی ممکن است نوفه سیگنال صوتی زیاد باشد. به این علت در این شکل در دو ارتفاع ۶۵ و ۱۵ متری، تغییرات بسیار متغیر به نظر می‌رسد. در شروع جبهه، جهت باد شمال غربی است و بعداً غربی می‌شود. پس از عبور بالشتک اولیه، جهت باد دوباره شمال غربی می‌شود. ساختار ناهمگن در جهت کلی حرکت جبهه است. این موضوع می‌تواند مربوط به تغییر فعالیت توفان مادر این جبهه یا اثر توپوگرافی باشد (بیدختی و بنی‌هاشم، ۲۰۰۱ و گوف، ۱۹۷۶).

شکل ۱۰، تغییرات زمانی جهت باد افقی نسبت به ارتفاع را نشان می‌دهد که در لحظه شروع جست، این میزان تغییرات، بیشتر از ۹۰ درجه است و هرچه عمق جست بیشتر می‌شود، این تغییرات جهت تا لحظه رسیدن سرعت جست به مقدار بیشینه، کم‌تر است. در هنگام رسیدن به سرعت بیشینه، مقدار بیشینه تغییرات جهت باد را مشاهده می‌کنیم. ساختار تغییرات جهت باد برای همه ارتفاعات تا ارتفاع ۵۱۵ متر تقریباً یکسان است. البته می‌دانیم که داده‌های سودار از ۶۵ متر به بالا دارای بیشترین دقت است، زیرا در ارتفاعات پایین‌تر به علت

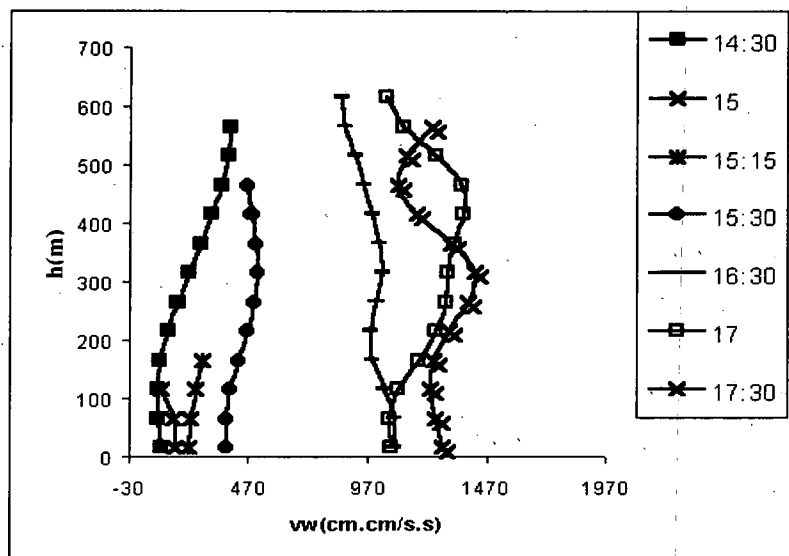


شکل ۱۰. تغییرات زمانی جهت باد در ارتفاع‌های مختلف برای پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹.

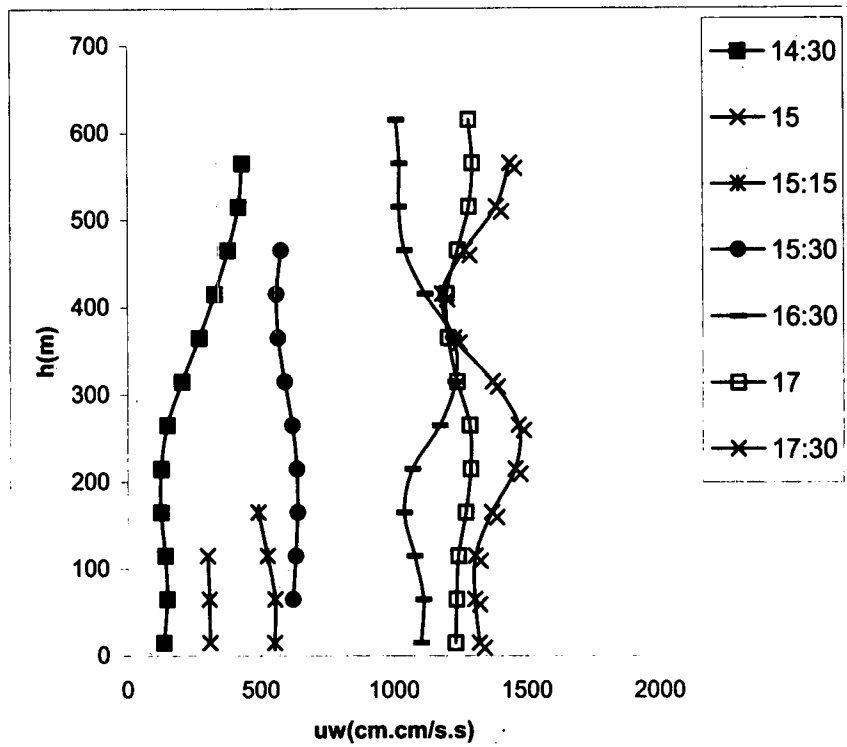
می‌شود. شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب نشان می‌دهند که با شروع جبهه، شارهای تلاطمی به‌ویژه در نزدیک سطح، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این موضوع در واقع مربوط به افزایش ناپایداری‌های چینی است که تلاطم شدیدی را نزدیک سطح ایجاد می‌کند. با توجه به ساختار جبهه جستانک و در نظر گرفتن مکان بیشینه تغییرات سرعت قائم که در دماغه جبهه است (تقریباً در ارتفاع بالاتر از ۵۰۰ متر واقع شده است)، می‌توان تغییرات شار تلاطمی قائم در زمان عبور جبهه را به تغییرات سرعت قائم نیز وابسته دانست. مقادیر منفی  $v_w$ ، معرف انتقال تکانه به سمت پایین است؛ یعنی سرعت میانگین به سمت پایین کاهش می‌یابد که این مربوط به زمان قبل از رسیدن جبهه است.

در شکل ۱۱-ج نیز نمایه‌های شارهای تلاطمی افقی برای این پدیده، نشانگر افزایش چشمگیر شارها در پشت و بعد از عبور جبهه است. این تغییرات افزایشی در شارها نمایانگر افزایش تلاطم است که احتمالاً ناهمواری نیز بر آن تاثیر دارد.

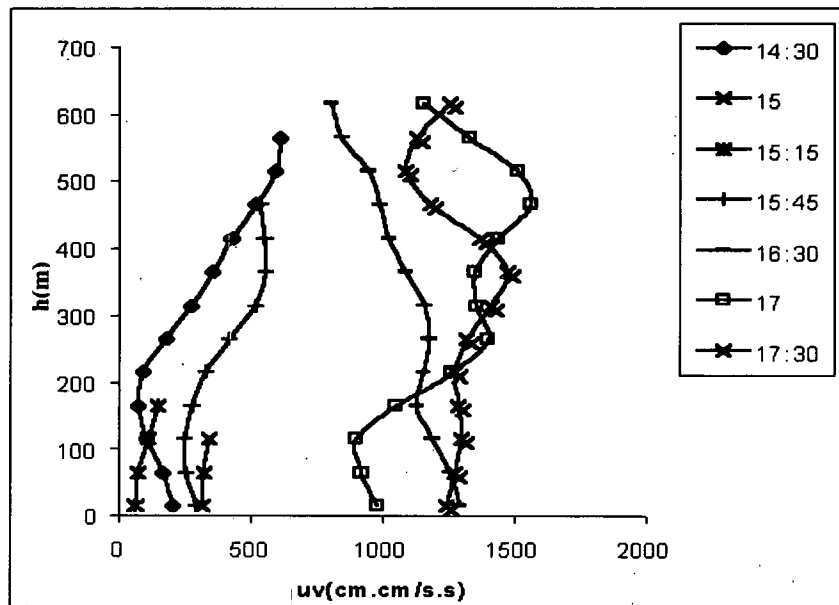
در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب، نمایه‌های قائم شارهای تلاطمی قائم مربوط به پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹، جریان جستانک از ساعت حدود ۱۴:۱۵ تا ۱۷:۴۵ مشاهده می‌شود. در لحظه بیشینه‌شدن سرعت جبهه، داده وجود ندارد. همچنان که در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود، قبل از عبور جبهه تا ارتفاع ۲۰۰ متری، تغییرات نمایه‌ها با ارتفاع به‌صورت یک‌نواخت است. از ارتفاع ۲۰۰ متری به بالا، شارها با ارتفاع افزایش می‌یابند و در حدود ۴۰۰ متری، مقدار شارها با ارتفاع کاهش پیدا می‌کند و یا تقریباً ثابت است. بعد از رسیدن جبهه تا ارتفاع ۱۰۰ متری، شارها تقریباً ثابت‌اند، ولی بعد از آن تا لحظه‌ای که جریان جبهه‌ای پایان پذیرد، شارها با ارتفاع، تغییرات افزایشی و کاهش‌ی نشان می‌دهند. می‌توان همه این تغییرات را به ساختار جبهه و وجود بالشتک‌های کلونین-هلمهولتز نسبت داد که این بالشتک‌ها با چینش‌های شدید باد (با ایجاد تلاطم) در ارتفاعات مختلف همراه هستند (مارتنر، ۱۹۹۶). البته با توجه به محدودیت سودار، اصولاً دو بالشتک تا ارتفاعی که داده در آن وجود دارد مشاهده



شکل ۱۱-الف. نمایه‌های قائم شار تلاطمی  $v_w$  در حین عبور جبهه جستانک روز ۲۰۰۲/۴/۱۹.



شکل ۱۱- ب. نمایه‌های قائم شار تلاطمی uw در مراحل مختلف زمان عبور جبهه جستانک روز ۲۰۰۲/۴/۱۹.



شکل ۱۱- ج. نمایه‌های قائم شار تلاطمی افقی در زمان‌های مختلف عبور جبهه جستانک روز ۲۰۰۲/۴/۱۹.

حرکت هواپیماها، به‌ویژه هنگام بلندشدن و یا نشستن، خطرناک باشد. حد چیش مجاز تعیین شده در نزدیک سطح، حدود  $1 \times 10^{-2} S^{-1}$  است (گوف، ۱۹۷۶). چیش باد

$$\omega_y = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}$$

با توجه به مؤلفه (y) تاوایی  $\frac{\Delta u}{\Delta z}$

که در آن اگر از  $\frac{\partial w}{\partial x}$  چشم‌پوشی کنیم، متناسب با  $\omega_y -$  خواهد بود و بنابراین این شکل می‌تواند توجیهی برای تغییرات قائم تاوایی افقی در جهت موازی جریان جبهه‌ای

$$\omega_y = -\frac{\partial u}{\partial z}$$

باشد. اگر این فرض درست باشد که  $\omega_y = -\frac{\partial u}{\partial z}$ ، بر

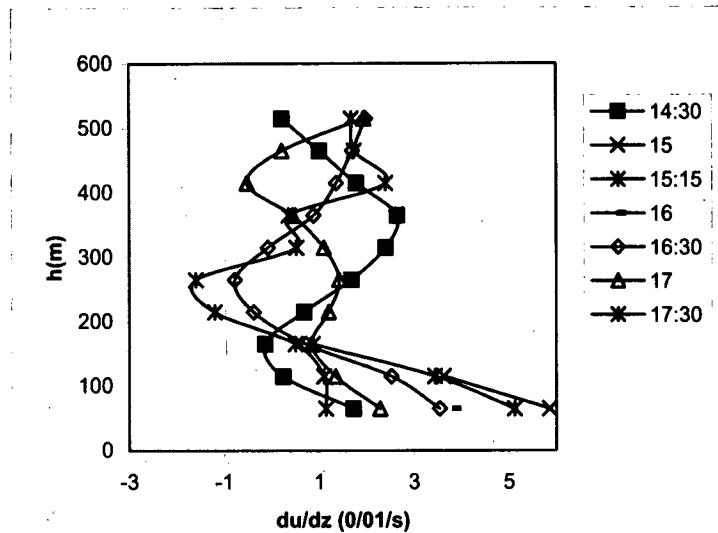
اساس این شکل، هنگام عبور جبهه، نزدیک سطح زمین، تاوایی منفی (در جهت ساعت‌گرد) و در بالا، پادساعت‌گرد است که با ساختار جریان جبهه‌ای که در پایین دارای گرادیان قائم باد افقی مثبت و در بالا دارای گرادیان منفی است، همخوانی دارد (حداقل تا ارتفاع ۳۰۰ متری). مقادیر برش قائم مؤلفه‌های سرعت افقی و قائم و ارتفاع مقادیر بیشینه و کمینه آن‌ها در جدول ۲ آمده است که افزایش قابل ملاحظه‌ای در برش سرعت باد در زمان وقوع پدیده در ارتفاعات پایین را نشان می‌دهد.

فاصله بین نمایه‌ها (در شکل ۱۱- الف تا ج) پیش از رسیدن جست به سرعت بیشینه و بعد از آن تغییرات قابل ملاحظه‌ای در اندازه شارهای تلاطمی نشان می‌دهد که در واقع بیانگر تغییرات افزایشی شار تلاطمی هنگام عبور جبهه است. در زمان شروع جبهه، افزایش ناگهانی مقدار شار  $uv$  نیز به‌طور کامل مشهود است (شکل ۱۱- ج). تغییرات شارهای تلاطمی در ارتفاعات مختلف احتمالاً مربوط به متفاوت‌بودن ساختار قائم سرعت قائم و سرعت افقی باد است و نشان می‌دهد که بین گرادیان‌های دو مؤلفه قائم و افقی باد، ارتباط وجود دارد. این ارتباط در نمودارهای دوبعدی که بعداً ارائه می‌شود، به‌ویژه چیش‌های قائم  $w$  و  $u$  بهتر مشهود است.

شکل ۱۲، تغییرات چیش باد پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹ را نسبت به ارتفاع نشان می‌دهد. تغییرات نوسانی نمایه‌های قائم  $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ ، به‌ویژه بعد از رسیدن جبهه جستانک، بسیار بارز می‌شود که نشان‌دهنده برش‌های متعدد در جریان جبهه‌ای است. چیش‌های محاسبه‌شده نزدیک سطح، حدود  $2-4 \times 10^{-2} S^{-1}$  نسبتاً زیاد است که می‌تواند برای

جدول ۲. مقادیر بیشینه  $\frac{\Delta u}{\Delta z}$  و  $\frac{\Delta w}{\Delta z}$  مربوط به پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹، برحسب  $10^{-2} S^{-1}$  و ارتفاع رخداد آن برحسب متر است.

| ساعت GMT | بیشینه $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ | ارتفاع مربوط به بیشینه $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ | بیشینه $\frac{\Delta w}{\Delta z}$ | ارتفاع مربوط به بیشینه $\frac{\Delta w}{\Delta z}$ | کمینه $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ | ارتفاع مربوط به کمینه $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ | کمینه $\frac{\Delta w}{\Delta z}$ | ارتفاع مربوط به کمینه $\frac{\Delta w}{\Delta z}$ |
|----------|------------------------------------|--|------------------------------------|--|-----------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| ۱۴:۱۵    | ۳/۱۶                               | ۳۱۵  | -۲/۲۲                              | ۲۶۵  | -۰/۱۶                             | ۱۶۵   | -۰/۰۲                             | ۵۱۵   |
| ۱۴:۳۰    | ۲/۶۴                               | ۳۶۵  | -۰/۱۴                              | ۱۶۵  | -۰/۱۴                             | ۲۱۵   | -۰/۱۴                             | ۵۱۵   |
| ۱۴:۴۵    | ۲/۲۴                               | ۶۵   | -۰/۲                               | ۵۱۵  | -۰/۱۴                             | ۳۱۵   | -۰/۴                              | ۲۶۵   |
| ۱۵       | ۵/۸۶                               | ۱۱۵  | ۲/۶۲                               | ۱۱۵  | -۰/۰۶                             | ۶۵  | -۰/۲                              | ۱۱۵   |
| ۱۵:۱۵    | ۵/۱۲                               | ۶۵   | -۰/۸۶                              | ۱۶۵  | -                                 | ۶۵  | -۰/۲۶                             | ۱۱۵   |
| ۱۵:۳۰    | ۲/۸                                | ۶۵   | -۰/۷۸                              | ۵۱۵  | -۰/۸                              | ۳۱۵   | -۰/۴۲                             | ۱۶۵   |
| ۱۵:۴۵    | ۲/۳۴                               | ۶۵   | -۰/۴                               | ۲۱۵  | -۰/۲                              | ۵۱۵   | -۰/۲۸                             | ۲۶۵   |
| ۱۶       | ۳/۸۲                               | ۶۵   | ۳/۸۲                               | ۶۵   | -۰/۱                              | ۶۵  | -۰/۱                              | ۶۵  |
| ۱۶:۱۵    | ۵/۲                                | ۶۵   | -۱/۵۶                              | ۲۱۵  | -۰/۳۸                             | ۵۱۵   | -۰/۰۴                             | ۱۱۵   |
| ۱۶:۳۰    | ۳/۵۴                               | ۶۵   | -۰/۷۸                              | ۲۶۵  | -۰/۵                              | ۵۱۵   | -۰/۴۴                             | ۲۱۵   |
| ۱۶:۴۵    | ۲/۲                                | ۶۵   | -۰/۲۶                              | ۴۱۵  | -۰/۲                              | ۵۱۵   | -۰/۳۴                             | ۲۱۵   |
| ۱۷       | ۲/۲۸                               | ۶۵   | -۰/۵۲                              | ۴۱۵  | -۰/۴۴                             | ۲۱۵   | -۰/۲۸                             | ۲۶۵   |
| ۱۷:۱۵    | ۳/۵۲                               | ۳۱۵  | -۲/۲۲                              | ۲۱۵  | -۰/۸                              | ۲۱۵   | -۰/۳۶                             | ۵۱۵   |
| ۱۷:۳۰    | ۲/۲                                | ۴۱۵  | -۱/۶                               | ۲۶۵  | -۰/۸                              | ۱۶۵   | -۰/۲۲                             | ۲۶۵   |
| ۱۷:۴۵    | ۲/۱۲                               | ۲۱۵  | -۲/۲۲                              | ۲۶۵  | -۰/۱۶                             | ۵۱۵   | -۰/۱۲                             | ۲۱۵   |



شکل ۱۲. تغییرات نمایه قائم چینش باد نسبت به ارتفاع، مربوط به پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹.

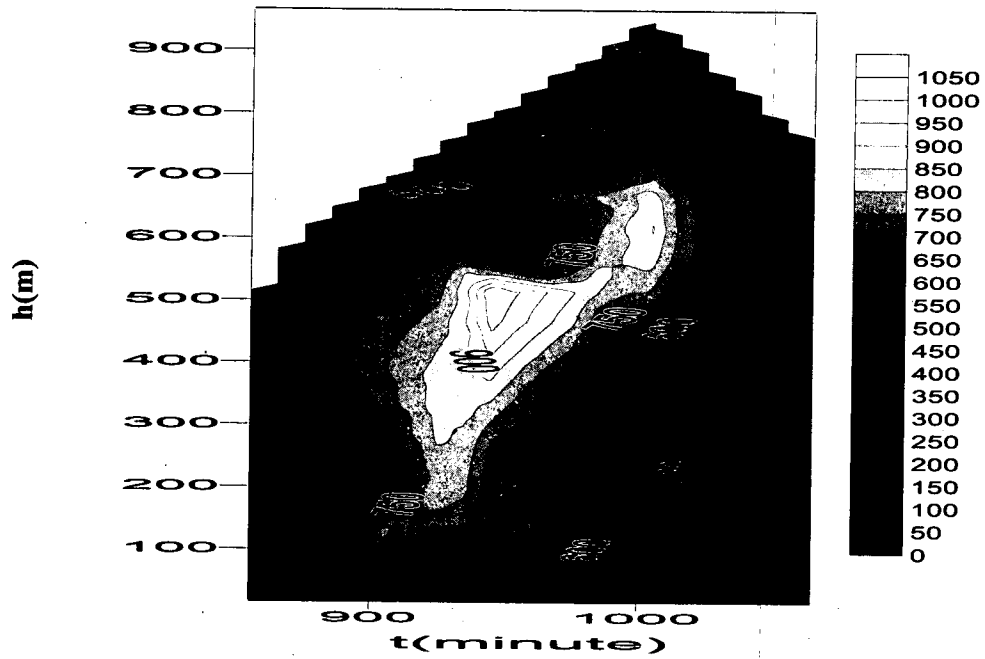
نزدیک سطح زمین بیشتر شمال غربی است و نسبت به ارتفاع، کمی در جهت پادساعت گرد می چرخد و دوباره شمال غربی می شود. در این شکل، ساختار، کمی پیچیده به نظر می رسد. در لحظه عبور جبهه، بیشترین تغییر در جهت باد مشاهده می شود. هنگامی که جهت باد از حدود  $360^\circ$  درجه به حدود صفر (یا برعکس) تغییر می یابد (انتقال صفر/ $360^\circ$  درجه)، در نمودار، گرادیان شدید پربندها دیده می شود.

در شکل ۱۵، مقادیر مثبت و منفی پربندهای هم مقدار  $w$ ، به ترتیب پیش و بعد از جبهه مشاهده می شود. اغلب این مقادیر  $w$  در زمان عبور جبهه، مثبت است که این می تواند به جریانهای بالارو جلوی جبهه مربوط باشد. در این نمودار نیز پربندهای کم تر از منهای  $40$  سانتی متر بر ثانیه در قسمت بالای  $650$  متری (که داده ها کم هستند)، دیده می شود. مثبت و منفی شدن  $w$ ، هنگام عبور جبهه در این نمودار نیز مشهود است که ممکن است مربوط به بالشتکهای ذکر شده در قسمت تفسیر تغییرات زمانی  $w$  باشد (ر.ک. به شکل ۷).

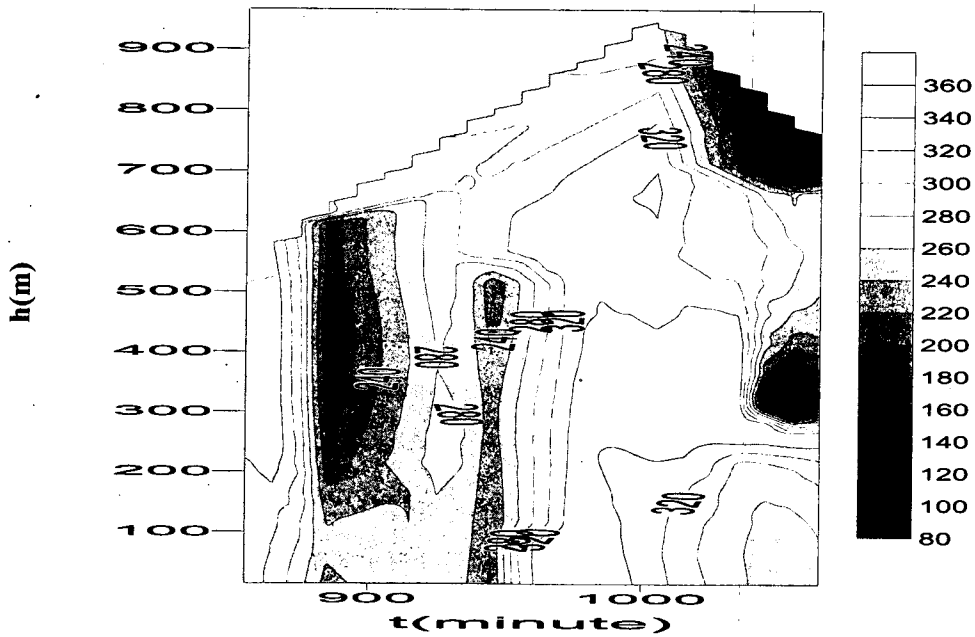
شکل ۱۳، پربندهای هم مقدار مؤلفه افقی باد را در حین عبور جریان جبهه ای نشان می دهد. منطقه جبهه ای به صورت ناحیه ای که تا ارتفاع زیاد کشیده شده، مشاهده می شود. البته باید توجه داشت که در داده های سودار گاهی مقادیر پارامترها به دلیل شرایط مختلف ایجادکننده صداهای جانبی اندازه گیری نشده است (برای مثال باد شدید باعث ایجاد نوفه به وسیله برگ درختها می شود و یا قطرات باران صدا ایجاد می کنند). این باعث می شود که پربندهای مورد نظر دقیق نباشند. با وجود این، به طور کلی نوار جبهه جستانک به خوبی در این شکل مشخص است، چون حالت های انتخابی دارای بهینه داده ها بوده اند. در این شکل مشاهده می شود که در سرعت های زیادتر، پربندها از هم دورتر (برش کم تر) و در قسمت تحتانی جریان جستانک، خطوط هم سرعت تقریباً موازی به نظر می رسد که این بی می تواند مربوط به افقی بودن جریان در این قسمت باشد.

در شکل ۱۴، پربندهای هم جهت رسم شده اند. همان طور که از این نمودار پیداست جریان جبهه ای در

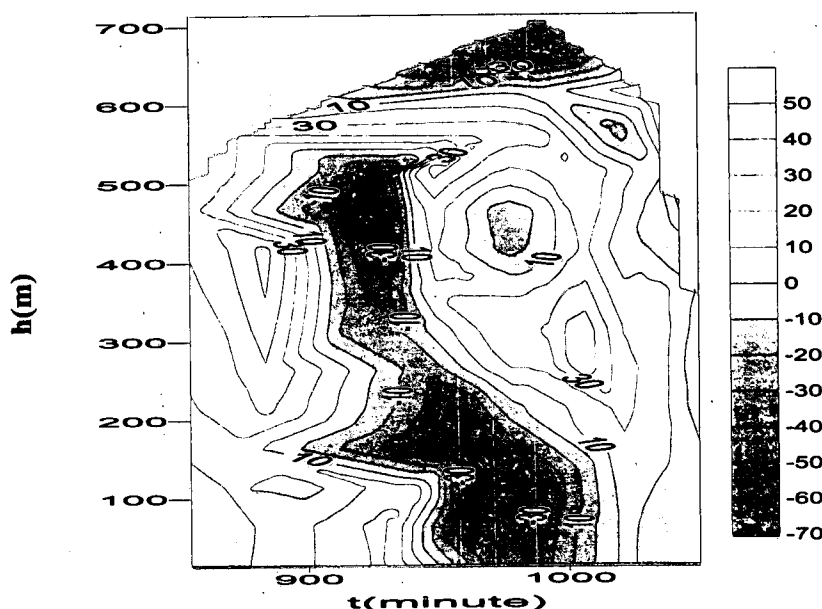




شکل ۱۳. پربندهای هم‌سرعت افقی (سانتی‌متر بر ثانیه). محور افقی، زمان برحسب دقیقه و محور قائم، ارتفاع بر حسب متر است (پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹).



شکل ۱۴. پربندهای هم‌جهت باد (درجه). محور افقی، زمان برحسب دقیقه و محور قائم، ارتفاع برحسب متر است (پدیده ۲۰۰۲/۴/۱۹).



شکل ۱۵. پربندهای هم‌سرعت قائم (سانتی‌متر بر ثانیه). محور افقی، زمان بر حسب دقیقه و محور قائم، ارتفاع بر حسب متر است (پدیده روز ۲۰۰۲/۴/۱۹).

باشند. در بیشتر آن‌ها حرکات فراهنج و فروهنج، معرف حرکات چرخه‌ای در جهت جبهه است. اطلاعات مربوط به ساختار قائم پدیده‌های مشابه دیگر در بیوک (۱۳۸۲) آمده است.

به‌طور کلی مطالعه پدیده‌های دیگر نیز ساختاری مشابه پدیده مورد بررسی در بالا نشان می‌دهد. البته تغییرات به‌صورت موردی دیده می‌شود که این نشانگر یکتایی آن مورد است. علاوه بر تأثیرگذاری شرایط سطحی، توفان‌های ایجادکننده آن‌ها نیز دارای تفاوت‌هایی هستند که نیاز به مطالعه بیشتر دارند. استفاده از رادار برای این منظور می‌تواند بسیار مفید باشد.

##### ۵ بحث

جبهه‌های جستانک از حالت بلوغ توفان‌های همرفتی چندیاخته‌ای یا ابریاخته‌ای ناشی می‌شوند. این جبهه‌ها اغلب به‌صورت چندتایی‌اند و به‌طور معمول در فصل بهار به‌دلیل همرفت‌های کومه‌ای، بیشتر از سایر فصل‌ها روی

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، به نظر می‌رسد اگر در یک روز دو پدیده جستانک رخ دهد، جهت حرکت پدیده دوم برعکس جهت حرکت جبهه پدیده اول است. در صورت وجود بالشتک‌ها، ساختارهای متفاوتی (از لحاظ تأثیر نوع ساختار بر میزان تغییرات پارامترهای هواشناختی) برای هر پدیده جستانک مشاهده می‌شود، زیرا بالشتک‌ها در اثر ناپایداری‌های دارای شدت مختلف ایجاد می‌شود و در ارتفاعات مختلفی پدید می‌آیند. به‌طور خلاصه می‌توان گفت هر پدیده از جریان‌های جستانک، دارای ویژگی خاص خود است و ضخامت جریان و شدت آن به شدت و جهت توفان مادر بستگی دارد. ناپایداری‌های چینی با شدت متفاوت می‌تواند در آن‌ها ایجاد ساختارهایی کند که اغلب به‌صورت یک یا دوتایی ظاهر می‌شوند. با توجه به توپوگرافی پیچیده و کوهستانی بودن منطقه، این ساختارها از نظر ابعاد و اندازه ممکن است نسبت به پدیده‌هایی که در مناطقی باز و هموار رخ می‌دهند، تنوع بیشتری داشته

بالای سر جبهه رخ می‌دهند که محدودیت اندازه‌گیری سودار، امکان بررسی بیشتر آن را نمی‌دهد. گوف (۱۹۷۶) که داده‌های مورد نیاز را از برج ۴۶۱ متری به دست آورده بود، به این نکته اشاره می‌کند که در ارتفاعات بالاتر از ۴۶۱ متر، حرکات قائم شدیدترند. هم‌چنین چاربا (۱۹۷۴) و اینترپری و همکاران (۱۹۹۰) از داده‌های برج اندازه‌گیری با ارتفاع کم‌تر از ۰/۵ کیلومتر استفاده کردند و حرکات قائم بیشینه را که در ارتفاعات بالاتر رخ می‌دهند، مشاهده نکردند، اما نظر گوف (۱۹۷۶) را تأیید نمودند. به نظر می‌رسد سر جبهه‌های جستانک منطقه تهران از نوع جریان مطالعه شده مارتتر (۱۹۹۶) پهن‌تر باشد؛ شاید توپوگرافی در این امر نقش داشته باشد. پیچک‌های تلاطمی با مقیاس کوچک نیز در پدیده مورد بررسی روز ۲۰۰۲/۴/۱۹ وجود دارند که البته با توجه به نحوه اندازه‌گیری سودار تا اندازه‌ای فیلتر می‌شوند. به نظر می‌رسد که با توجه به این که اغلب، تعداد مشخصی بالشتک (معمولاً دو) در هر پدیده، مشاهده شده، ناپایداری کلونین - هلمهولتز در ایجاد بالشتک‌هایی که در نمایه تغییرات زمانی سرعت قائم دیده می‌شود، نقش داشته باشد. نمونه اندازه افقی بالشتک‌های مشاهده شده در حد ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر است که مقدار آن از انواع مطالعه شده، بیشتر است. تغییرات جهت باد بیش از ۹۰ درجه از شرایط هم‌دید توفان همرفتی و جبهه جستانک است که در همه پدیده‌ها مشاهده می‌شود (جدول ۱). این تغییر جهت در زمانی که جبهه در حال رسیدن به بیشینه سرعت افقی است، به علت ساختار جبهه رخ می‌دهد. شارهای تلاطمی در همه پدیده‌ها نزدیک سطح زمین به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این موضوع در واقع مربوط به افزایش ناپایداری‌های چینی است. مطالعه موارد مختلف این جبهه‌ها، نشان‌دهنده این است که از نظر ابعاد و چگونگی ساختار قائم، هر کدام دارای ویژگی خاصی هستند. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌های انجام‌شده با سودار، در

می‌دهند. بیش از ۹۵ جبهه جستانک در منطقه تهران مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ بررسی شد که از میان آن‌ها ساختار قائم ۱۰ جبهه انتخاب شده است. در بین این ۱۰ مورد نیز تنها یک مورد به‌طور کامل بررسی شده است. ماهونی (۱۹۸۸) دریافت که متوسط سرعت بیشینه باد، تقریباً ۵۰٪ بیشتر از متوسط سرعت انتشار جبهه جستانک است که تا حدودی با داده‌های به دست آمده در اینجا هم‌خوانی دارد. بیشتر جبهه‌های جستانک تهران از سمت شمال و شمال غرب که به‌طور معمول در بعد از ظهر روی داده، وارد منطقه می‌شوند. البته در پدیده‌های مشابه در محیط‌های گرم و مرطوب، کاهش رطوبت نسبی نیز مشاهده شده است (مولر و کاربن، ۱۹۸۶). سرعت محاسبه شده جبهه‌های جستانک براساس سرعت جریان گرانی، با کمیت‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده، تا حد خوبی هم‌خوانی دارد.

نمایه قائم سرعت افقی جبهه جستانک روز ۲۰۰۲/۴/۱۹، قبل از رسیدن جبهه، دارای لایه‌های برشی متعددی است که با توجه به توپوگرافی، به ویژگی‌های سطح مربوط می‌شود. همان‌طور که در نمودارها مشهود است، بعد از عبور جبهه تا مدتی تغییرات زیادی مشاهده می‌شود که احتمالاً با حرکات تلاطمی دنباله (wake) آن ارتباط دارد. اطلاعات ما متوسط‌گیری داده‌ها در بازه زمانی ۱۵ دقیقه‌ای است و بنابراین جزئیات جریان فیلتر می‌شود، زیرا سودار امکان اندازه‌گیری کم‌تر از ۱۵ دقیقه را ندارد و هم‌چنین عمدتاً تا ارتفاع ۷۰۰ متر اندازه‌گیری می‌کند. در پدیده‌های مورد مطالعه ما، نمونه سرعت‌های قائم تا حدود ۰/۶ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود که مربوط به قسمت زیرین جریان جستانک است. البته میانگین‌گیری در دستگاه سودار، تغییرات شدیدتر را فیلتر می‌کند و سرعت‌های بزرگ‌تر (در محدوده ارتفاعی که سودار اندازه‌گیری می‌کند) ناخواسته حذف می‌شوند. سرعت‌های قائم با مقدار بیشتر در ارتفاع بالاتر حدوداً در

مطالعه شده دیگران پهن تر است. این موضوع شاید به دلیل وقوع آن‌ها در دامنه کوه‌های مرتفع باشد. چندجبهه‌ای بودن بعضی از آن‌ها (برای مثال دوتایی بودنشان) مربوط به بالشتک‌هایی است که جریان را تشکیل می‌دهند. در این مطالعه به دلیل محدودیت اندازه‌گیری دستگاه سودار، فقط قسمت زیرین برخی از این پدیده‌ها، بررسی شد.

در ادامه لازم است که با یک دستگاه سودار با برد بیشتر و قدرت نمونه‌برداری سریع‌تر، چندین نمونه از این جریان‌ها مطالعه شوند. البته استفاده از دستگاه‌های لیدار نیز برای مطالعه آن‌ها مفید خواهد بود. استفاده از داده‌های همزمان چند سامانه اندازه‌گیری در منطقه، به صورت شبکه‌ای نیز اطلاعات خوبی در مورد چگونگی تکامل آن‌ها به دست خواهد داد. برای مثال چگونگی تضعیف این پدیده‌ها را می‌توان با چند دستگاه که در مسیرشان قرار داده می‌شود، بررسی کرد. با توجه به اهمیت این جریان‌ها در مناطقی که فرودگاه احداث می‌شود، لازم است مطالعات مشابهی انجام شود.

#### منابع

بیوک، ن.، ۱۳۸۲، ساختار قائم جریان‌های جستانک ناشی از توفان‌های همرفتی در منطقه تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

بیدختی، ع.ع.، ۱۳۸۳، مبانی دینامیک شاره‌ها، انتشارات دانشگاه تهران.

بیدختی، ع.ع. و مالکی‌فرد، ف.، ۱۳۸۱، دستگاه سودار (مدل PAI) مؤسسه ژئوفیزیک، گزارش علمی شماره ۸۲، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

رنجبر، ع.ع.، ۱۳۷۶، مدلی فیزیکی برای جریان‌های جبهه جستی منطقه تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Atkinson, B. W., 1981, Meso scale atmospheric circulations, Academic Press, New York.

مقایسه با وسایل اندازه‌گیری از راه دور دیگر از تفکیک قائم بهتری برخوردار است. به‌علاوه از آنجایی که داده‌های سودار، اندازه‌گیری‌های مستقیم داپلر هستند، در مقایسه با روش تخمین باد افقی در ارتفاعات پایین، سرعت‌های قائم دقیق‌تری به دست می‌آیند. به دلیل زیاد بودن اطلاعات مربوط به ۱۰ مورد، فقط یک مورد آورده شده، ولی برخی مشخصه‌های پدیده‌های دیگر در جدول ۱ آمده است.

#### ۶ نتیجه‌گیری

تغییرات پارامترهای هواشناختی جریان‌های جبهه‌ای جستانک مربوط به برون‌شارش توفان‌های همرفتی منطقه تهران دارای افزایش فشار تا ۲/۵ mb، کاهش دما تا ۵ درجه، افزایش رطوبت بالای ۲۰٪، متوسط سرعت انتشار جبهه جستانک  $9/9 \text{ ms}^{-1}$ ، متوسط عمق برون‌شارش  $1/6 \text{ km}$  و متوسط سرعت بیشینه باد  $15 \text{ ms}^{-1}$  است. در هنگام عبور جبهه جستانک در دماغه جبهه، بیشترین مقدار سرعت افقی مشاهده می‌شود و سرعت قائم باد به کم‌ترین جهت باد، به‌خوبی نشان دهنده جریان جبهه جستانک است.

تغییرات نوسانی نمایه‌های قائم، چینش باد را به‌ویژه بعد از رسیدن جبهه، آشکارا نشان می‌دهند. این امر به‌صورت چینش‌های متعدد در جریان جبهه‌ای ظاهر می‌شود. چینش‌های محاسبه‌شده، از نظر مقدار نسبتاً زیادند (حدود  $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ، جدول ۲) که می‌تواند برای حرکت هواپیما به‌ویژه هنگام بلندشدن از سطح زمین خطرناک باشد.

ساختار قائم جریان‌های جستانک مطالعه شده (قسمت‌های زیرین آن‌ها)، نشان‌دهنده مراکز بسته پرنده‌های هم‌سرعت است. پهنه سر جریان‌های بررسی شده، به‌طور نمونه حدود ۲۰ کیلومتر است که از نمونه‌های

- Bidokhti, A. A., and Ranjbar, A., 1997, Physical simulation of thunderstorm gust fronts: Proceedings of Seventh ACFM., Madras, India., 1, 83-86.
- Bidokhti, A. A., and Bani-Hashem, T., 2001, Structure of thunderstorm gust fronts with topographic effect: *Adv. in Atm. Sci.*, **18**, 1161-1174.
- Charba, J., 1974, Application of gravity current model to analysis of a squall-line gust front: *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 140-156.
- Cotton, W. R., and Anthes, R. A., 1989, Storm and cloud dynamics, Academic Press, New York
- Goff, R. C., 1976, Vertical structure of thunderstorm out flows: *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1429-1440.
- Intrieri, J. M., Bedard, A. J., and Hardesty, R. M., 1990, Details of colliding thunderstorm outflows as observed by Doppler lidar: *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1081-1098.
- Manasseh, R., and Middleton, J. H., 1995, Boundary layer oscillations from thunderstorms at Sydney airport: *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1166-1177.
- Mahoney, W. P., 1988, Gust front characteristics and the kinematics associated with interacting thunderstorm outflows: *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1474-1491.
- Martner, E., 1996, Vertical velocities in a thunderstorm gust front: *J. Applied Meteorology*, **36**, 616-622.
- Monti, P., Fernando, H. J. S., Princevac, M., Chan, W. C., Kowalewski, T. A., and Pardyjak, E. R., 2002, Observations of flow and turbulence in the nocturnal boundary layer over a slope: *J. Atmos. Sci.* **59**, 17, 2513-2534.
- Muller, C. K., and Carbone R. E., 1987, Dynamics of thunderstorm outflows: *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1878-1898.
- Roach, W. T. R., 1976, On the effect of radiative exchange on the growth by condensation of a cloud or fog droplet: *Q. J. Meteorol. Soc.*, **102**, 361-367.
- Simpson, J. E., 1986, Gravity currents in environment and laboratory, John Wiley and Sons: Cambridge University Press, (UK), 244 pp.
- Turner, J. S., 1973, Buoyancy effects in fluids: Cambridge University Press. 368 pp.
- Wakimoto, R. M., 1982, The life cycle of thunderstorm gust fronts: *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1060-1082.