

نتایج اجرای عملیاتی تحلیل عینی به روش کرسمن

مجید آزادی*، فاطمه داوری عدالت پناه**، پرویز رضازاده**، ابراهیم میرزایی** و غلامعلی وکیلی*

*پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران- صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۹۶۵

**سازمان هواشناسی کشور، تهران- صندوق پستی ۱۳۱۸۵-۴۶۱

(دریافت مقاله: ۸۲/۷/۶، پذیرش مقاله: ۸۳/۹/۱۰)

چکیده

در این مقاله تلاش می‌شود تا ضمن مرور کلی مفهوم تحلیل عینی و ارائه فرمول‌بندی تحلیل عینی به روش کرسمن، نتایج مقدماتی اجرای عملیاتی آن برای چند حالت موردی با تحلیل ذهنی که در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی کشور به انجام رسیده است، مقایسه شود. هم‌چنین تاثیر تغییرات ضرایب تجربی و نیز گام‌های تکرار تصحیحات متوالی در خروجی تحلیل، بررسی و مقایسه می‌شود. این مطالعه برای چند مورد مربوط به نقشه‌های فشاری سطح زمین و نیز نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال صورت گرفته است. تحلیل‌ها مربوط به ساعت ۱۲۰۰ به وقت GMT و داده‌های زمینه از نتایج یک کد عددی است که با تفکیک ۵ درجه در افق گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای تحلیل میدان فشار سطح دریا می‌توان از داده‌های درون‌یابی شده کدهای گرید با تفکیک ۲/۵ درجه به‌صورت میدان زمینه با ۵ گام تکرار و شعاع مؤثر اولیه تقریباً ۱۰ برابر اندازه یک درجه طول یا عرض جغرافیایی (۱۲۵۰ کیلومتر) استفاده کرد. هم‌چنین در تحلیل میدان ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال داده‌های با تفکیک ۵ درجه با ۵ گام تکرار مناسب است. در این‌جا اندازه شعاع مؤثر اولیه تقریباً ۲۰ برابر یک درجه طول یا عرض جغرافیایی (۲۵۰۰ کیلومتر) فرض شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل ذهنی، تحلیل عینی، آغازگری داده‌ها، داده‌های زمینه

۱ مقدمه

منظم روزانه) مربوط به جو واقعی انجام شود. (بنگتسون و همکاران، ۱۹۸۱).

در عمل داده‌های تک زمانی که توانایی به‌هنگام کردن محاسبات پیش‌بینی عددی وضع هوا را داشته باشند، به صورت کامل و صحیح موجود نیست و در نتیجه با استفاده از داده‌های موجود نمی‌توان به توصیف دقیقی از جو دست یافت. بنابراین هر طرح‌واره پیش‌بینی عددی وضع هوا در زمانی مانند $t = 0$ باید با استفاده از ترکیب آخرین مشاهدات با میدان‌هایی که بر اساس مشاهدات قبلی ($t \leq 0$) تخمین زده شده‌اند، اصطلاحاً "آغازگری" شود. این فرایند همراه با فرایند دیگری موسوم به "تحلیل عینی" مجموعاً فرایند ضروری و بنیادینی را برای حل مدل‌های عددی تشکیل می‌دهند که "جذب داده‌ها" نام دارد (هالتینر و ویلیامز، ۱۹۸۰). به‌طورکلی هر مرکز پیش‌بینی عددی به صورت موازی، دو فرایند زیر را به

فرایند پیش‌بینی عددی وضع هوا به طور کلاسیک به صورت یک "مساله مقدار اولیه" مطرح می‌شود که در آن از معادلات حاکم بر دینامیک شاره‌های ژئوفیزیکی با استفاده از مقادیر اولیه کاملاً معین و تعریف شده، نسبت به زمان انتگرال‌گیری می‌شود. ویژگی‌های ریاضی-محاسباتی این معادلات (به‌ویژه برای جو) و نیز پیچیدگی‌های حاصل از فرایندهای انرژی‌تیک جو، حل این "مساله مقدار اولیه" را بسیار پیچیده می‌کند، به ویژه که پس از طی همه دشواری‌های مربوط به مدل‌سازی عددی رفتارهای فیزیکی این شاره‌ها، انتگرال‌گیری معادلات گسسته شده در فضا و زمان فقط نیمی از کل کار است و نیمه دیگر مربوط به تعیین مقادیر اولیه کمیت‌های فیزیکی، به شدت وابسته به زمان است و وضعیت مدل جوی با معادلات عددی گسسته را تعیین می‌کنند. این کار مسلماً باید به نحوی با استفاده از داده‌های دیدبانی (مشاهدات

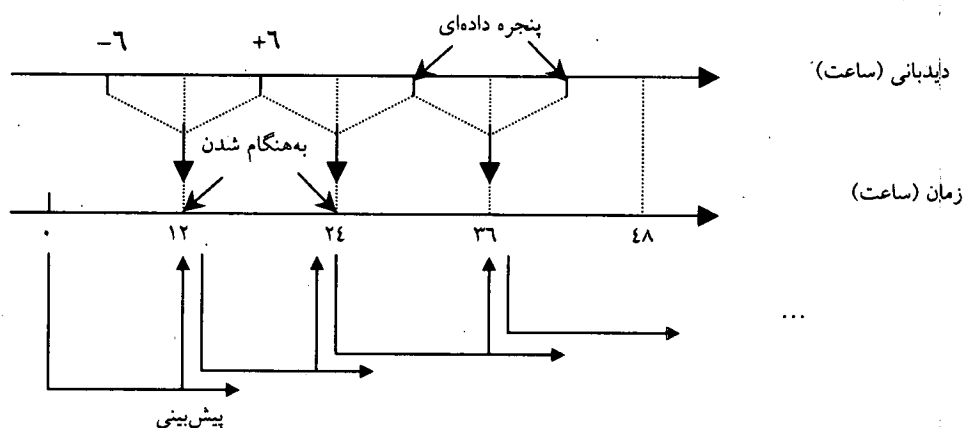
انجام می‌رساند:

۱- پیش‌بینی عددی وضع هوا از لحظه مشخصی از زمان (زمان آغاز مدل)، برای Δt ثانیه بعد.

۲- جذب چهاربعدهای داده‌های ورودی به منظور تخمین صحیح‌تر حالت جو در لحظه مشخص بعدی که طی آن پیش‌بینی باید صادر شود (شکل ۱).

در فرایند تحلیل عینی، همه داده‌های مربوط به شبکه نامنظم ایستگاه‌ها، برای زمان مفروض، اولاً از نظر صحت، بررسی و کنترل کیفی و سپس با استفاده از یک طرح واره مناسب برای نقاط شبکه‌ای منظم، در ترازهای فشاری استاندارد درون‌یابی می‌شوند. اما مقادیری که برای نقاط شبکه‌ای به دست می‌آید، هنوز دارای نوفه‌هایی هستند که احتمالاً منجر به پیدایش امواج گرانی با دامنه بزرگ می‌شوند. به همین دلیل در فرایند دیگری (آغازگری داده‌ها) داده‌های حاصل از فرایند تحلیل عینی به گونه‌ای تعدیل می‌شوند که تا حد امکان دامنه این امواج کمینه شود (هولتون، ۱۹۹۲). تحلیل عبارت است از تولید تصویری دقیق از وضعیت واقعی جو در زمانی مشخص که در یک مدل عددی به صورت مجموعه‌ای از اعداد دیده می‌شود. تحلیل یک ابزار جامع و خودسازگار برای

فرایابی جو نیز به شمار می‌رود، بدین معنی که داده‌های دیدبانی شده، همراه هم، در معادلات مدل صدق نمی‌کنند ولی مجموعه داده‌های تحلیل شده در معادلات مدل - مثلاً معادلات بسط - صادق و در اصطلاح با یکدیگر سازگارند. هم‌چنین از داده‌های تحلیل شده می‌توان برای ورودی عملیاتی دیگر مثلاً آغاز یک مدل پیش‌بینی عددی - استفاده کرد یا آن‌ها را به صورت معیاری برای سنجش کیفیت داده‌ها به کار برد (بوتیه و کورتیر، ۱۹۹۹). اطلاعات اولیه‌ای که برای تولید تحلیل استفاده می‌شود، مجموعه‌ای از مقادیر مشاهده‌ای است که از دیدبانی‌های واقعی به دست می‌آید. اگر تعداد این مشاهدات به اندازه کافی باشد، آن گاه وضعیت مدل کاملاً مشخص است و مساله تحلیل به "درون‌یابی" خلاصه می‌شود. در عمل، به دلیل پراکندگی زیاد ایستگاه‌ها، وضعیت تحلیل "نامشخص" است. در این موارد برای "خوش وضع کردن مساله"، ضروری است تا بر تعدادی از "اطلاعات زمینه" به مثابه "تخمینی از وضعیت اولیه" مدل تکیه کرد. داده‌های زمینه را می‌توان از آمارهای اقلیمی یا از خروجی یک تحلیل قبلی (با فرض سازگار ماندن وضعیت مدل با زمان) تولید و استفاده کرد.



شکل ۱. چرخه عملیاتی فرایند صدور پیش‌بینی عددی وضع هوا در یک مرکز خدمات آب و هوایی که در آن فرایند جذب داده‌ها و ترکیب آن با عملیات پیش‌بینی عددی نشان داده شده است (دموسکا و باری، ۱۹۹۱).

تنظیم نظیر تفکیک افقی داده‌های میدان زمینه و شعاع مؤثر به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که نتایج حاصل از نظر عملیاتی قابل قبول است. هم‌چنین ارتباط بین برنامه‌های مختلف یک سامانه کامل برای تحلیل نقشه‌ها، از مرحله رمزگشایی تا مرحله تهیه نقشه‌ها، به صورت فایل‌های گرافیکی مناسب برای کارهای عملیاتی صورت پذیرفته است.

۳ مبانی نظری

تحلیل عینی متغیرهای هواشناسی، اولین بار به طور جدی در انستیتوی علوم پیشرفته پرینستن از سوی گروهی غیر رسمی متشکل از جان فون نیومن، ژول چارنی، ژوزف اسماگورینسکی و جرج پلاتزمن و دیگر همکاران در اواخر دهه ۱۹۴۰ و اوایل دهه ۱۹۵۰ به بحث گذاشته شد. روش تحلیلی که با توجه به رایانه‌های ابتدایی آن زمان مناسب به نظر می‌رسید، روش برازش چندجمله‌ای بود (دالی، ۱۹۹۱). از جمله در اوایل سال ۱۹۴۹، کیبل میدان کمیت‌های نرده‌ای فشار و دما را در شبکه‌ای مربعی حاوی ۲۵ نقطه، از طریق چند جمله‌ای‌های درجه ۲ و ۳ بر اساس روش کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا محاسبه کرد (حیبی، ۱۳۷۰). همزمان پانوفسکی به مطالعاتی در همین زمینه پرداخت. شایان ذکر است که این روش روی مرزهای شبکه با مشکل مواجه می‌شود و در نتیجه نتایج را باید به طور مرتب هموار کرد. این هموارسازی خطای نسبتاً بزرگی در نتیجه کلی فرایند تحلیل عینی به وجود می‌آورد. هم‌چنین این روش برای مناطقی با پراکندگی زیاد داده‌ای مناسب نیست. بروز ناپایداری محاسباتی در هنگام وارون کردن ماتریس با ابعاد بزرگ و حجم زیاد محاسبات از دیگر معایب این روش است. مجموعه این عوامل سبب شد که پس از ارائه طرح‌واره‌های درون‌یابی توسط کرسمن (۱۹۵۹) و بارنز (۱۹۶۴) و نیز روش‌های درون‌یابی آماری، روش برازش چندجمله‌ای خیلی زود کنار گذاشته شود. با این حال امروزه با پیشرفت‌هایی که

۲ سابقه پژوهش در ایران

در ایران، مطالعات تحلیل عینی و آغازگری از حدود یک دهه پیش به صورت محدود صورت گرفته است. از میان کارهای انجام شده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- پایان‌نامه کارشناسی ارشد حیبی (۱۳۷۰) با عنوان "تحلیل عینی و محاسبه تابع جریان". در این مطالعه بیشتر از نرم‌افزار GEO-EAS و روش کریجینگ در تحلیل عینی استفاده شده و متاسفانه نتایج کار با تحلیل ذهنی (آنالیز دستی) که به طور روزمره در مرکز پیش‌بینی سازمان صورت می‌گیرد، به طور دقیق مقایسه و ارزیابی نشده است.

- "انجام تحلیل عینی با روش‌های کریجینگ و بارنز به صورت یک‌متغیره و ایجاد نرم‌افزارهای گرافیکی برای ترسیم بردارها و خطوط پربندی در مختصات دکارتی". این مطالعه را محب‌الحججه (۳-۱۳۷۲) در سازمان هواشناسی کشور به انجام رسانده است و علی‌رغم آغاز اجرای عملیاتی آن در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی کشور، متاسفانه پس از مدت کوتاهی رها شده است. شرح کامل این مطالعه به صورت مستند در دسترس نیست. - مطالعه‌ای که اصفهانیان و همکاران (۱۳۸۰) برای تبدیل داده‌های ایستگاهی (سینوپتیک و جو بالا) به نقاط شبکه به انجام رسانده‌اند و در آن ضمن استفاده از روش کرسمن، نتایج این روش را با روش کریجینگ مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در سطح زمین به علت چگالی نسبتاً زیاد داده‌ها، بین این دو روش تطابق خوبی هست ولی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال به دلیل فقدان داده، چنین تطابقی وجود ندارد. این مطالعه در همین حد متوقف شده و تلاشی برای عملیاتی کردن آن به عمل نیامده است.

- کارهای نظری دیگر، نظیر مطالعه‌ای که دهملابی (۱۳۸۰) انجام داده است.

ویژگی اصلی کار حاضر و تفاوت آن با کارهای گذشته این است که در این کار همه پارامترهای قابل

در زمینه‌های مختلف علوم رایانه‌ای حاصل شده، روش‌های پیشرفته این رهیافت، بار دیگر مورد توجه قرار گرفته است. روش تصحیحات متوالی نخستین بار از سوی دوس و برگترسون (۱۹۵۵) مطرح شد. در این روش، از تحلیل فضایی کاملاً متفاوتی با آنچه قبلاً پانوفسکی و دیگران در روش برازش چند جمله‌ای ارائه کرده بودند، استفاده می‌شد. چهار سال بعد در ۱۹۵۹، کرسمن این روش را به صورت کاربردی و عملیاتی توسعه داد و نتایج آن در مقاله‌ای منتشر ساخت (کرسمن، ۱۹۵۹). در طرح‌واره کرسمن از مجموع وزنی-خطی تفاوت داده‌های دیدبانی شده و میدان زمینه روی ایستگاه‌ها برای بهبود میدان حدس اولیه استفاده می‌شود. هم‌چنین ناحیه‌ای با شعاع مؤثر در اطراف هر نقطه شبکه‌ای در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲).

برای هر نقطه ایستگاهی، یک داده دیدبانی شده همراه با یک داده محاسبه شده از میدان زمینه‌ای که به صورت اختیاری در ابتدا به نقاط شبکه‌ای نسبت داده می‌شود وجود دارد. در مطالعه حاضر از داده‌های پیش‌یابی مدل عددی مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت وضع

در زمینه‌های مختلف علوم رایانه‌ای حاصل شده، روش‌های پیشرفته این رهیافت، بار دیگر مورد توجه قرار گرفته است. روش تصحیحات متوالی نخستین بار از سوی دوس و برگترسون (۱۹۵۵) مطرح شد. در این روش، از تحلیل فضایی کاملاً متفاوتی با آنچه قبلاً پانوفسکی و دیگران در روش برازش چند جمله‌ای ارائه کرده بودند، استفاده می‌شد. چهار سال بعد در ۱۹۵۹، کرسمن این روش را به صورت کاربردی و عملیاتی توسعه داد و نتایج آن در مقاله‌ای منتشر ساخت (کرسمن، ۱۹۵۹). در طرح‌واره کرسمن از مجموع وزنی-خطی تفاوت داده‌های دیدبانی شده و میدان زمینه روی ایستگاه‌ها برای بهبود میدان حدس اولیه استفاده می‌شود. هم‌چنین ناحیه‌ای با شعاع مؤثر در اطراف هر نقطه شبکه‌ای در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲).

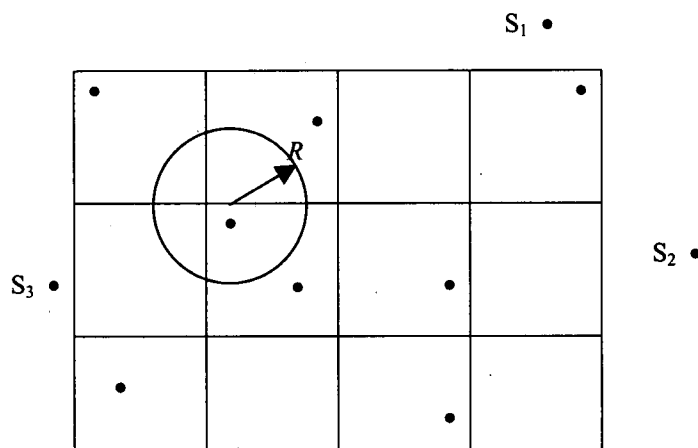
برای هر نقطه ایستگاهی، یک داده دیدبانی شده همراه با یک داده محاسبه شده از میدان زمینه‌ای که به صورت اختیاری در ابتدا به نقاط شبکه‌ای نسبت داده می‌شود وجود دارد. در مطالعه حاضر از داده‌های پیش‌یابی مدل عددی مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت وضع

$$Z_{gs}^{(v)} = \sum_{i=1}^{I+1} \sum_{j=1}^{J+1} V_{ij} Z_{gij}^{(v)} \quad (1)$$

که I و J به ترتیب نشان‌دهنده تعداد نقاط شبکه‌ای در راستای مداری و نصف‌النهاری‌اند. تابع وزنی (V) برای هر نقطه شبکه با استفاده از رابطه درون‌یابی لاگرانژ به روش زیر قابل محاسبه است (کریشنامورتی و بونوا، ۱۹۹۶):

$$V_{ij} = \prod_{k=1}^{I+1} \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)} \prod_{h=1}^{J+1} \frac{(y - y_h)}{(y_j - y_h)} \quad (2)$$

که x و y به ترتیب مکان نقاط شبکه‌ای و داده‌ای هستند.



شکل ۲. پراکندگی ایستگاه‌های فرضی در داخل شبکه منظم کاملاً غیرهمگن است. R شعاع ناحیه مؤثر است.

$$C_{ij}^{(v+1)} = \frac{\sum_s W_s^{(v)} E_s^{(v)}}{\sum_s W_s^{(v)}} \quad (7)$$

و تابع وزنی $W_s^{(v)}$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_s^{(v)} = W_{ij}^{(v)} \beta \gamma \quad (8)$$

که در آن β تابع زمانی- وزنی است و مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = e^{-\alpha (\Delta t)^2} \quad (9)$$

و γ ضریبی است که به روش ذهنی برای تعیین مقدار تاثیر وزنی هر یک از دیدبانی‌ها تعریف می‌شود. بر اساس مطالعه تریپولی و کریشنامورتی (۱۹۷۵) مقدار ضریب α به گونه‌ای انتخاب می‌شود که اگر گام زمانی دیدبانی‌ها ۴۸ ساعت باشد، $\beta = 0.1$ شود. هم‌چنین عاملی هموارساز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{S} = \frac{R-d}{C_g} \quad (10)$$

و C_g مرکز ثقل ناحیه مؤثر و به‌طور تخمینی برابر است با:

$$C_g = \frac{R}{2} \quad (11)$$

به این ترتیب مقدار Z_{gij} برای گام بعدی برابر می‌شود با:

$$Z_{gij}^{(v+1)} = Z_{gij}^{(v)} + \bar{S} C_{ij}^{(v+1)} \quad (12)$$

این فرایند را می‌توان تا کوچک شدن مقدار $E_s^{(v)}$ تا مقدار معین ادامه داد. در عمل تجربه نشان داده که برای رسیدن به نتایج قابل قبول، حدود پنج بار تکرار کافی است. در این مطالعه، تاثیر تعداد گام‌های تکرار در کیفیت نتایج نیز بررسی شده است. هم‌چنین می‌توان خطای نتایج را با روش‌های آماری بررسی کرد. از طرفی نتایج نهایی را می‌توان هموار کرد. با توسعه روش کرسمن در مورد کمیت‌هایی مانند میدان باد، علاوه بر تندی، میدان برداری آن را نیز می‌توان به صورت مؤلفه‌ای مطالعه کرد.

بررسی‌ها نشان داده است که در این‌جا نوع قطعه‌ای- دوخطی این درون‌یابی، نتایج بهتری در بر دارد که در آن مقدار حدس اولیه در ایستگاه با استفاده از حدس اولیه در چهار نقطه اطراف محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، در رابطه (۲)، $I=J=1$ اختیار شده است. برای ایستگاه‌های خارج از مجموعه خانه‌های شبکه‌ای (مانند S_1, S_2 و S_3 در شکل ۲)، مقدار برون‌یابی شده حاصل از میدان زمینه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z_{gs}^{(v)} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M W_{ij} Z_{gij}^{(v)}}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M W_{ij}} \quad (3)$$

در مطالعه تریپولی و کریشنامورتی (۱۹۷۵)، تابع وزنی بر اساس مقاله کرسمن (۱۹۵۹) و به صورت زیر استفاده شده است:

$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{R^2 - d^2}{R^2 + d^2} & \text{و } d < R \\ 0 & \text{و } d \geq R \end{cases} \quad (4)$$

که در آن R شعاع ناحیه مؤثر و d فاصله نقطه شبکه‌ای تا ایستگاه است:

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (5)$$

اختلاف بین مقدار دیدبانی متغیر مورد نظر (Z_s) و مقدار درون‌یابی شده آن (Z_{gs})، در ایستگاه مورد نظر برای تکرار v -ام برابر است با:

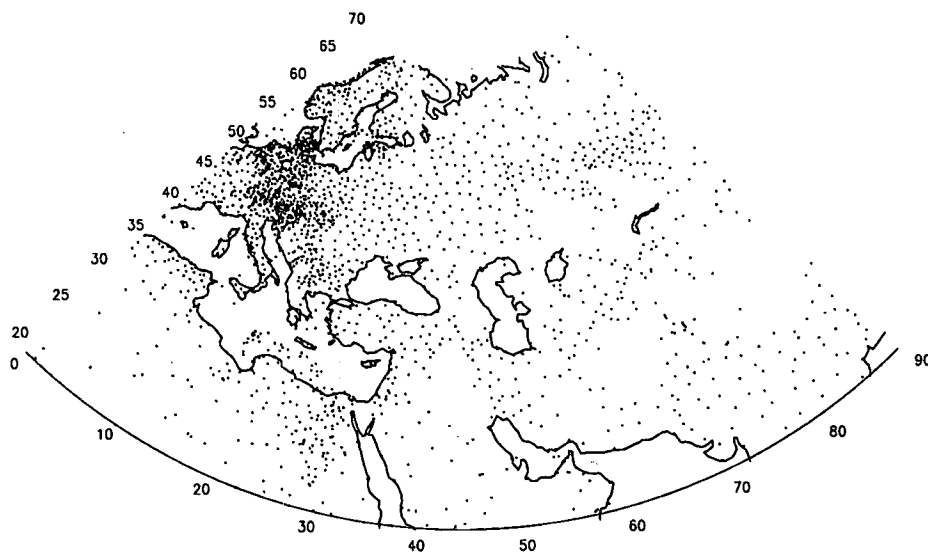
$$E_s^{(v)} = Z_s^{(v)} - Z_{gs}^{(v)} \quad (6)$$

این مقدار E_s برای تصحیح مقدار متغیر مورد نظر در نقطه شبکه‌ای همسایه و در گام $v+1$ ام به کار می‌رود. ضریب تصحیح با رابطه زیر تعریف می‌شود:

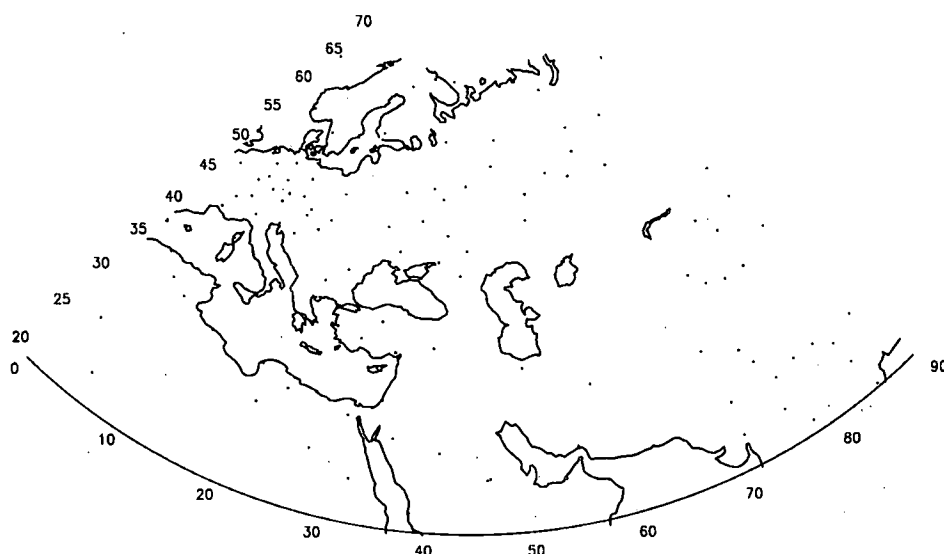
۴ روش کار

گريد همان خروجی مدل عملیاتی مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت وضع هواست که به صورت منظم برای مراکز ملی هواشناسی کشورها ارسال می‌شود. شکل‌های (۳) و (۴) منطقه مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌ها را نشان می‌دهند.

ناحیه مورد مطالعه شامل منطقه ایران و بین ۰ تا ۹۰ درجه طول جغرافیایی شرقی و ۲۰ تا ۷۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی است. گام شبکه‌ای در هر راستا ۲/۵ درجه و از کدهای آگرید در ساعت 1200 GMT به صورت میدان زمینه استفاده شده است. شایان ذکر است که کدهای



شکل ۳. منطقه مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌ها در سطح زمین.



شکل ۴. منطقه مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌های جو بالا.

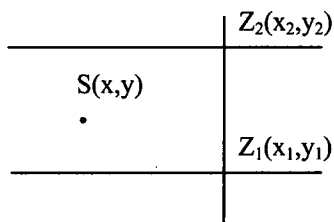
$$Z_{gs} = XYZ_3 + (1-X)YZ_4 + X(1-Y)Z_2 + (1-X)(1-Y)Z_1 \quad (14)$$

ب- ایستگاه‌های واقع در مناطق (۲)، (۳)، (۴)، (۵):
 برای این نوع ایستگاه‌ها که فقط از یک طرف به دو داده شبکه‌ای مربوط می‌شوند (شکل ۷)، مقدار X_{gs} به روش زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{gs} = \frac{W_1 Z_1 + W_2 Z_2}{W_1 + W_2} \quad (15)$$

$$W_i = \frac{R^2 - d_i^2}{R^2 + d_i^2} \quad , \quad i=1,2 \quad (16)$$

که در آن W تابع وزنی، R شعاع ناحیه مؤثر و d_i فاصله ایستگاه از نقاط شبکه است.



شکل ۷. موقعیت ایستگاه نمونه S واقع در یکی از مناطق (۲)، (۳)، (۴) و (۵) از شبکه منظم.

برای یافتن فاصله d_i بین دو نقطه (ϕ_1, λ_1, I_1) و (ϕ_2, λ_2, I_2) در مختصات قطبی، ابتدا مختصات دکارتی آن نقاط یعنی (x_1, y_1, z_1) و (x_2, y_2, z_2) محاسبه و سپس حاصل ضرب داخلی دو بردار مکان مربوط به نقاط مذکور محاسبه می‌شود. در نتیجه به کمک رابطه زیر، زاویه θ بین دو بردار مکان محاسبه می‌شود:

$$\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2 = I_1 I_2 \cos \theta$$

که \vec{I}_1 و \vec{I}_2 بردار مکان نقاط یاد شده و I_1 و I_2 اندازه هر یک از این دو بردار و برابر شعاع زمین است. با داشتن

با توجه به این که دقت تفکیک کدهای شبکه ۵ درجه است، ابتدا با استفاده از روش درون‌یابی قطعه‌ای-دوخطی، میدان زمینه برای شبکه‌ای با گام ۲/۵ درجه درون‌یابی و محاسبه می‌شود. سپس با خواندن اطلاعات دیدبانی شده هر ایستگاه (Z_s) و با استفاده از میدان زمینه، مقدار Z_{gs} محاسبه می‌شود. به این منظور لازم است مکان هر ایستگاه در شبکه منظم مشخص شود که بسته به موقعیت ایستگاه در شبکه مفروض، ۹ حالت ممکن است اتفاق افتد (شکل ۵).

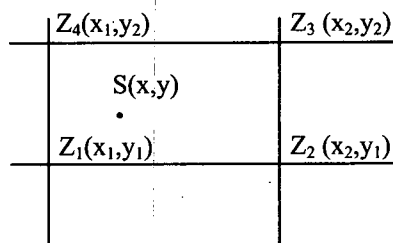
7				3	6
4		1			2
				5	9

شکل ۵. بسته به موقعیت ایستگاه در شبکه منظم، مکان آن در یکی از خانه‌های ۹ گانه فوق قرار می‌گیرد.

حال با توجه به این که ایستگاه مورد نظر در کدام یک از ۹ منطقه قرار گیرد، عملیات درون‌یابی به روش زیر صورت می‌گیرد.

الف- ایستگاه‌های واقع در منطقه (۱)

مطابق شکل (۶) هر یک از این نوع ایستگاه‌ها در میان چهار داده شبکه‌ای قرار دارد و مقدار Z_{gs} از روابط زیر محاسبه می‌شود (کریشنامورتی و بونوا، ۱۹۹۶):



شکل ۶. موقعیت ایستگاه نمونه S واقع در منطقه (۱) از شبکه منظم شکل ۵.

$$Y = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad , \quad X = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (13)$$

مورد شکل آن بسیار مشکل است. البته از امتیازات عمده روش تصحیحات متوالی (SCM) این است که تابع وزنی را بعد از هر بار تکرار می‌توان تغییر داد. این کار در عمل بدون تغییر شکل ریاضی تابع وزنی و صرفاً با کوچک کردن مقدار شعاع مؤثر در هر بار فرایند تکرار، صورت می‌گیرد. به این ترتیب در اولین تکرار، مقدار بزرگ‌تر شعاع مؤثر R سبب همگرایی سریع‌تر پدیده‌های با طول موج بزرگ‌تر و سرکوبی پدیده‌های کوچک‌مقیاس‌تر می‌شود. با کاهش مرحله به مرحله شعاع مؤثر در تکرارهای بعدی، این امر به‌طور مجازی دیگر تاثیر عمده‌ای روی پدیده‌های بزرگ‌مقیاس ندارد (زیرا پیش از آن همگرا شده‌اند) ولی منجر به همگرایی سریع‌تر ویژگی‌های مربوط به پدیده‌های کوچک‌مقیاس‌تر می‌شود (دالی، ۱۹۹۱).

شکلی از تابع وزنی که در رابطه (۴) به آن اشاره شد، توسط کرسمن (۱۹۵۹) پیشنهاد شد و در حکم یک تابع وزنی قابل قبول در مطالعات دیگر نیز از آن استفاده شده است. از جمله انواع دیگر توابع وزنی به موارد زیر می‌توان اشاره کرد (WMO، ۱۹۹۳):

$$W = \exp\left(\frac{-d^2}{2R^2}\right) \quad \text{و} \quad W = \alpha e^{-\beta d^2}$$

$$W = \frac{\alpha}{\beta + \gamma d^4} \quad (19)$$

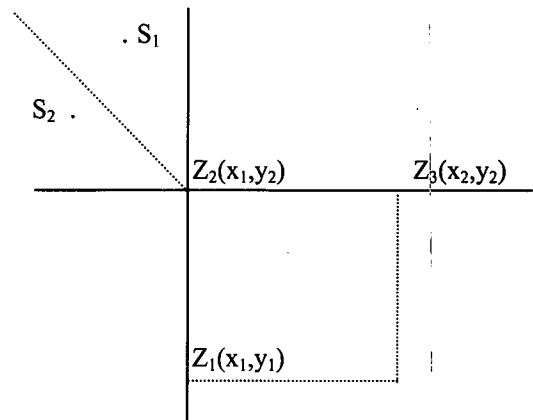
که α ، β و γ مقادیری تجربی‌اند.

در پژوهش حاضر، پس از آزمودن توابع وزنی مختلف و مقایسه نتایج تحلیل عینی با تحلیل ذهنی، به نظر می‌رسد که با توجه به تعداد کم ایستگاه‌ها، تغییر شکل تابع وزنی و نیز تغییرات α ، β و γ تاثیر چندانی در نتایج تحلیل ندارد و احتمالاً همان شکل تابع وزنی که کرسمن (۱۹۵۹) و تریپولی و کریشنامورتی (۱۹۷۵) از آن استفاده کرده‌اند، مناسب‌تر است. شایان ذکر است که پاسخ طیفی طرح‌واره درون‌یابی تحلیل عینی - به ویژه پس از یک بار

زاویه θ و شعاع میانگین کره زمین (R_e)، اندازه کمان بین دو نقطه که همان فاصله بین دو نقطه است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d = R_e \theta$$

ج- ایستگاه‌های واقع در مناطق (۶)، (۷)، (۸)، (۹):
در این حالت بسته به موقعیت ایستگاهی که در یکی از این مناطق قرار دارد، دو حالت ممکن است روی دهد (شکل ۸):



شکل ۸ موقعیت ایستگاه نمونه S واقع در یکی از مناطق (۶)، (۷)، (۸).

ایستگاه مورد نظر در منطقه بالای نیم‌ساز ناحیه مربوطه قرار گیرد (مانند S_1)، در این حالت:

$$Z_{gs} = \frac{W_2 Z_2 + W_3 Z_3}{W_2 + W_3} \quad (17)$$

ایستگاه مورد نظر در منطقه پایین نیم‌ساز ناحیه مربوطه واقع شود (مانند S_2)، در این حالت مقدار Z_{gs} برابر است با:

$$Z_{gs} = \frac{W_1 Z_1 + W_2 Z_2}{W_1 + W_2} \quad (18)$$

که در این روابط W تابع وزنی است.

به طور کلی تابع وزنی (W)، تابع فاصله وزنی بین نقطه شبکه‌ای و ایستگاه مشاهده است و تصمیم‌گیری در

آشکار است. برای مقایسه بهتر، تصویر نقشه‌های مربوط به تحلیل ذهنی که در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی تهیه شده، نیز ارائه شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

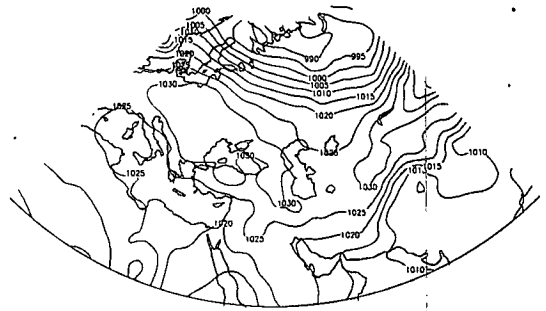
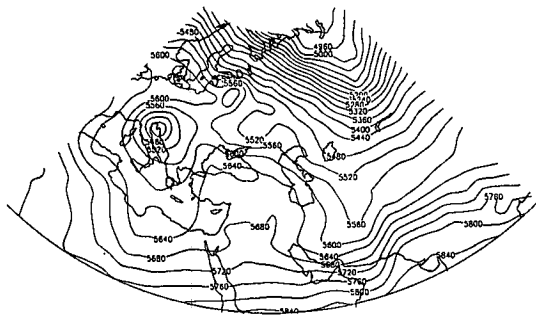
۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

روش کرسمن به صورت یک روش ساده و قابل اطمینان برای تحلیل رایانه‌ای میدان کمیت‌های مختلف هواشناسی به شمار می‌رود. بررسی نتایج پژوهش‌های عملیاتی مختلف نشان داده است که کاربرد این روش انعطاف‌پذیر، به ویژه در زمان حاضر که با وجود سامانه سوئیچینگ در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی کشور، تصحیح برخی خطاهای آشکار-اعم از خطاهای مربوط به دیدبانی یا مخایره داده‌ها- امکان‌پذیر است، نتایج کاملاً رضایت‌بخشی را به همراه دارد. با این حال هنگام استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا که بر مبنای معادلات بسط پایه‌ریزی شده‌اند، از توانایی‌های این روش در برقراری سازگاری داخلی بین داده‌ها بر اساس معادلات تا حدی کاسته می‌شود (کرسمن، ۱۹۵۹). اما چون در اولین گام فرایند پیش‌بینی عددی وضع هوا باید میدان‌های هواشناسی روی شبکه مدل معلوم باشند، نتایج تحلیل را می‌توان به صورت شرایط اولیه به کار برد. نتایج مقدماتی اجرای عملیاتی این روش نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های درون‌یابی شده کدهای گرید با تفکیک ۲/۵ درجه در حکم میدان زمینه برای تحلیل میدان فشار سطح دریا، تعداد مناسب گام‌های تکرار، ۵ گام است و در هر بار تکرار به تقریب دو واحد از اندازه شعاع مؤثر اولیه کاسته می‌شود. شعاع مؤثر اولیه تقریباً ۱۰ برابر اندازه یک درجه طول یا عرض جغرافیایی (۱۲۵۰ کیلومتر) فرض شده است (شکل ۹- الف) هم‌چنین بررسی اولیه میدان ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که از داده‌های مربوط به کدهای گرید با تفکیک ۵ درجه، می‌توان به منزله میدان زمینه با ۵ گام تکرار

تکرار در درجه اول به نحوه توزیع داده‌ها و در درجه دوم به شکل تابع وزنی انتخاب شده بستگی دارد؛ به گونه‌ای که در بعضی موارد حتی ممکن است پاسخ طیفی تحلیل، کاملاً مستقل از نوع تابع وزنی باشد (دالی، ۱۹۹۱). برای تاثیر بیشتر ایستگاه‌های نزدیک‌تر و نیز هموارسازی میدان تحلیل شده، مقدار R در اولین تکرار (برحسب کیلومتر)، تقریباً ۵ برابر گام شبکه‌ای است و در تکرارهای بعدی، هر بار یک واحد از آن کاسته شده است (۲۵۰۰ کیلومتر برای تحلیل در شبکه‌ای با گام ۵ درجه و ۱۲۵۰ کیلومتر برای تحلیلی که در شبکه‌ای با گام ۲/۵ درجه صورت گرفته است).

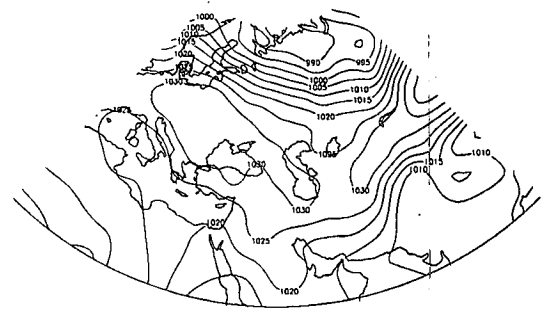
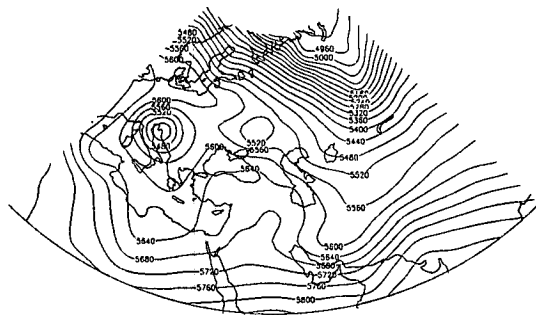
هم‌چنین با مقایسه اولیه بین نتایج تحلیل عینی با تحلیل ذهنی، مشخص شد که تعداد مناسب گام‌های تکرار، ۵ گام است و انتخاب تعداد مناسب آن، احتمالاً با میدان زمینه‌ای مورد استفاده ارتباط دارد. با توجه به این که میدان زمینه استفاده شده در این پژوهش از نتایج یک کد عددی است، احتمالاً تعداد بیشتر گام‌های تکرار، منجر به افزایش تاثیر این میدان زمینه نسبت به داده‌های دیدبانی می‌شود. این مسئله به ویژه در تحلیل‌های نمونه‌ای که با ۱۰ گام تکرار انجام شده است دیده می‌شود.

در ادامه نمونه‌ای از نتایج به دست آمده برای ساعت GMT 1200 روز ۱۴ ژانویه ۲۰۰۲ ارائه می‌شود (شکل ۹). برای این روز، دو تحلیل جداگانه مربوط به فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال صورت گرفته است. ابتدا برای ۵ گام تکرار، تاثیر اندازه شعاع مؤثر و اندازه گام شبکه‌ای نشان داده شده است، سپس نتیجه حاصل از تحلیل منتخب (برای فشار سطح دریا، تحلیل با تفکیک ۲/۵ درجه و برای ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، تحلیل با تفکیک ۵ درجه) به صورت مقایسه‌ای برای ۱۰ گام تکرار نیز آورده شده است. چنان‌چه در بالا اشاره شد، تاثیر غالب میدان زمینه نسبت به داده‌های دیدبانی، در نتایج تحلیل اخیر کاملاً



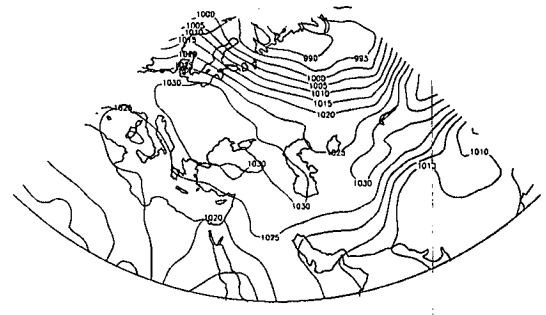
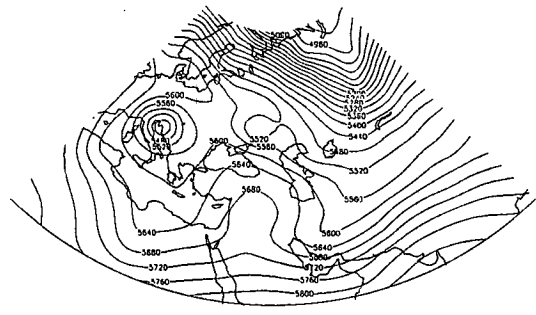
د. نقشه مربوط به ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای ساعت 1200 GMT روز ۱۴ ژانویه ۲۰۰۲. فاصله خطوط پربندی ۴۰ gpm و شعاع مؤثر برای ۵ بار تکرار به ترتیب از چپ به راست: ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ کیلومتر است. میدان زمینه از داده‌های مربوط به کدهای گرید با دقت ۲/۵ درجه به دست آمده است.

الف. نقشه مربوط به خطوط هم‌فشار سطح دریا برای ساعت 1200 GMT روز ۱۴ ژانویه ۲۰۰۲. فاصله خطوط هم‌فشار ۵ هکتوپاسکال و شعاع مؤثر برای ۵ بار تکرار به ترتیب از چپ به راست: ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ کیلومتر است. میدان زمینه از داده‌های مربوط به کدهای گرید با دقت ۲/۵ درجه به دست آمده است.



ب. مانند شکل (الف) برای ۵ بار تکرار با شعاع مؤثر به ترتیب از چپ به راست: ۶۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ کیلومتر. میدان زمینه از داده‌های مربوط به کدهای گرید با دقت ۵ درجه به دست آمده است.

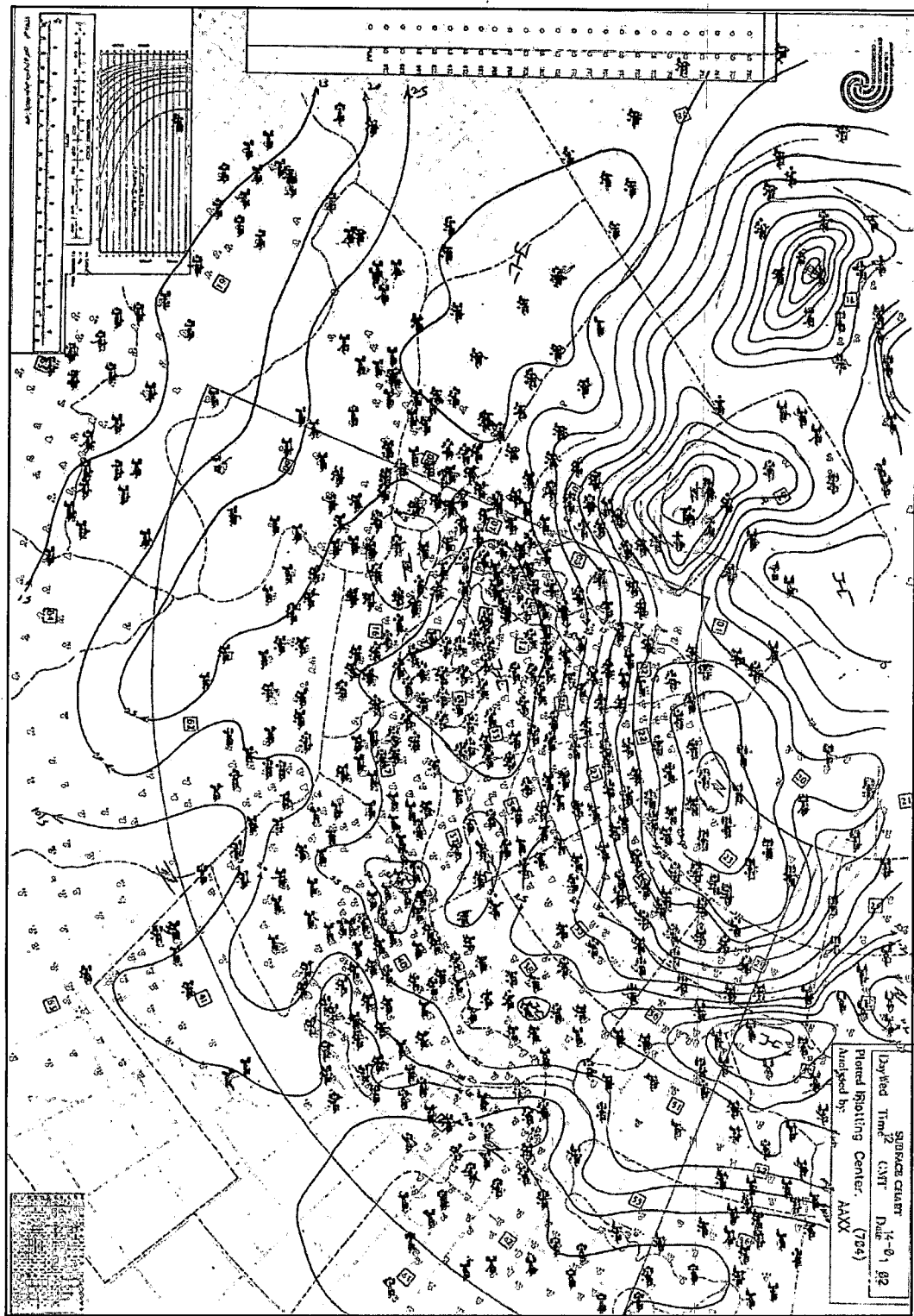
ب. مانند شکل (الف) برای ۵ بار تکرار با شعاع مؤثر به ترتیب از چپ به راست: ۶۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ کیلومتر. میدان زمینه از داده‌های مربوط به کدهای گرید با دقت ۵ درجه به دست آمده است.



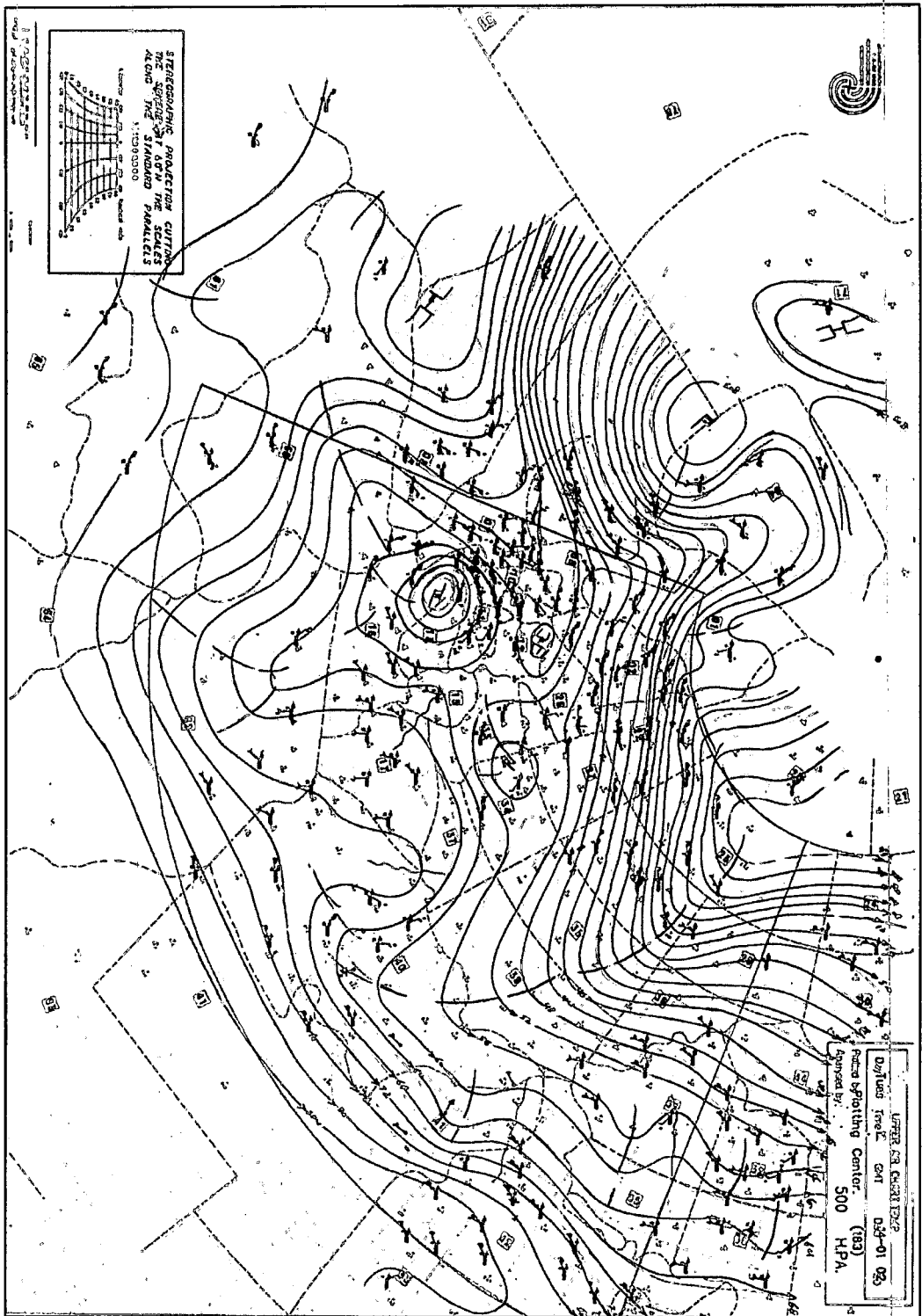
ج. مانند شکل (الف) برای ۱۰ بار تکرار با شعاع مؤثر به ترتیب از چپ به راست: ۲۴۰، ۳۸۰، ۵۲۰، ۶۶۰، ۸۰۰، ۹۴۰، ۱۰۸۰، ۱۲۲۰، ۱۳۶۰ و ۱۵۰۰ کیلومتر. میدان زمینه از داده‌های مربوط به کدهای گرید با دقت ۲/۵ درجه به دست آمده است.

ج. مانند شکل (الف) برای ۱۰ بار تکرار با شعاع مؤثر به ترتیب از چپ به راست: ۲۴۰، ۳۸۰، ۵۲۰، ۶۶۰، ۸۰۰، ۹۴۰، ۱۰۸۰، ۱۲۲۰، ۱۳۶۰ و ۱۵۰۰ کیلومتر. میدان زمینه از داده‌های مربوط به کدهای گرید با دقت ۲/۵ درجه به دست آمده است.

شکل ۹. نقشه‌های حاصل از تحلیل عینی صورت گرفته برای ساعت 1200 GMT روز ۱۴ ژانویه ۲۰۰۲.



شکل ۱۰. نتایج خطوط هم‌ارتفاع سطح زمین در مقیاس هم‌بندی برای ساعت GMT 1200 روز ۱۴ ژانویه ۲۰۰۲ که در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی به روش دستی تحلیل شده است.



شکل ۱۱. نقشه خطوط هم ارتفاع تراز ۵۰۰ مکتوباسکال در مقیاس همدیدی برای ساعت GMT 1200 روز ۱۴ ژانویه ۲۰۰۲ که در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی به روش دستی تحلیل شده است.

اصفهانیان، و.، اشرفی، خ. و قادر، س.، ۱۳۸۰، تهیه یک برنامه کامپیوتری جامع برای تبدیل داده‌های ایستگاهی (سینوپتیک و جو بالا) به نقاط شبکه: مجموعه مقالات اولین کارگاه پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران- سازمان هواشناسی کشور، ۸ مرداد ۱۳۸۰.

حیبی، ف.، ۱۳۷۰، تحلیل عینی و محاسبه تابع جریان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

دهملایی، م.، ۱۳۸۰، مقدمه‌ای بر درون‌یابی دو بعدی و تحلیل عینی: مجموعه مقالات اولین کارگاه پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران- سازمان هواشناسی کشور، ۸ مرداد ۱۳۸۰.

وکیلی، غ.، آزادی، م. و هدایتی‌دزفولی، ا.، ۱۳۸۰، مروری بر پیش‌بینی عددی وضع هوا در ایران: مجموعه مقالات اولین کارگاه پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران- سازمان هواشناسی کشور، ۸ مرداد ۱۳۸۰.

واژه نامه ژئوفیزیک و هواشناسی، ویرایش دوم، ۱۳۷۷، مرکز نشر دانشگاهی و پژوهشکده هواشناسی.

Barnes, S., 1964, A technique for maximizing details in numerical map analysis: *J. Appl. Meteor.*, 3, 395-409.

Bergthorsson, P., and Doos, B., 1955, Numerical weather map analysis: *Tellus*, 7, 329-340.

Bengtsson, L., Michael, G., and Erland K., (eds), 1981, *Dynamic meteorology data assimilation methods*, Springer-Verlag, New York.

Bouttier, F., and Courtier, P., 1999, *Data assimilation concepts and methods*, ECMWF lecture series, meteorological training course.

Cressman, G. P., 1959, An operational objective analysis system: *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367-374.

Daley, R., 1991, *Atmospheric data analysis*, Cambridge University Press, (UK).

Dmowska, R., and Barry S., (eds), 1991, *Advances in Geophysics*, vol. 33, ch. 3: *Data assimilation in meteorology and oceanography* (141-255), Academic Press, New York.

Haltiner, G. J., and Williams, R. T., 1980, *Numerical prediction and dynamic meteorological*, John Wiley, New York, 477 pp.

استفاده کرد. در این جا از اندازه شعاع مؤثر اولیه که تقریباً ۲۰ برابر اندازه یک درجه طول یا عرض جغرافیایی بر حسب کیلومتر (۲۵۰۰ کیلومتر) فرض شده، در هر گام تکرار تقریباً ۵ واحد کم شده است (شکل ۹-ه).

به طور کلی، بررسی کارشناسی نتایج نشان می‌دهد که از روش تحلیل عینی کرسمن می‌توان برای تحلیل نقشه‌های هواشناسی استفاده کرد. عمده تفاوت این پژوهش با کارهای قبلی صورت گرفته در ایران، صرف نظر از موارد نظری، تلاش برای عملیاتی کردن این روش و جایگزینی تحلیل‌های رایانه‌ای به جای تحلیل‌های دستی روی نقشه‌های هواشناسی است. اجرای عملیاتی روش‌های دیگر مانند روش بارنز و درون‌یابی بهینه، نیز مقایسه نتایج روش‌های مختلف، چشم انداز فعالیت‌های آینده را تشکیل می‌دهد.

تشکر و قدردانی

در این جا از کلیه همکاران محترم در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی کشور، که در مراحل مختلف این پژوهش و عملیاتی کردن آن نویسندگان را یاری کرده‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

آزادی، م.، ۱۳۸۰، مروری بر فرایند پیش‌بینی عددی وضع هوا: مجموعه مقالات اولین کارگاه پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران- سازمان هواشناسی کشور، ۸ مرداد ۱۳۸۰.

آزادی، م.، داوری عدالت‌پناه، ف.، رضازاده، پ.، میرزایی، ا. و وکیلی، غ.، ۱۳۸۱، نتایج مقدماتی اجرای عملیاتی تحلیل عینی به روش کرسمن در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی کشور: مجموعه مقالات همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران- سازمان هواشناسی کشور، ۱۷ مهر ۱۳۸۱.

- Holton, J. R., 1992, An introduction to dynamic meteorology, Academic Press, New York, 511 pp.
- Krishnamurti, T. N., and Bounoua, L., 1996, An introduction to numerical weather prediction techniques, CRC Press, Inc., 293 pp.
- Tripoli, G. J., and Krishnamurti, T. N., 1975, Low-level flows over the GATE area during Summer 1972: Mon. Wea. Rev., **103**, 197-216.
- WMO Guide, No. 305, 1993, Guide on the global data-processing system, ch. 3, Secretariat of WMO, Geneva, Switzerland.