

## مطالعه شعاع تغییر شکل Rossby در تحول نظام‌های جوی

علی محمدی\*، حسین اردکانی و محمد تقی زمانیان

گروه هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۲۹

### چکیده

در این پژوهش، رشد امواج چگال‌گرای در منطقه جغرافیایی بین عرض‌های ۱۵ و ۶۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۵ و ۸۰ درجه شرقی (خاورمیانه) مورد مطالعه قرار گرفته است. سامانه جوی مورد مطالعه از مورخه ۱۳ بهمن لغایت ۱۹ بهمن ۱۳۸۸ بر فراز منطقه مورد مطالعه عبور نموده است. رشد فرود موج و شکل‌گیری فراز موج بر روی منطقه با محاسبه شعاع تغییر شکل Rossby و عدد Charney – Green نشان داده شده است. شعاع تغییر شکل Rossby، فراسنجی با بعد طول می‌باشد که در حل مدل پایداری Eady به دست می‌آید و این شعاع معیاری است که آستانه شروع و حد پایانی طول موج‌های ناپایدار را مشخص می‌نماید. برای محاسبه فراسنج‌های شعاع تغییر شکل Rossby و عدد Charney – Green از داده‌های آنالیز مجدد مدل پیش بینی جهانی استفاده شده است و نشان داده شده است که طی حداقل ۲۴ ساعت و حداکثر ۳۶ ساعت (بستگی به شرایط و میزان قدرت نظام‌جوی) آینده، امواج چگونه رشد می‌کنند. دستاورد اصلی این پژوهش این است که با کاهش شعاع تغییر شکل Rossby تا ۸۰۰ کیلومتر و افزایش معکوس عدد Charney – Green به عدد ۳ امواج جوی در ۲۴ الی ۴۸ ساعت آینده در جهت شکل‌گیری فرود موج رشد می‌کنند. هر گاه این فراسنج از ۱۰۰۰ کیلومتر بیش تر شود و معکوس عدد Charney – Green نیز کمتر از ۱ گردد، انتظار رشد و توسعه ریبج بر فراز منطقه می‌رود.

واژگان کلیدی: شعاع تغییر شکل Rossby، عدد Charney – Green، مدل Eady، ناپایداری

## مقدمه

شعاع تغییر شکل Rossby به عنوان نتیجه‌ای از مدل پایداری Eady دارای نقش مهمی در رشد امواج چگال‌گرای است. این شعاع به صورت معیاری طول موج آستانه شروع و حد پایانی امواج رشد یابنده را نشان می‌دهد. مدل پایداری Eady (1949) یکی از نگره‌های اولیه ناپایداری چگال‌گرای است که توسط Eady با انجام ساده سازی‌هایی بر روی معادلات مقدم به فاصله اندکی از نگره‌ی Charney (1947) ارائه شد. ساده سازی‌های انجام گرفته در مدل پایداری Eady شامل استفاده از نگره‌ی شبه زمین گرد روی صفحه  $f$  همراه با ثابت بودن حالت بنیادی چگالی با ارتفاع است، که آن را از نگره‌ی Charney متمایز می‌کند. شرایط اولیه در مدل Eady، شارش مداری دارای چینش یکنواخت و بس آمد شناوری ثابت با ارتفاع ساخته می‌شود. تفاوت اساسی مدل پایداری Eady با نگره‌ی Charney، صفر بودن حالت بنیادی تغییرات نصف النهاری تاوایی نهفته زمین گرد ( $\partial \bar{q} / \partial y = 0$ ) است. این امر نتیجه‌ای از ساده سازی‌های انجام گرفته در مدل پایداری Eady است. Charney و (1962) Stern نشان دادند که شرط لازم برای ایجاد ناپایداری چگال‌گرا تغییر علامت شیب‌برداری نصف النهاری تاوایی نهفته زمین گرد است. تغییر علامت در مدل پایداری Eady از توزیع تابع  $\delta$  در شیب‌برداری نیمگانی تاوایی نهفته در سطوح مرزی نتیجه می‌شود. Green (1960) با در نظر گرفتن تقریب صفحه  $\beta$  نتایج Eady را توسعه داده است. نگره‌ی مورد مطالعه Green (1960) در اصل همان نگره‌ی Charney (1947) می‌باشد. با این تفاوت که او تغییرات حالت بنیادی چگالی با ارتفاع را ثابت فرض نموده است. بر خلاف Charney، Green توانست با روش عددی و استفاده از روش تفاضل متناهی نواحی ایجاد ناپایداری را مشخص کند. در نگره‌ی Green مانند مدل پایداری Eady از دو مرز در سطح زمین و وردایست استفاده شده است. فرایندهای ناپایداری

چگال‌گرای در مدل پایداری Eady به علت اثر متقابل امواج در مرزها به وجود می‌آیند. (Davies & Bishop 1994) ساده سازی‌های مدل پایداری Eady ممکن است ساده به نظر برسند ولی در دیده‌بانی‌های جوی شیب برداری نیم‌گانی تاوایی نهفته زمین گرد در چرخ‌کره کوچک می‌باشد (Pfeffer, 1981; Hoskins et al., 1985) و همچنین شواهدی نیز مبنی بر این که مقداری بسیار نزدیک به صفر دارد وجود دارند (Sun & Lindzen 1994). Harnik و Lindzen در سال ۱۹۹۷ نگره‌ی ناپایداری را با استفاده از مقاطع واقعی تر  $\partial \bar{q} / \partial y$ ، دما و چینش باد حل نموده و با حالت کلاسیک Eady و Green مورد مقایسه قرار داده و نشان دادند شرایط واقعی و اثرات آرام کره آستانه طول موج ناپایداری را تغییر می‌دهند. در تمامی پژوهش‌های معرفی شده معادله‌ها با تقریب زمین گرد و مقاطع قائم پیش فرض دما و سرعت باد حل شده‌اند. در این پژوهش با اطلاعات دریافتی از مرکز جهانی اقیانوس‌شناسی و هواشناسی (NOAA) ناپایداری امواج چگال‌گرا در جو واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش صورت گرفته در ابتدا مدل پایداری Eady بررسی شده و شعاع تغییر شکل Rossby به عنوان معیاری برای رشد امواج جوی معرفی شده است و اثرات چگالی در راستای قائم بر این نگره که تا به حال مورد مطالعه قرار نگرفته بود، در این تحقیق مورد بحث و ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به این که حل نگره‌ی ناپایداری با توجه به شرایط واقعی با روش عددی معادله تاوایی نهفته زمین گرد امکان‌پذیر است، بنابراین در ادامه این معادله با توجه به شرایطی واقعی‌تر مورد حل عددی قرار گرفته است و نتایج به دست آمده بر روی دو نظام نمونه‌ای بر روی خاور میانه مورد بحث قرار گرفته است. شعاع تغییر شکل Rossby و عدد Charney - Green بر روی دو نظام نمونه جوی محاسبه شده است. خطوط امواج ارتفاع در تراز ۵۰۰ میلی باری با مقادیر مختلف این دو فراسنج مورد

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right) \left(\nabla^2 \psi' + \varepsilon \frac{\partial \psi'}{\partial z}\right) = 0 \quad (۴)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right) \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \frac{\partial \psi'}{\partial x} = 0 \quad \text{at } z=0, H \quad (۵)$$

رابطه (۲-۲۱) معادله گرما پویایی با  $w=0$  بر روی مرزها می‌باشد. تابع زیر به عنوان جواب در رابطه‌های بالا جایگزین می‌گردد.

$$\psi'(x, y, z, t) = \phi(z) \cdot \cos(l y) \cdot \exp[ik(x - ct)] \quad (۶)$$

$\phi(z)$  دامنه موهومی و  $c$  سرعت فاز موهومی می‌باشد.

با قرار دادن جواب (۶) در معادله (۴) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(\Lambda z - c) \left( \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \alpha^2 \phi \right) = 0 \quad (۷)$$

که  $\alpha^2 = (k^2 + l^2) / \varepsilon$  و با قرار دادن رابطه (۶) در (۵) بر روی مرزها رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(\Lambda z - c) \frac{\partial \phi}{\partial z} - \Lambda \phi = 0 \quad (۸)$$

جواب عمومی معادله (۷) به شکل

$$\phi(z) = A \sinh(\alpha z) + B \cosh(\alpha z) \quad (۹)$$

$$\phi(z) = A e^{\alpha z} + B e^{-\alpha z} \quad (۱۰)$$

جواب بالا را در شرایط مرزی  $z=0, H$  (رابطه ۸) جایگزین می‌گردد:

$$\begin{aligned} -c\alpha A - B\Lambda &= 0 \\ \alpha(\Lambda H - c)(A \cosh(\alpha H) + B \sinh(\alpha H)) \\ -\Lambda(A \sinh(\alpha H) + B \cosh(\alpha H)) &= 0 \end{aligned} \quad (۱۱)$$

از مساوی صفر قرار دادن دترمینان ضرایب  $A, B$  و حل معادله درجه دو به دست آمده بر حسب  $c$  رابطه:

$$c = \frac{\Lambda H}{2} \pm \frac{\Lambda H}{2} \left[ 1 - \frac{4}{\alpha H} \cdot \cot gh(\alpha H) + \frac{4}{\alpha^2 H^2} \right]^{1/2} \quad (۱۲)$$

به دست می‌آید. در حالتی که مقدار عبارت زیر رادیکال منفی شود  $c$  موهومی شده و شارش ناپایداری

مقایسه قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### مدل پایداری Eady

مدل پایداری Eady بر مبنای معادله خطی شده تاوایی نهفته زمین گرد (Pedlosky, 1987; Holton, 2004; Valis, 2006) استوار است که با استفاده از مختصه قائم لگاریتم فشار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right) q' + \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} \frac{\partial \psi'}{\partial x} = 0 \quad (۱)$$

$$q' = \nabla^2 \psi' + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon \rho_0 \frac{\partial \psi'}{\partial z} \right) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial y} = \beta - \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon \rho_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \quad (۳)$$

در معادله‌های فوق  $q'$  و  $\bar{q}$  به ترتیب انحراف از مقدار بنیادی و حالت بنیادی تاوایی نهفته زمین گرد،  $\beta$  گرادیان نیم‌گانی فراسنج کوریولیس،  $\bar{u}$  سرعت مداری حالت بنیادی،  $\psi'$  پریشیدگی تابع جریان،  $N$  بس آمد شناوری و  $\varepsilon = f^2_0 / N^2$  است. ساده سازی‌های مدل پایداری Eady عبارتند از:

۱- ثابت بودن حالت بنیادی چگالی

۲- صفحه  $f$  ثابت ( $\beta = 0$ )

۳- ثابت  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \Lambda$

۴- سطوح مرزی در  $H$  و  $z=0$

شرایط بالا نگرهی نامناسب برای جو به وجود می‌آورند. اما می‌توان با استفاده از این فرض‌ها نگره‌ای اولیه برای مطالعه پایداری ایجاد کرد. صفر بودن تغییرات نصف النهاری حالت بنیادی تاوایی نهفته زمین گرد ( $\partial \bar{q} / \partial y = 0$ ) در مدل پایداری Eady شرایط لازم برای ناپایداری را ارضا می‌کند. از اعمال شرایط Eady به رابطه (۲-۱۷) معادله‌های زیر به دست می‌آیند:

(۱۴)

در رابطه بالا  $Lx$  طول موج در راستای  $x$  و  $L_D$  شعاع تغییر شکل Rossby نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$L_D = \frac{NH}{f_0} \quad (15)$$

شعاع تغییر شکل Rossby دارای بعد طول است و به صورت تقریبی در حدود ۱۰۰۰ کیلومتر می‌باشد. تغییرات رابطه (۱۳) بر حسب  $\alpha H$  در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این شکل محدوده امواج ناپایدار دیده می‌شود. مدل Eady نشان می‌دهد امواج جوی با طول موج‌های بزرگ‌تر از  $2.6186 \cdot L_D$  رشد می‌کنند. اگر مقدار متوسط  $L_D$  حدود ۱۰۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شود به صورت تقریبی می‌توان گفت طول موج‌های بزرگ‌تر از ۲۶۱۸ کیلومتر ناپایدار شده و رشد می‌کنند.

می‌شود. از مساوی صفر قرار دادن عبارت زیر رادیکال

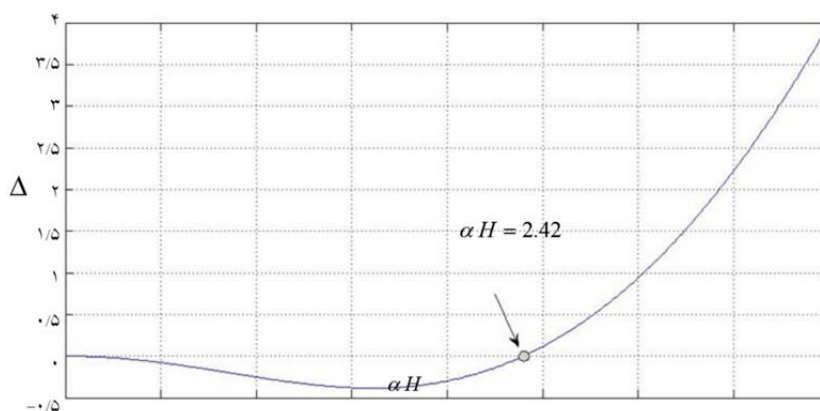
$$1 - \frac{4}{\alpha H} \cdot \cot gh(\alpha H) + \frac{4}{\alpha^2 H^2} = 0 \quad (13)$$

حل عددی رابطه بالا نشان می‌دهد که در  $\alpha H < 2.3994$  منفی شده و شارش ناپایداری می‌گردد. به منظور بررسی کیفی از نتیجه به دست آمده از مدل Eady و به علت ساده سازی فرض می‌شود تنها طول موج در راستای  $x$  وجود دارد و طول موج در راستای  $y$  صفر می‌باشد. لذا فراسنج  $\alpha$  در مدل پایداری Eady برابر

$$\alpha^2 = (k^2 + l^2) / \varepsilon = (k^2 + l^2) N^2 / f_0^2 \Rightarrow l = 0 \Rightarrow \alpha = kN / f_0$$

با قرار دادن  $H$  در رابطه بالا و در نظر گرفتن شرط ناپایداری به دست آمده در مدل پایداری Eady

$$\alpha H < 2.3994 \Rightarrow \frac{kN}{f_0} H < 2.3994 \Rightarrow L_x > 2.6186 \cdot L_D$$



شکل ۱- نمودار رابطه (۱۳) که در  $\alpha H < 2.3994$  منفی شده و شارش ناپایداری می‌گردد.

شارش مداری)،  $\phi$  با  $LU$ ،  $w$  با  $f_0 U^2 / (HN^2)$  بی بعد می‌شوند. مقیاس طول  $L_D$  ۱۰۰۰ کیلومتر و  $H$  ۱۰۰۰۰ متر می‌باشد. در جدول (۱) تمامی متغیرهای مورد استفاده در این نگره‌ی به همراه ابعاد و مقیاس‌های آنها آمده است. شکل بی بعد معادله تابع جریان و تاوایی نهفته زمین گرد به صورت زیر است:

حل عددی معادلات نگره

بی بعد سازی معادلات

در حل عددی، از شکل بی بعد معادلات استفاده می‌شود. در این حالت کلیه متغیرها و ثابت‌ها بدون بعد می‌باشند.  $x$  و  $y$  به وسیله  $L_D$  (شعاع تغییر شکل Rossby و برابر است با  $\frac{NH}{f}$ )،  $z$  توسط  $H$  (ارتفاع ورود سپهر)،  $t$  با  $L_D / U$  ( $U$  سرعت متوسط

$$\begin{aligned}\psi'(x, y, z, t)/LU &= \psi^*(x^*, y^*, z^*, t^*) = R(\phi^*(z^*, t^*)e^{i(kx+ly)}) \\ q'(x, y, z, t)/LU &= q^*(x^*, y^*, z^*, t^*) = R(q^*(z^*, t^*)e^{i(kx+ly)})\end{aligned}\quad (16)$$

دقیقه است. چینش قائم باد ( $\Lambda$ ) بی بعد به صورت

$$\Lambda^* = \frac{H}{u} \Lambda = 1 \quad (18)$$

معادله تاوایی نهفته ( $\gamma$ ) در شکل بی بعد

$$q^* = -k^2 \phi^*(z^*, t^*) + \frac{\partial^2 \phi^*(z^*, t^*)}{\partial z^{*2}}$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} + ik\Lambda \frac{L}{u} Hz^* \right] q^* + ik^* \phi^* \frac{\beta N^2}{f_0^2 \Lambda} H = 0$$

معادله ( $\gamma$ ) در شکل بی بعد

$$q^* = -k^2 \phi^*(z^*, t^*) + \frac{\partial^2 \phi^*(z^*, t^*)}{\partial z^{*2}} \quad (21)$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} + ik\Lambda \frac{L}{u} Hz^* \right] q^* + ik^* \phi^* \frac{\beta N^2}{f_0^2 \Lambda} H = 0$$

شکل Rossby که جهت بی بعد نمودن طول استفاده می‌گردد به صورت

$$L = \frac{Nh}{f_0} = \frac{f_0 \Lambda}{\beta N} \quad (24)$$

وقتی که  $h > H$ ، در عبارت شعاع تغییر شکل Rossby جایگزین  $h$  می‌گردد و اغلب طول موج‌های ناپایدار با افزایش چینش باد بلندتر نمی‌گردند (Held, 1978)

با توجه به رابطه  $\frac{\partial u}{\partial z} = \Lambda$  بعد  $\Lambda$  متناسب با وارون زمان است (فارل، ۱۹۸۲)

$$u = \Lambda H \quad T = \frac{L}{u} = \frac{N}{f_0 \Lambda} \quad (17)$$

مقدار مقیاس زمان که جهت بی بعد سازی در معادلات مورد استفاده قرار می‌گیرد ۹ ساعت ۱۵

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t^*} + ik^* \Lambda^* z^* \right] q^* + ik^* \phi^* \gamma^* = 0 \quad (19)$$

مقدار مقیاس زمان که جهت بی بعد سازی در معادلات مورد استفاده قرار می‌گیرد ۹ ساعت ۱۵ دقیقه است. چینش قائم باد ( $\Lambda$ ) بی بعد به صورت

$$\Lambda^* = \frac{H}{u} \Lambda = 1 \quad (20)$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t^*} + ik^* \Lambda^* z^* \right] q^* + ik^* \phi^* \gamma^* = 0 \quad (22)$$

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در نگرهی Charney وارد شده است، پارامتر بی بعد  $\gamma$  (نسبت بین دو ارتفاع  $h, H$ ) می‌باشد.

$$\gamma^* = \frac{H}{h} \quad (23)$$

در معادله بالا  $h = \frac{f_0^2 \Lambda}{\beta N^2}$  که دارای بعد طول می‌باشد. وقتی که  $h < H$  است طول موج افقی و توسعه عمودی اغلب امواج ناپایدار به شیب برداری افقی دما بستگی دارد. و در این حالت شعاع تغییر

(۲۵)  $L = \frac{NH}{f_0}$  با استفاده از همین مقدار مورد حل قرار گرفته‌اند.  
 معادله گرماپویشی (دما) به صورت زیر بی بعد می‌شود:  
 با قرار دادن ابعاد جدول (۱) در معادله (۲۳)  $\gamma^* = 1$  به دست می‌آید. که در مقاله حاضر معادلات

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} + ik\Lambda \frac{L}{u} Hz^* \right] \frac{\partial \phi^*}{\partial Hz^*} = ik\Lambda \frac{L}{u} \phi^* \quad \left[ \frac{\partial}{\partial t^*} + ik^* \Lambda^* z^* \right] \theta^* = ik^* \Lambda^* \phi^* \quad \frac{\partial \phi^*}{\partial z^*} = \theta^* \quad (26)$$

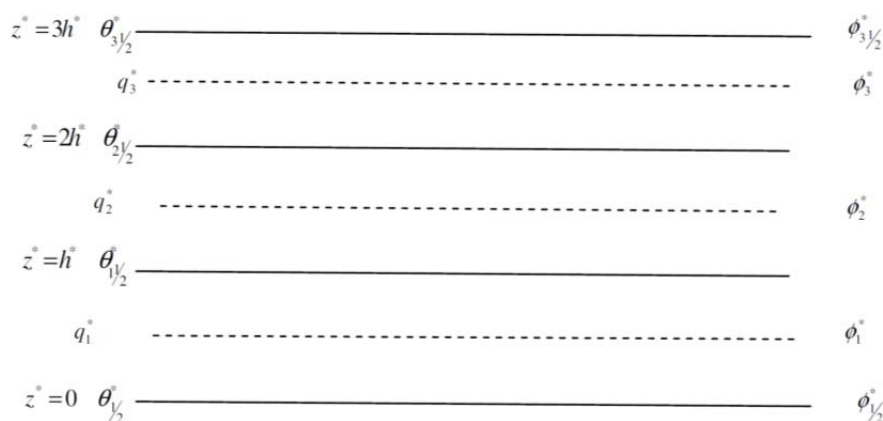
جدول ۱- مقیاس پارامترهای اصلی و ابعاد آنها

پارامتر	مقیاس	بعد	پارامتر	مقیاس	بعد
$x, y$	$L = \frac{NH}{f_0}$	$1000km$	$t$	$\frac{L}{U} = \frac{N}{f_0 \Lambda}$	$9.26h$
$u, v$	$U = \Delta H$	$30ms^{-1}$	$z$	$\frac{f_0 U^2}{N^2 H}$	$10km$
$\psi'$	$LU$	$3 \times 10^7 m^2 s^{-1}$	$w$		$0.09ms^{-1}$
$q'$	$U/L$	$3 \times 10^{-5} s^{-1}$			

شبکه تاوایی نهفته زمین گرد و تابع جریان بر روی لایه‌های یکسان قرار دارند و با لایه‌های دما اختلاف فاصله عمودی  $h/2$  (فاصله بین لایه‌ها) را دارند و در دو لایه مرزی بالا و پائین، تابع جریان بر روی لایه‌های دما قرار گرفته است.

### گسسته سازی معادلات در راستای قائم

به منظور حل عددی نگره‌ی ناپایداری در صفحه  $\beta$  معادلات (۲۲) و (۲۶) را در راستای قائم گسسته می‌کنیم و جهت گسسته سازی معادلات در راستای قائم از شبکه Charney – philips استفاده می‌گردد. (Arakawa & Moorthi, 1982) (شکل-۲) در این



شکل ۲- شبکه Charney – Philips مورد استفاده در حل عددی نگره‌ی ناپایداری (با ۳ لایه به عنوان نمونه)

با استفاده از روش تفاضل متناهی مشتقات مکانی در حالت سه لایه‌ای مطابق زیر است.

(۲۶)

با استفاده از روابط (۲ و ۲۶) تاوایی نهفته زمین گرد به صورت زیر گسسته سازی می‌شود:

$$q_1^* = -k^2 \phi_1^* + \frac{1}{h^*} (\theta_{1/2}^* - \theta_{1/2}^*)$$

$$q_3^* = -k^2 \phi_3^* + \frac{1}{h^*} (\theta_{3/2}^* - \theta_{2/2}^*)$$

$$(h^* = \frac{1}{h} = \frac{1}{3})$$

$$\phi_1^* - \phi_{1/2}^* = \frac{h^*}{2} \theta_{1/2}^*$$

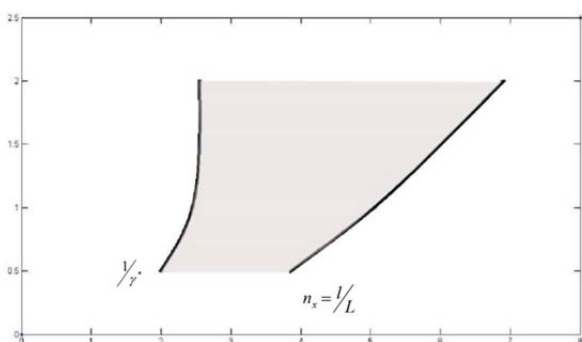
$$\phi_2^* - \phi_1^* = h^* \theta_{1/2}^*$$

$$\phi_3^* - \phi_2^* = h^* \theta_{2/2}^*$$

$$\phi_{3/2}^* - \phi_3^* = \frac{h^*}{2} \theta_{3/2}^*$$

$$q_2^* = -k^2 \phi_2^* + \frac{1}{h^*} (\theta_{2/2}^* - \theta_{1/2}^*)$$

(۲۷)



شکل ۳- طول موج‌هایی که باعث ایجاد ناپایداری می‌شوند به ازای هر  $1/\gamma^*$  بین دو خط پر رنگ قرار می‌گیرد.

در بخش بعدی اثرات فرانسج  $\gamma^*$  و شعاع تغییر شکل Rossby بر رشد و تحول یک نظام جوی به عنوان مثال مورد ارزیابی و مطالعه قرار می‌گیرد.

### نتایج

ناپایداری‌های چگال‌گرایی و شکل‌گیری آنها در جو به عوامل مختلفی بستگی دارد که انطباق این شرایط به صورت تحلیلی و همدیدی کاری پیچیده و دشوار است. شعاع تغییر شکل Rossby با رابطه مشروحه زیر فرانسجی با بعد طول می‌باشد که محاسبه آن در جو واقعی، امواج رشد یابنده و نوع انحناء امواج (فرود موج و فراز موج) را مشخص می‌کند.

$$L_D = \frac{NH}{f_0} \quad (۲۹)$$

در این شبکه پایین‌ترین و بالاترین لایه‌ها سطوح مرزی می‌باشند.  $\theta_{1/2}^*$  و  $\theta_{3/2}^*$  در نگره‌ی سه لایه‌ای) با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) طرحواره گسسته شده تاوایی نهفته زمین گرد در راستای قائم به‌دست می‌آید:

$$h^{*2} q_1^* = 2\phi_{1/2}^* - (3 + k^{*2} h^{*2}) \phi_1^* + \phi_2^*$$

$$h^{*2} q_2^* = \phi_1^* - (2 + k^{*2} h^{*2}) \phi_2^* + \phi_3^*$$

$$h^{*2} q_3^* = \phi_2^* - (3 + k^{*2} h^{*2}) \phi_3^* + 2\phi_{3/2}^* \quad (۲۸)$$

با قرار دادن رابطه (۲۸) در (۲۱) طرحواره حل عددی معادله‌ی تاوایی نهفته‌ی شبه زمین گرد به‌دست می‌آید. معادله‌ی تاوایی نهفته‌ی شبه زمین گرد به همراه معادله گرما پوشی بر روی مرزها به ازای  $0.5 \leq \gamma^* \leq 2$  با استفاده از طرحواره‌های معرفی شده از سطح زمین تا وردایست حل شده‌اند و نتیجه حل عددی در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل نمودار رخداد ناپایداری در طول موج‌های مختلف به صورت تابعی از  $1/\gamma^*$  رسم شده است. بر اساس شکل هر قدر  $\gamma^*$  بزرگ‌تر و به دنبال آن  $1/\gamma^*$  کوچک‌تر شود، بازه طول موج‌هایی که در آن ناپایداری رخ می‌دهد کوتاه‌تر می‌گردد. لذا با کاهش  $1/\gamma^*$  بازه طول موج‌های رشد یابنده کوچک‌تر می‌شود و انتظار می‌رود با کاهش این فرانسج رشد امواج جوی محدودتر شود.

فوریه ۲۰۰۹) بر فراز منطقه عبور نموده است. رشد فرود موج و شکل‌گیری فراز موج بر روی منطقه با محاسبه  $L_D$  و  $\lambda$  مورد مطالعه قرار گرفته است. در مورخه ۱۳۰۰ بهمن ۱۳۸۸ فراز موج با طول موج بلند و دامنه کوتاه در تراز ۵۰۰ میلی باری بر روی منطقه قرار گرفته است. در ساعت ۱۲۰۰ همین روز فرود موج عمیقی بر روی دریای مدیترانه استقرار یافته است. در ساعت ۰۰۰۰ مورخه ۱۴ بهمن ۱۳۸۸ فرود موج در یای مدیترانه با حرکت شرق سو در شرق دریای مدیترانه استقرار یافته است و بر روی منطقه خاور میانه همچنان فراز موج دیده می‌شود. سامانه مذکور در ساعت ۱۲۰۰ مورخه ۱۵ بهمن در تراز ۵۰۰ میلی باری در غرب ایران مستقر شده است. محور فرود موج در روز ۱۶ بهمن از حالت شمال غرب- جنوب شرق در روز ۱۵ بهمن به شمال شرق - جنوب غرب در روز ۱۶ بهمن بتدیل شده است. و از تاریخ ۱۷ بهمن لغایت ۱۹ بهمن سامانه مورد نظر از بین رفته است. در شکل (۴) شعاع تغییر شکل Rossby بر روی منطقه مورد مطالعه محاسبه گردیده است. در روز ۱۳ بهمن فراسنج مذکور بر روی ایران در حدود ۹۵۰ کیلومتر است. اما در روزهای ۱۴ و ۱۵ بهمن این شعاع به حدود ۸۰۰ کیلومتر و در بعضی نقاط به حدود ۷۵۰ کیلومتر رسیده است. کاهش این شعاع بر روی منطقه ایران و خاور میانه همچنان تا روز ۱۷ بهمن ادامه یافته است. و در روز ۱۷ بهمن به طور پراکنده در نقاطی از ایران این شعاع در حدود ۸۰۰ کیلومتر و در بقیه نقاط ۱۰۰۰ کیلومتر است. در روز ۱۸ بهمن که مرحله از بین رفتن سامانه آغاز شده است مقدار این شعاع در بخش‌های شمالی ایران ۱۰۵۰ و در جنوب ایران ۱۱۰۰ کیلومتر افزایش یافته است. معکوس عدد Charney - Green نیز مانند شعاع تغییر شکل Rossby در روز ۱۳ بهمن، مراحل اولیه استقرار این سامانه بر روی ایران به حدود ۲/۵ رسیده است. با افزایش فعالیت سانانه در روز ۱۴ بهمن مقدار این فراسنج در نواحی مرکزی ایران به مقدار ۳ رسیده

در رابطه بالا  $N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$  می‌باشد. که در این  $N^2$  جملات دمای نهفته و تغییرات دمای نهفته با ارتفاع وجود دارد. این دو فراسنج و مقاطع آنها در جو واقعی از موارد مهم رخداد ناپایداری می‌باشند. در رابطه شعاع تغییر شکل Rossby  $\frac{1}{H} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$  می‌باشد لذا  $H$  به چگالی و تغییرات چگالی با ارتفاع بستگی دارد. و چگالی نیز در جو چگال‌گرایی تابعی از فشار و دما می‌باشد. لذا شعاع تغییر شکل تابعی از عوامل دمای نهفته، دما، فشار و مقطع قائم دمای نهفته است. عامل مهم دیگری که در این تحقیق در ارتباط با رخداد ناپایداری چگال‌گرایی محاسبه شده است، عدد بی بعد Charney - Green می‌باشد. این عدد بی بعد به صورت زیر تعریف می‌شود.

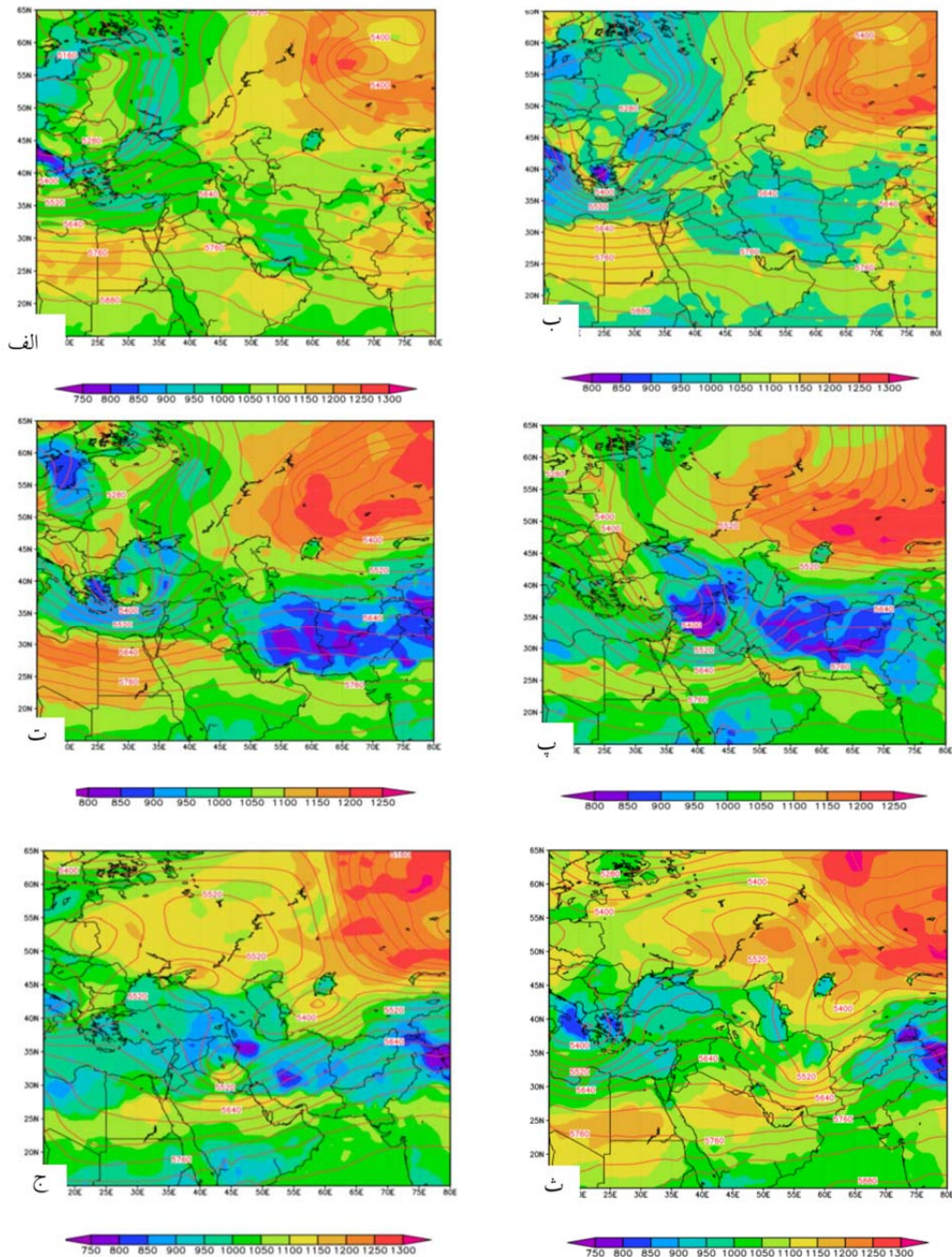
$$\lambda = \frac{\beta L_D^2}{H \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}} = \beta L_D^2 / H\lambda \quad (30)$$

$\lambda$  با توجه به حل عددی صورت گرفته و شکل (۳) دارای اثری بسیار مهم در رخداد ناپایداری است.  $\lambda$  بر حسب توان دوم  $L_D^2$  است و نشان می‌دهد  $L_D$  نقش بسیار مهمی در تعیین مقدار  $\lambda$  دارد. مطابق قبل رخداد ناپایداری به  $\frac{1}{\lambda}$  بستگی دارد و هر قدر  $\frac{1}{\lambda}$  بزرگ‌تر باشد بازه طول موج‌های ناپایدار بزرگ‌تر بوده و امواج با طول‌های متفاوتی می‌توانند رشد کنند. در تحقیق حاضر با توجه به این که رخداد ناپایداری چگال‌گرایی به عوامل زیادی بستگی دارد که فقط تعدادی از آنها در  $L_D$  و  $\lambda$  ظاهر شده‌اند. بنابراین از بحث کمی پیرامون این دو فراسنج خودداری شده است و این دو فراسنج به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. رشد امواج چگال‌گرایی در منطقه جغرافیایی بین عرض‌های ۱۵ و ۶۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۵ و ۸۰ درجه شرقی (خاورمیانه) قرار گرفته است. سامانه جوی مورد مطالعه از مورخه ۱۳ بهمن لغایت ۱۹ بهمن ۱۳۸۸ (۳ فوریه لغایت ۸

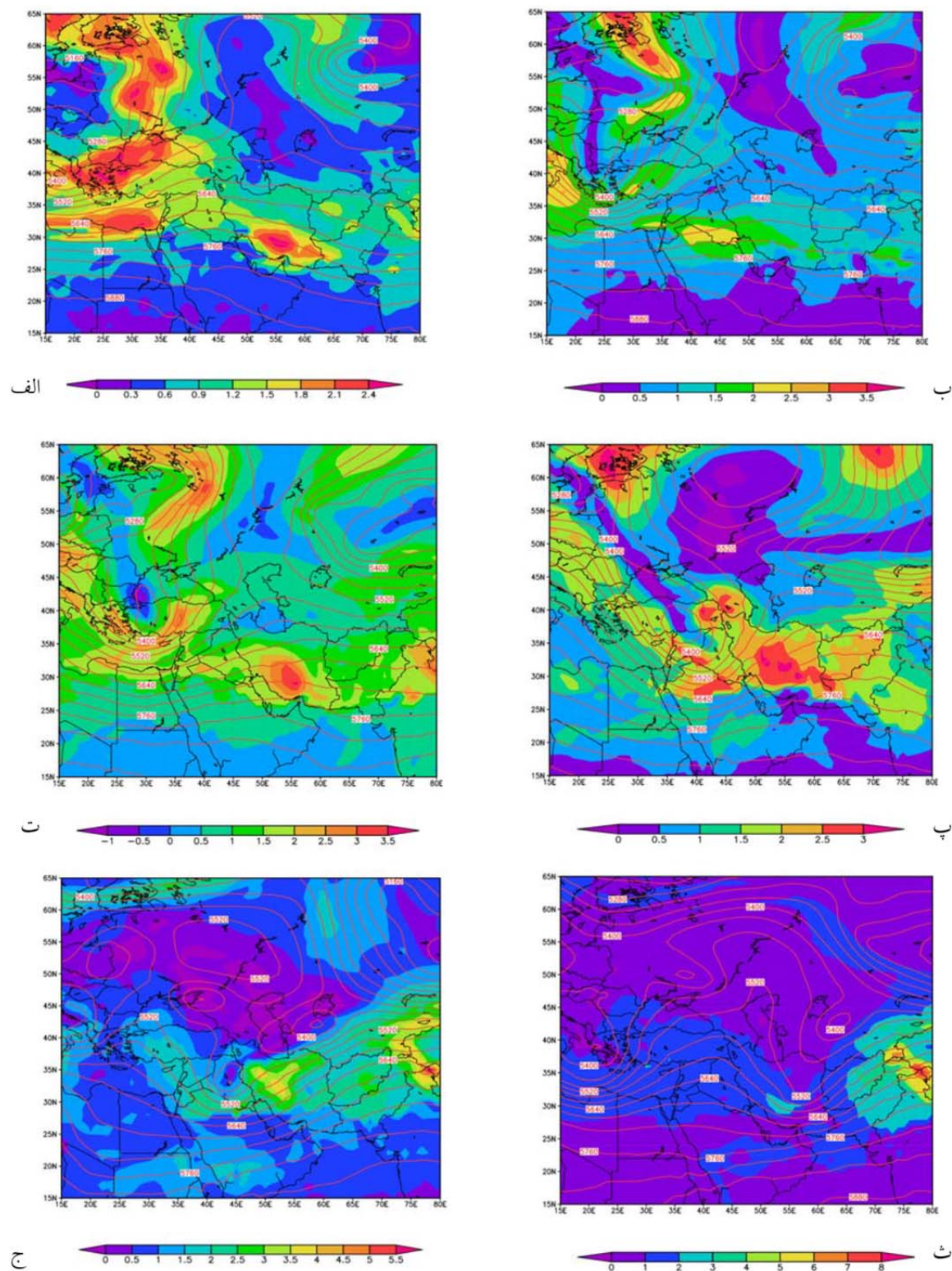


فراسنج همچنان به مقدار ۳ باقی مانده است. ولی در روز ۱۸ بهمن این عدد بر روی مناطق وسیعی از خاور میانه به مقدار ۱ کاهش یافته است.

است. طی روز ۱۵ بهمن مناطقی که دارای مقدار معکوس عدد Charney – Green به مقدار ۳ هستند گسترش بیشتری یافته و مناطق وسیعی از خاور میانه را در بر گرفته است. در روز ۱۷ بهمن مقدار این



شکل ۴- شعاع تغییر شکل راسبی و میدان ارتفاع تراز ۵۰۰ میلی باری در الف) ساعت ۰۰۰۰ روز ۱۳ بهمن ۱۳۸۸، ب) ۱۲۰۰ روز ۱۳ بهمن ۱۳۸۸، پ) ۱۲۰۰ روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۸، ج) ۱۲۰۰ روز ۱۷ بهمن ۱۳۸۸، ت) ۰۰۰۰ روز ۱۴ بهمن ۱۳۸۸، ث) ۱۸۰۰ روز ۱۸ بهمن ۱۳۸۸



شکل ۵- معکوس عدد Charney-Green و میدان ارتفاع تراز ۵۰۰ میلی باری در الف) ساعت ۰۰۰۰ روز ۱۳ بهمن ۱۳۸۸، ب) ۱۲۰۰ روز ۱۳ بهمن ۱۳۸۸، ت) ۰۰۰۰ روز ۱۴ بهمن ۱۳۸۸، پ) ۱۲۰۰ روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۸، ج) ۱۲۰۰ روز ۱۷ بهمن ۱۳۸۸، ث) ۱۸۰۰ روز ۱۸ بهمن ۱۳۸۸



۵۰۰ میلی باری با شدت بیشتری رشد می‌نماید، به طوریکه در روز ۱۵ بهمن ناوهای عمیق با مرکز بسته در تراز ۵۰۰ میلی باری بر روی منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. در روز ۱۵ بهمن منطقه افت شعاع تغییر شکل Rossby بر روی کشورهای ایران، ترکیه، افغانستان و پاکستان گسترش یافته است. افت شعاع تغییر شکل Rossby تا روز ۱۷ بهمن بر روی منطقه ادامه دارد و موج تراز ۵۰۰ میلی باری نیز در طی این دو روز در حال گسترش است.

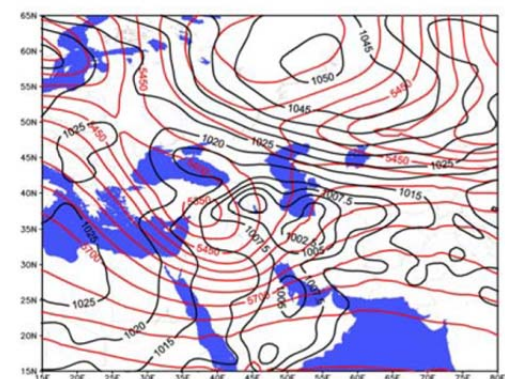
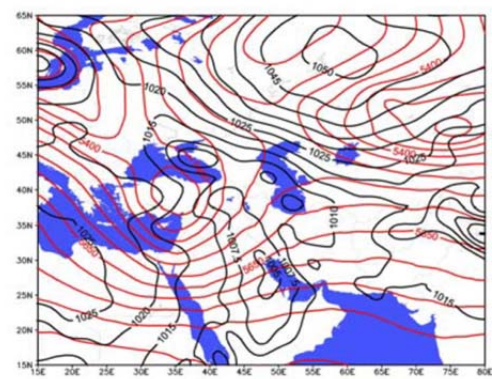
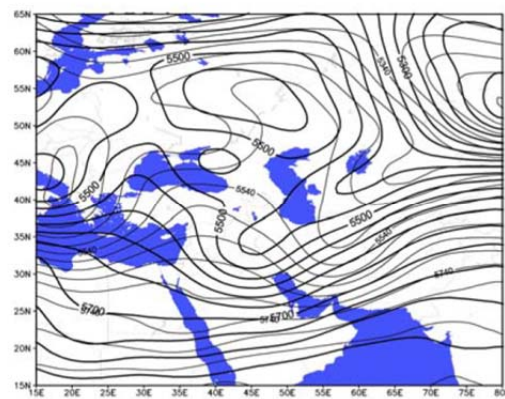
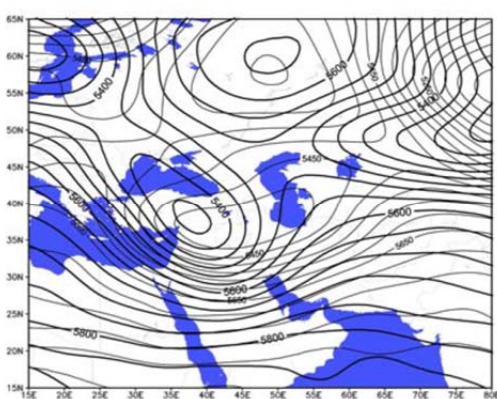
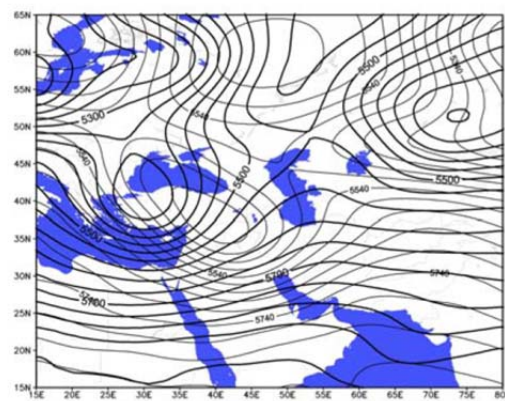
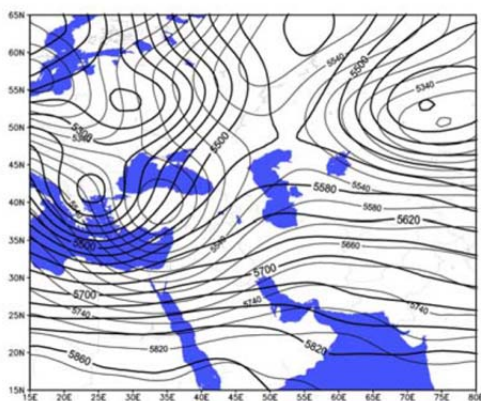
معکوس عدد Charney – Green نیز همچنان در حدود ۳ باقی مانده است. در طی روزهای ۱۵ تا ۱۷ بهمن محور فرود موج از حالت تمایل مثبت (محور فرود موج در راستای شمال غرب- جنوب شرق) به تمایل منفی (محور فرود موج در راستای شمال شرق- جنوب غرب) تغییر نموده است. رخداد این تغییر در محور فرود موج نشان از حاکم شدن شرایط فشار وردی بر روی منطقه مورد مطالعه است.

رشد امواج در تراز ۵۰۰ میلی باری در شکل (۶) بررسی شده است. مطابق این شکل میدان ارتفاع تراز ۵۰۰ میلی باری با اختلاف ۲۴ الی ۳۶ ساعت جهت نشان دادن رشد امواج تراز ۵۰۰ میلی باری بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. با کاهش شعاع تغییر شکل Rossby به میزان ۸۰۰ کیلومتر و افزایش معکوس عدد Charney – Green رشد و توسعه فرود موج بر روی منطقه کاملاً مشهود است. شکل‌گیری مراکز کم فشار در سطح زمین با افت شعاع تغییر شکل Rossby در نقشه‌های پائین چپ و راست شکل (۶) دیده می‌شود.

شعاع تغییر شکل Rossby با بعد طول نتیجه‌ای از مدل پایداری Eady می‌باشد که معیار رشد امواج چگال‌گرای در جو است. (رابطه ۱۴) به طوری که طول موج‌های بزرگ‌تر از مقدار آستانه‌ای (این مقدار آستانه با تغییر شرایط اولیه نگره، تغییر می‌نماید) ناپایدار شده و رشد می‌کنند. آستانه رشد امواج چگال‌گرای با شرایط اولیه نگره‌ی Eady و با فرض صفر بودن طول موج در راستای نصف النهار  $2/61$  برابر شعاع تغییر شکل Rossby می‌باشد.

با تغییر شرایط اولیه نگره مانند مقاطع درجه دو و بالاتر سرعت باد نسبت به ارتفاع، تغییرات  $N^2$  با ارتفاع و حرکت در صفحه  $\beta$  موجب تغییر در آستانه رشد امواج می‌گردد. حل عددی معادله‌ی تاوایی نهفته‌ی شبه زمین‌گرد با مفروضات Eady و حرکت در صفحه  $\beta$  نشان می‌دهد ناپایداری به صورت تابعی از  $1/\gamma^*$  رخ می‌دهد. رابطه (۲۹) نشان می‌دهد با کاهش شعاع تغییر شکل Rossby و در نتیجه افزایش معکوس عدد بی بعد Charney – Green شرایط مساعدی جهت رشد امواج ایجاد می‌گردد. بررسی همدیدی سامانه عبوری بر روی خاور میانه در مورخه ۱۳ لغایت ۱۸ بهمن ۱۳۸۸ نشان می‌دهد.

روزهای ابتدایی استقرار سامانه بر روی منطقه مورد مطالعه شعاع تغییر شکل Rossby در حدود ۹۵۰ کیلومتر و معکوس عدد Charney – Green  $2/5$  می‌باشد که با توجه به مراحل ابتدایی رشد سامانه انتظار عمیق‌تر شدن سیستم می‌رود. در روز ۱۴ بهمن با افت شعاع تغییر شکل Rossby به ۸۰۰ کیلومتر و افزایش معکوس عدد Charney – Green به ۳ بر اساس نقشه‌های ترسیم شده مشاهده می‌شود موج تراز



شکل ۶- الف): خطوط هم ارتفاع تراز ۵۰۰ میلی باری در ساعت ۱۲۰۰ روز ۱۳ بهمن ۱۳۸۸ (خطوط پر رنگ) بر روی خطوط هم ارتفاع تراز ۵۰۰ میلی باری ساعت ۱۲۰۰ روز ۱۴ بهمن ۱۳۸۸ (خطوط کم رنگ) قرار گرفته است. ب) خطوط هم ارتفاع تراز ۵۰۰ میلی باری در ساعت ۰۰۰۰ روز ۱۴ بهمن ۱۳۸۸ (خطوط پر رنگ) بر روی خطوط هم ارتفاع ساعت ۱۲۰۰ روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۸ (خطوط کم رنگ) ت) خطوط هم ارتفاع در ساعت ۱۲۰۰ روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۸ (خطوط پر رنگ) بر روی خطوط هم ارتفاع ساعت ۱۲۰۰ روز ۱۶ بهمن ۱۳۸۸ (خطوط کم رنگ. پ) خطوط هم مقدار ارتفاع در ساعت ۱۲۰۰ روز ۱۷ بهمن ۱۳۸۸ (خطوط پر رنگ) بر روی خطوط هم ارتفاع ساعت ۱۲۰۰ روز ۱۸ بهمن ۱۳۸۸ (خطوط کم رنگ) ج) خطوط هم مقدار ارتفاع در تراز ۵۰۰ میلی باری و خطوط هم فشار در ساعت ۰۰۰۰ مورخه ۱۵ بهمن بر روی هم قرار گرفته‌اند. ث) خطوط هم مقدار ارتفاع در تراز ۵۰۰ میلی باری و خطوط هم فشار در ساعت ۱۲۰۰ مورخه ۱۵ بهمن بر روی هم قرار گرفته‌اند.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله معادلات با در نظر گرفتن تغییرات چگالی با ارتفاع و تقریب صفحه  $\beta$  هر یک به صورت جداگانه حل شده و نتیجه به حالت کلی تعمیم داده شده است. تغییرات چگالی با ارتفاع، بازه طول موج‌های رشد یابنده را کوچک‌تر نموده و تقریب صفحه  $\beta$  نیز سبب می‌گردد نگره مورد بررسی به مقدار عدد Charney – Green وابسته شود. عدد Charney – Green با نسبت مستقیم به توان دوم شعاع تغییر شکل Rossby بستگی دارد لذا می‌بینیم فراسنج شعاع تغییر شکل Rossby در شرایطی منطبق بر جو واقعی دارای نقش بسیار مهمی است. در حل عددی نشان داده شد که رشد امواج جوی با معکوس عدد Charney – Green متناسب است (شکل ۳) و هر قدر معکوس این عدد بیشتر شود بازه رشد امواج ناپایدار بزرگ‌تر شده و طول موج‌های بیشتری می‌توانند رشد کنند. با کاهش این فراسنج بازه طول موج‌های رشد یابنده کاهش یافته و رشد امواج محدودتر می‌گردد.

با محاسبه فراسنج شعاع تغییر شکل Rossby در زمان‌های مختلف و تحلیل هم دیدی، در پژوهش حاضر نشان داده شد که با کاهش شعاع تغییر شکل Rossby تا ۸۰۰ کیلومتر امواج جوی در ۲۴ الی ۴۸ ساعت آینده در جهت شکل‌گیری فرود موج رشد می‌کنند. با کاهش هر چه بیشتر این فراسنج بر شدت رشد و توسعه امواج افزوده می‌شود. هر گاه این فراسنج از ۱۰۰۰ کیلومتر بیشتر شود، انتظار رشد و توسعه ریح بر فراز منطقه وجود دارد. با فراتر رفتن از ۱۰۰۰ کیلومتر بر شدت رشد و توسعه فراز موج افزوده می‌شود. با افت شعاع تغییر شکل Rossby و رشد موج در تراز ۵۰۰ میلی باری، مرکز کم فشار در سطح زمین نیز توسعه می‌یابد. (شکل‌های ۴ و ۵)

مشابه این وضعیت برای عدد Charney – Green وجود دارد. با افزایش این عدد تا ۴ طی ۲۴ ساعت الی ۴۸ ساعت آینده امواج جوی در جهت شکل‌گیری فرود

موج رشد می‌کنند و با افزایش هر چه بیشتر این فراسنج بر شدت رشد و توسعه امواج به صورت فرود موج افزوده می‌شود. هر گاه این فراسنج از ۱ کمتر شود، انتظار رشد و توسعه فراز موج بر فراز منطقه وجود دارد. با کوچک‌تر شدن این فراسنج از عدد ۱ (یک) بر شدت رشد و توسعه فراز موج افزوده می‌شود (شکل ۶).

محمدی و محب‌الحجه (۱۳۹۲) با شبیه‌سازی موج نرمال (رابطه ۶) در محیطی با چینش خطی باد، نشان دادند که مقدار  $h = \frac{f_0^2 \Lambda}{\beta N^2}$  در رشد امواج جوی مؤثر بوده و با کاهش این پارامتر امواج جوی میرا شده و با افزایش مقدار آن شرایط رشد امواج جوی فراهم می‌شود. ولی در اینجا در محیط واقعی نشان داده شد که با افزایش معکوس عدد Charney – Green امواج جوی رشد می‌کنند لذا با توجه به اینکه  $\frac{1}{\lambda} = \frac{h}{H}$  لذا می‌توان نتیجه گرفت انطباق کامل بین شرایط شبیه‌سازی شده و شرایط جو واقعی وجود دارد.

### منابع

۱. محمدی، ع. و محب‌الحجه، ع. ر. ۱۳۹۲، اثر چینش باد و چینه‌بندی بر تنظیم کژفشار. فیزیک زمین و فضا، ۴۰ (۱): ۱۲۳-۱۳۶.
۲. Bretherton, F. P. 1966. Critical layer instability in baroclinic flows. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 95: 213–243.
۳. Charney, J.G. 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *Journal of Meteor.*, 4:135–163.
۴. Charney, J.G. & Stern, M. E. 1962. On the instability of internal baroclinic jets in a rotating atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19: 159–172.
۵. Davies, H. & Bishop, C. 1994. Eady edge waves and rapid development. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51:1930–1946.
۶. Eady, E. T. 1949. Long waves and

11. Harnik, N. & Lindzen, R, S. 1997. The effect of basic- state potential vorticity gradients on the growth of baroclinic waves and the height of the tropopause. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55: 344–360.
12. Pfeffe, R. L. 1981 .Wave mean flow interactions in the atom sphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38: 1341–1359.
13. Sun, D. Z. & Lindzen, R .S. 1994. A PV view of the zonal mean distribution of temperature and wind in the extratropical troposphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51:757–772.
7. Green, J. S. A. 1960. A problem in baroclinic stability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 86:237–251.
8. Hoskins, B. J., McIntyre, M. E. & Robertson, A. W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vortices maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111: 877–946.
9. Lindzen, R. S. 1990. Dynamics in atmospheric physics. Cambridge University Pres .UK.
10. Lindzen, R. S. & Tung , K. K. 1978 . Wave over reflection and shear instability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35 :1632.