

بررسی تأثیر روش‌های گوناگون آغازگری پالایه رقومی بر نتایج مدل WRF

خسرو اشرفی^{۱*}، مجید آزادی^۲ و سمانه ثابت‌قدم^۳

^۱استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، ایران

^۲استادیار، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

^۳دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۲/۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۷، دسترسی برخط: ۱۳۸۹/۱۲/۲۵)

چکیده

روش‌های پالایه رقومی را برای کاهش یا حذف موج‌هایی غیرفیزیکی با بسامدهای زیاد به کار می‌برند. این موج‌های مزاحم ممکن است باعث ناپایداری یا انحراف نتایج مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا از مقادیر درست شوند. در این مقاله در ابتدا روش‌های گوناگون آغازگری پالایه رقومی برای انواع متفاوت پالایه‌ها به لحاظ نظری با یکدیگر مقایسه می‌شود و مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه امکانات موجود در مدل WRF که برای اعمال آغازگری پالایه رقومی در نظر گرفته شده است، بررسی و تشریح می‌شوند. سه روش اصلی آغازگری پالایه رقومی موجود در مدل WRF، آغازگری پالایه رقومی لانچ، آغازگری پالایه رقومی دررو و آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای هستند. هر یک از این روش‌ها با ۹ پالایه متفاوت قابل کاربردند که در متن مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مدل WRF برای یک بررسی موردی با و بدون روش آغازگری اجرا شده است و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای همراه با پالایه دولف نسبت به سایر روش‌ها مزیت نسبی بیشتری دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که به صورت کلی به کار بردن روش‌های آغازگری پالایه رقومی باعث کاهش بسامدهای مزاحم در نوسان‌های مربوط به فشار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آغازگری، پالایه رقومی، مدل WRF، آغازگری پالایه رقومی لانچ، آغازگری پالایه رقومی دررو، آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای

Effects of various digital filter initialization methods on results of weather research and forecasting (WRF) model

Khosro Ashrafi^{1*}, Majid Azadi², and Samane Sabetghadam³

¹Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Iran

²Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

³Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 27 April 2010, accepted: 28 December 2010, available online: 16 March 2011)

Summary

Numerical weather prediction (NWP) models without initialization techniques may be result in unreal and inaccurate data. Many initialization methods, such as linear and nonlinear normal mode initialization, have been developed and applied in the field of NWP by atmospheric researchers and modelers. In application, such techniques are very

*Corresponding author:

khashrafi@ut.ac.ir

* نگارنده رابط:

complex and expensive. One of the most efficient and simple techniques which can be used in operational forecasting is digital filter initialization. Digital filter initialization methods are applied to eliminate non-physical and high frequency waves from NWP models. These unwanted waves can affect the results of the models and cause its results to depart from real world and observed conditions.

In this paper, different filters (1- uniform filter, 2- Lanczos filter, 3- Hamming filter, 4- Blackman filter, 5- Kaiser filter, 6- Potter filter, 7- Dolph [Dolph-Chebyshev] window, 8- Dolph filter and 9- Recursive High-Order filter) are theoretically investigated.

The theoretical study of these filters shows that the Dolf filter works better than the other filters. This superiority can be verified using a digital filter initialization technique associated with the Dolf filter in the weather research and forecasting (WRF) model and investigating its results. Subsequently, the digital filter initialization methods provided in the WRF model are tested for the region of Iran. Three different digital filter initialization techniques, namely the digital filter launch, diabatic digital filter and twice digital filter initialization, with nine aforementioned filters were prepared in the WRF model. The WRF model was set with a 45-kilometer grid size for the region at 12-50 °N and 12-87 °S. The WRF model was run over this region with and without a digital filter initialization technique. In general, the initialization of the NWP models influences the first hours of prediction of the meteorological parameters. In this study, two parameters, including surface pressure and rainfall, were considered as indicators of the effects of digital filter initialization methods on the results of the WRF model. Therefore, the obtained results are investigated and compared for surface pressure fluctuation and rainfall.

All results indicate that applying the digital filter initialization effectively eliminates nonphysical waves from surface pressure fields, especially in the first hours of prediction. This was determined by studying three parameters, including surface pressure fluctuation in some points, derivative of surface pressure fluctuation in some points, and integrated derivative of surface pressure. It was found that the twice digital filter initialization associated with the Dolph filter works better than the other techniques and filters.

For rainfall, three- and six-hours predictions of cumulative rainfall were investigated. The results of rainfall prediction with WRF model using digital filter initialization were compared with the results of WRF model without digital filter initialization and observed station data. This comparison showed that the twice digital filter initialization associated with the Dolph filter has its maximum effect during first three hours and in the second three hours has a minimum effect among other techniques. This means that unwanted fluctuations are eliminated properly during the first three hours. Also, a comparison of rainfall prediction results with observed station data indicates that the diabatic digital filter initialization associated with the Dolph filter has the minimum root mean square error. Among digital filter initialization techniques studied, the digital filter launch has sudden effects on the amount of rainfall predicted during the first three hours of prediction time, so this can induce significant errors in results of the model.

Key words: Initialization, digital filter, WRF model, digital filter launch, diabatic digital filter, twice digital filter

۱ مقدمه

در پیش‌بینی عددی وضع هوا که مدل‌ها براساس معادلات تکانه، پیوستگی و انرژی طراحی شده‌اند قبل از اجرای مدل با استفاده از داده‌های اولیه مشاهده شده و میان‌یابی شده روی نقاط شبکه، در ابتدا لازم است که تنظیمی روی این داده‌ها صورت پذیرد. این تنظیم روی داده‌ها آغازگری نامیده می‌شود. اجرای چنین فرایندی به دلایل گوناگون صورت می‌گیرد که مهم‌ترین آنها حذف نوفه‌های ایجاد شده به علت نبود توازن بین میدان‌های باد و جرم است. این نوفه‌ها اگر در انتگرال‌گیری مدل حضور داشته باشند می‌توانند باعث ناپایداری ناشی از امواج، انحراف پیش‌بینی از مقادیر حقیقی و خراب شدن نتایج گوارد داده‌ها از حدس اولیه شوند (هانگک و لینچ، ۱۹۹۳). دلیل شناخته شده دیگری که برای آغازگری مطرح می‌شود، ایجاد میدان‌های سازگار برای متغیرهای تحلیل‌نشده مانند محتوای آب ابرها است.

روش‌های متعددی برای آغازگری ابداع و استفاده شده‌اند. روش مدهای بهنجار را ماکنهاور (۱۹۷۷) و همچنین بائر و تریبیا (۱۹۷۷) برای آغازگری معادلات بسبب مطرح کردند. پس از آن این روش به روشی پرکاربرد در مدل‌های نیم کره و تمام کره تبدیل شد. البته استفاده از این روش در مدل‌های منطقه محدود با مشکلاتی روبه‌رو شد. تمپرتون (۱۹۸۵) برای غلبه بر مشکلات روش پیش‌گفته استفاده از روش ضمنی مدهای بهنجار را پیشنهاد کرد. در روش ضمنی، معادلات توازن برای آغازگری مستقیماً در فضای فیزیکی به دست می‌آید و نیاز به دست‌یابی به مدهای بهنجار مدل نیست (بالیش، ۱۹۷۹؛ تمپرتون، ۱۹۸۸؛ جووانون، ۱۹۸۶). برای آشنایی با جزئیات بیشتر این روش‌ها می‌توان به مقاله تمپرتون ۱۹۸۵ یا گزارش اصفهانیان و همکاران (۱۳۸۱) مراجعه کرد.

آغازگری با مدهای بهنجار دارای مشکلاتی است (کالنی، ۲۰۰۳). اول اینکه در مناطق حاره‌ای گرمایش دررو نقش مهمی در توازن اولیه فرارفت قائم و پایداری ایستا دارد، بنابراین واداشت گرمایش دررو باید در جملات غیرخطی در نظر گرفته شود (ورگن، ۱۹۸۸). دومین نکته اینکه آغازگری با مدهای بهنجار فقط یک تقریب درست از تغییر زمانی کند جو است، بنابراین اگر این روش بر مدلی که برای چند روز اجرا می‌شود، اعمال شود آن مدل را اصلاح نمی‌کند چراکه در ابتدای عمل مدل به توازن مدهای کند می‌رسد. روش‌های جایگزین متفاوتی برای رفع این مشکلات ابداع شده‌اند. از آن جمله می‌توان به روش گوارد داده‌های سه‌بعدی پاریش و دربر (۱۹۹۲)، روش بهنگام‌سازی تحلیل‌ها در فواصل زمانی معین (بلوم و همکاران، ۱۹۹۶) و استفاده از روش آغازگری پالایه رقومی اشاره کرد. آغازگری پالایه رقومی در واقع حالت تعمیم‌یافته‌ای از آغازگری‌های دینامیکی است. در این روش‌های دینامیکی، آغازگری با استفاده از انتگرال‌گیری‌های پیش‌رو و پس‌رو با استفاده از خاصیت میرایی روش‌های عددی صورت می‌گیرد (نیتا و هاورمال، ۱۹۶۹؛ اوکامارا، ۱۹۶۹؛ گرت، ۱۹۷۵؛ هالم و همکاران، ۱۹۸۲). روش اصلی آغازگری پالایه رقومی را لینچ و هانگک (۱۹۹۲) و لینچ (۱۹۹۷) عرضه کرده‌اند و به‌طور اساسی، آغازگری با استفاده از مدهای بهنجار غیرخطی را از مدل‌های عملیاتی حذف کرده‌اند. در آغازگری پالایه رقومی در ابتدا، مدل همانند روش‌های دینامیکی بین دو زمان $t -$ و $t +$ حول زمان صفر به صورت پیش‌رو و پس‌رو انتگرال‌گیری می‌شود. فرق آغازگری پالایه رقومی با روش‌های دینامیکی معمولی در این است که در هر گام زمانی، داده‌های پیش‌رو یا پس‌رو انتگرال‌گیری با وزن خاصی در برآورد کردن شرایط اولیه دخالت می‌کنند. وزن‌های سری زمانی داده‌ها طوری بهینه

بلک من، ۵- پالایه کیزر، ۶- پالایه پوتر، ۷- پالایه پنجره دولف، ۸- پالایه دولف و ۹- پالایه مرتبه بالای برگشتی است. هریک از روش‌های آغازگری پالایه رقومی را می‌توان با هریک از این پالایه‌های نه‌گانه مورد استفاده قرار داد.

۲-۱ روش آغازگری پالایه رقومی بی‌دررو

در این روش در ابتدا مدل پیش‌بینی به صورت پس‌رو و پیش‌رو حول زمان اولیه (تحلیل شده) انتگرال‌گیری می‌شود تا یک سری زمانی از داده‌ها به دست آید. بعد از این مرحله یک روش پالایه رقومی (از پالایه‌های نه‌گانه) به سری زمانی داده‌ها اعمال می‌شود تا شرایط اولیه پالایش شده حاصل شود. به دلیل ماهیت برگشت‌ناپذیری فیزیک و پخش افقی مدل، در هنگام انتگرال‌گیری از مدل به منظور پالایه رقومی، این قسمت‌های برگشت‌ناپذیر مدل (قسمت‌های فیزیکی) را از سامانه مدل خارج می‌سازند و اجرا نمی‌کنند. به همین دلیل این نوع روش آغازگری پالایه رقومی، روش بی‌دررو نامیده می‌شود. در شکل ۱ مراحل اجرای این روش نشان داده شده است. پس از اینکه انتگرال‌گیری‌های پس‌رو و پیش‌رو از زمان اولیه تحلیل شده با مدل بی‌دررو صورت گرفت، از سری زمانی داده‌های به دست آمده مقادیر اولیه فیلتر شده به شکل رابطه (۱) محاسبه می‌شود (لینچ و همکاران، ۱۹۹۷):

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{ini} &= h_{\frac{N}{2}} \mathbf{X}_{ana} \\ &+ \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} h_{\frac{N}{2}-n} [\mathbf{X}_{ana}]_{-n}^A + \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} h_{\frac{N}{2}+n} [\mathbf{X}_{ana}]_n^A \end{aligned} \quad (1)$$

که در رابطه بالا \mathbf{X}_{ini} شرایط اولیه آغازگری شده، \mathbf{X}_{ana} مقدار داده‌های تحلیل شده اولیه و $[\mathbf{X}_{ana}]_n^A$ حالت انتگرال‌گیری شده مدل در زمان n از شرایط اولیه بدون

می‌شوند که میزان بسامدهای زیاد امواج با استفاده از روش‌های میراکننده، میرا شونده. در سال‌های اخیر روش‌های آغازگری پالایه رقومی در مدل‌های عملیاتی مورد توجه قرار گرفته است (چن و هانگ، ۲۰۰۶؛ ویگندت و بنیامین، ۲۰۰۷؛ هانگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ ترمونیا، ۲۰۰۸؛ تاتیانا، ۲۰۰۹).

در این مقاله مدنظر است تا در ابتدا روش‌های گوناگون آغازگری مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و سپس مدل تحقیقاتی WRF با روش‌های گوناگون آغازگری پالایه رقومی روی منطقه ایران اجرا شود و نتایج خروجی آن با یکدیگر مورد مقایسه قرار گیرد. بنابراین در بخش دوم روش آغازگری پالایه رقومی و انواع پالایه‌ها بیان می‌شود و سپس در بخش سوم اعمال روش‌های گوناگون بر مدل WRF به بحث گذاشته می‌شود. در نهایت، در بخش چهارم جمع‌بندی مقاله آورده می‌شود.

۲ روش آغازگری پالایه رقومی

به‌طور کلی چهار روش پالایه رقومی در پیش‌بینی عددی وضع هوا مورد استفاده قرار گرفته است. این چهار روش شامل موارد زیرند:

۱. آغازگری پالایه رقومی بی‌دررو (Adiabatic digital filter initialization (ADFI))
۲. آغازگری پالایه رقومی دررو (Diabatic digital filter initialization (DDFI))
۳. لانچ کردن پالایه رقومی (Digital filter launching)
۴. آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای (Twice digital filter initialization (TDFI))

روش‌های آغازگری پالایه رقومی برای بهینه‌سازی وزن‌های زمان‌های متفاوت انتگرال‌گیری از پالایه‌های گوناگونی استفاده می‌کنند که اصلی‌ترین آنها ۱- پالایه یکنواخت، ۲- پالایه لَنکروز، ۳- پالایه همینگ، ۴- پالایه

بنابراین در این مرحله انتگرال گیری از مدل بی دررو تا زمان $-\frac{N}{2}\Delta t$ به صورت بی درو صورت می گیرد و حالت مدل برای این زمان به دست می آید (دایره توخالی در سمت چپ شکل ۲). سپس مدل کامل دررو از این نقطه به تعداد N گام زمانی به صورت پیش رو صورت می پذیرد. سری زمانی داده ها برای اعمال پالایه رقومی از این داده ها طبق رابطه (۲) حاصل می شود (هانگ و لینچ، ۱۹۹۳):

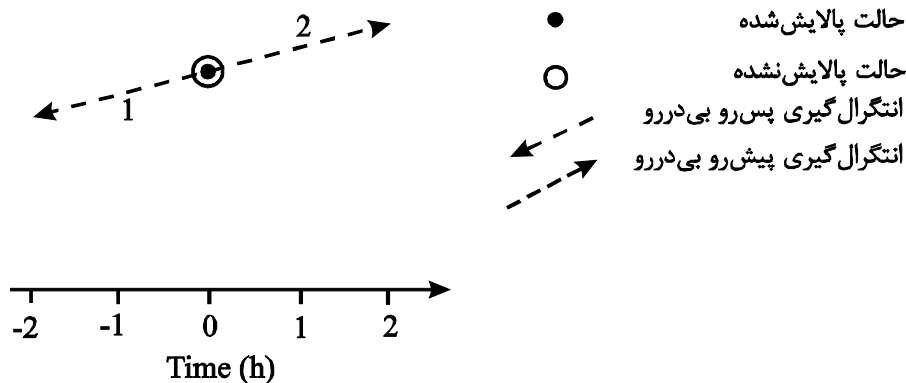
$$\mathbf{X}_{ini} = \sum_{n=0}^N h_n \left[[\mathbf{X}_{ana}]_{-\frac{N}{2}}^A \right]_n^D, \quad (2)$$

که در رابطه بالا، بالانویس A مربوط به انتگرال گیری بی دررو و بالانویس D مربوط به انتگرال گیری دررو است. با توجه به اینکه سری داده های مورد استفاده در آغازگری، از انتگرال گیری پیش رو مدل کامل به دست می آیند، بنابراین نوفه های ایجاد شده از قسمت دررو نیز کنترل می شوند. مهم ترین مشکل این روش و روش های مشابه نبود گذر سری زمانی به دست آمده از انتگرال گیری با درروی پیش رو از شرایط اولیه تحلیل شده است (مقایسه شکل ۱ با شکل ۲). این مسئله باعث ایجاد تفاوت زیاد بین شرایط اولیه مشاهده شده و آغازگری شده می شود.

آغازگری است. همچنین در این رابطه $n = -\frac{N}{2}, \dots, +\frac{N}{2}$ است که اعداد منفی نشان دهنده انتگرال گیری پس رو هستند. پارامتر h همان ضرایب وزنی مربوط به هر یک از اعضای سری زمانی است که شمارش آن از صفر برای نقطه پایانی داده های پس رو تا مقدار N برای نقطه پایانی داده های پیش رو ادامه پیدا می کند. این پارامتر بر اساس یکی از روش های نه گانه پالایه رقومی پیش گفته در ابتدای این بخش محاسبه می شود. مهم ترین اشکال این روش حذف نشدن نوفه هایی است که در اثر فرایندهای فیزیکی دررو تولید می شوند و با استفاده از این روش امکان حذف آنها وجود ندارد. برای جبران این اشکال می توان از روش آغازگری پالایه رقومی دررو استفاده کرد.

۲-۲ روش آغازگری پالایه رقومی دررو

روش حاضر یکی از روش هایی است که برای جبران اشکال روش آغازگری پالایه رقومی دررو پیشنهاد شده است. در این روش سعی شده است از خواص دررو خود مدل استفاده شود. در شکل ۲ ساختار کلی این روش نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲ مشخص است در انتگرال گیری پس رو مدل به دلیل بازگشت ناپذیری فیزیک و پخش افقی، نمی توان از مدل کامل استفاده کرد.



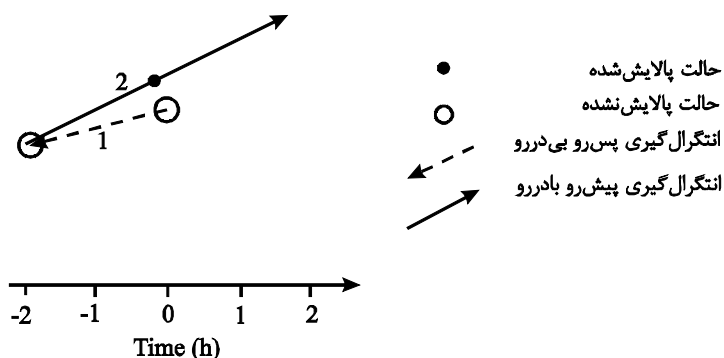
شکل ۱. مراحل اجرای روش آغازگری پالایه رقومی بی دررو.

سپس شرایط شروع پیش‌بینی مدل از سری زمانی داده‌های ذخیره شده در وسط این سری به صورت رابطه (۳) آغازگری می‌شود.

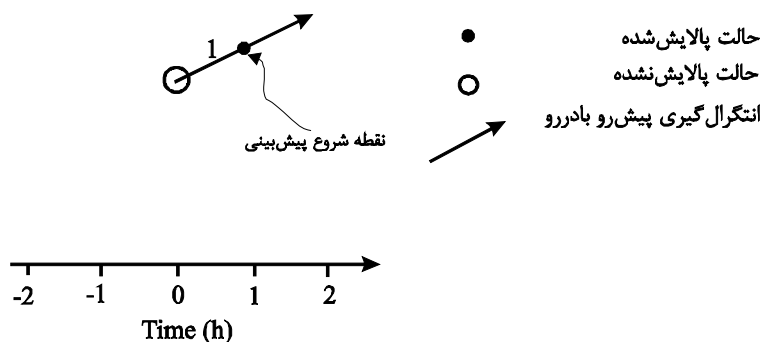
$$\mathbf{X}_{\text{start}} = \sum_{n=0}^N h_n [\mathbf{X}_{\text{ana}}]_n^p, \quad (3)$$

که در رابطه بالا $\mathbf{X}_{\text{start}}$ شرایط آغازگری شده برای آغاز انتگرال‌گیری مدل است. در این روش دیگر شرایط تحلیل شده اولیه به لحاظ زمانی بر شرایط آغازگری شده انطباق ندارد. این روش در کاربرد ساده و دارای مزیت محاسباتی نسبت به سایر روش‌ها است؛ به شرطی که زمان اولیه انتگرال‌گیری به لحاظ آغازگری اهمیتی نداشته باشد. ولی در اکثر مواقع آغازگری به منظور افزایش کارایی مدل‌ها در ساعت اولیه پیش‌بینی به کار می‌رود.

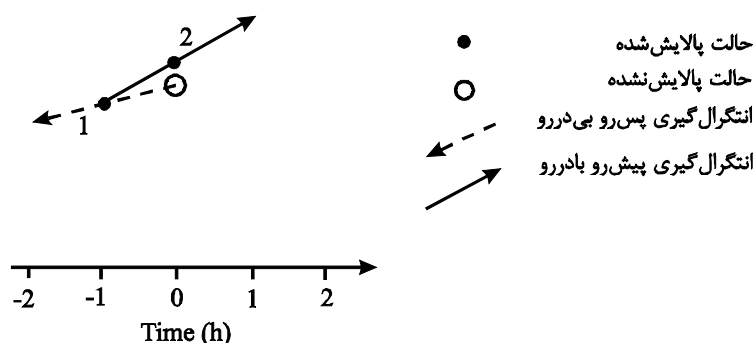
۲-۳ روش آغازگری لانچ کردن پالایه رقومی تلاش برای طراحی روشی که در آن از انتگرال‌گیری پس‌رو بی‌دررو اجتناب شود منجر به ایجاد روش آغازگری لانچ کردن پالایه رقومی شده است. در این روش، سری زمانی فقط از یک انتگرال‌گیری پیش‌رو منفرد از شرایط اولیه تحلیل شده حاصل می‌شود. در شکل ۳ ساختار این روش نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، شروع پیش‌بینی از شرایط اولیه نیست و پیش‌بینی از یک شرایط پیش‌افتاده‌ای (launched condition) آغاز می‌شود (لینچ و همکاران، ۱۹۹۷؛ فیلیون و همکاران، ۱۹۹۵). در این روش در ابتدا مدل دررو از شرایط اولیه تحلیل شده تا زمان $N\Delta t$ اجرا می‌شود و سری لازم از داده‌ها از این انتگرال‌گیری به دست می‌آید.



شکل ۲. مراحل اجرای روش آغازگری پالایه رقومی دررو.



شکل ۳. مراحل اجرای روش آغازگری لانچ کردن پالایه رقومی.



شکل ۴. مراحل اجرای روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای.

در همه روش‌های ذکر شده برای پالایه رقومی، نیاز است تا مقادیر وزنی سری زمانی داده‌ها (h_n) به دست آید. این وزن‌ها با استفاده از یکی از پالایه‌های نه‌گانه پیش‌گفته در ابتدای این بخش محاسبه می‌شود. در ادامه در زیربخش بعدی به صورت مختصر به این پالایه‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۵ پالایه‌های رقومی

برای بررسی پالایش توابع پیوسته یک تابع مانند f در نظر گرفته می‌شود که دارای مولفه‌های با بسامد زیاد و کم است. برای پالایش مولفه‌های با بسامد زیاد باید عملیات زیر صورت پذیرد (لینچ، ۱۹۹۲):

۱. در ابتدا تبدیل فوریه $f(t)$ به صورت $F(\omega)$ محاسبه می‌شود.

۲. ضرایب مربوط به بسامدهای زیاد برابر با صفر قرار داده می‌شود.

۳. تبدیل معکوس فوریه صورت می‌پذیرد.

مرحله دوم از مراحل بالا معمولاً با ضرب تابع $F(\omega)$ در یک تابع وزنی $H(\omega)$ به انجام می‌رسد. تابع $H(\omega)$ در فضای فیزیکی همان $h(t)$ است. معمولاً برای حذف بسامدهای زیاد یک معیار با بسامد ω_c انتخاب می‌شود. با محاسبات ریاضی مربوط (لینچ، ۱۹۹۲؛ اشرفی، ۱۳۸۷) تابع وزنی $h(t)$ برای حالتی که $H(\omega)$ برای $\omega < \omega_c$

۲-۴ روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای

روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای همانند روش آغازگری پالایه رقومی دررو است، فقط با این تفاوت که در مرحله اول هنگام انتگرال‌گیری پس‌رو، داده‌ها ذخیره می‌شود و پالایه رقومی روی سری زمانی داده‌های پس‌رو صورت می‌گیرد. به این معنی که در زمان نصف انتگرال‌گیری پس‌رو برای بار اول پالایه رقومی صورت می‌گیرد و از داده آغازگری شده این زمان، انتگرال‌گیری پیش‌رو صورت می‌گیرد و برابر با زمان انتگرال‌گیری پس‌رو به پیش می‌رود. سپس پالایه رقومی مجدداً روی داده‌های به دست آمده از این انتگرال‌گیری شرط اولیه آغازگری شده به دست می‌آید. مراحل اجرای این روش در شکل ۴ نشان داده شده است. از آنجا که در این روش یک‌بار پالایه رقومی در مرحله پس‌رو و یک‌بار در مرحله پیش‌رو صورت می‌گیرد این روش با نام روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای شناخته می‌شود. مقایسه شکل ۴ و شکل ۲ تفاوت بین این شیوه با روش دررو را نشان می‌دهد. رابطه لازم برای پالایه رقومی دومرتبه‌ای به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود (لینچ و همکاران، ۱۹۹۷؛ لینچ و هانگ، ۱۹۹۴):

$$\mathbf{X}_{ini} = \sum_{n=0}^N h_n \left[\sum_{n'=0}^N h_{n'} [\mathbf{X}_{ana}]_{-n'}^A \right]_n^D, \quad (4)$$

$$w_n = \frac{l_c \left\{ \beta \left[1 - \left(\frac{n}{N+1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{l_c(\beta)}, \quad (10)$$

که در رابطه بالا $l_c(x)$ تابع بسل است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$l_c(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(x \cos \theta) d\theta, \quad (11)$$

که β متغیری برای کنترل پنجره کیزر است.

۶. تابع پنجره پوتر:

$$w_n = \frac{c_n}{c_0} \left[d_0 + \sum_{k=1}^N d_k \cos\left(\frac{k\pi n}{N}\right) \right], \quad (12)$$

$k = 1, 2, 3,$

که در این معادله مقادیر ثابت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} c_n &= \frac{1}{2}, & \text{if } n &= N \\ c_n &= 1, & \text{if } n &\neq N \\ d_0 &= 1, & d_1 &= 0.684988 \\ d_2 &= 0.202701, & d_3 &= 0.0177127 \end{aligned}, \quad (13)$$

۷. تابع پنجره دولف-چیشوف:

$$w_n = \frac{1}{2N+1} \left[1 + 2r \sum_{m=1}^N T_{2N}\left(x_0 \cos \frac{\theta_m}{2}\right) \cos(m\theta_n) \right], \quad (14)$$

که در این رابطه $r = \frac{1}{T_{2N}(x_0)}$ ، $x_0 \cos\left(\frac{\theta_s}{2}\right) = 1$ ،

$\theta_s = \frac{2\pi\Delta t}{\tau_s}$ و T_{2N} تابع چیشوف می‌باشند.

۸. پالایه رقومی دولف-چیشوف: در این روش خود پنجره دولف در حکم پالایه در نظر گرفته می‌شود و در رابطه (۶) ضرب صورت نمی‌گیرد. یعنی:

مقدار یک و برای $\omega > \omega_c$ صفر باشد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h(t) = \frac{\sin(\omega_c t)}{\pi t}, \quad (5)$$

که در حالت گسسته $t_n = n\Delta t$ و تابع f و h فقط در زمان‌های n در دسترس هستند، تابع h به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_n = \frac{\sin \theta_c}{n\pi}, \quad (6)$$

که در این رابطه $\theta_c = \omega_c \Delta t$ بسامد رقومی است. معادله (۶) رابطه اصلی برای همه پالایه‌های رقومی است که در زیر به آنها پرداخته می‌شود. پالایه‌های گوناگون با ضرب این پالایه اصلی در توابع پنجره‌ای w_n حاصل می‌شوند. برخی از مهم‌ترین پالایه‌های رقومی به همراه توابع پنجره‌ای در زیر می‌آیند.

۱. پالایه رقومی یکنواخت (معادله (۶))

۲. تابع پنجره‌ای لنگروز:

$$w_n = \frac{\sin\left[\frac{n\pi}{N+1}\right]}{\frac{n\pi}{N+1}}, \quad (7)$$

۳. تابع پنجره‌ای همینگ:

$$w_n = 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2n\pi}{2N+1}\right), \quad (8)$$

۴. تابع پنجره‌ای بلک‌من:

$$w_n = 0.42 + 0.5 \cos\left(\frac{2n\pi}{2N+1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4n\pi}{2N+1}\right), \quad (9)$$

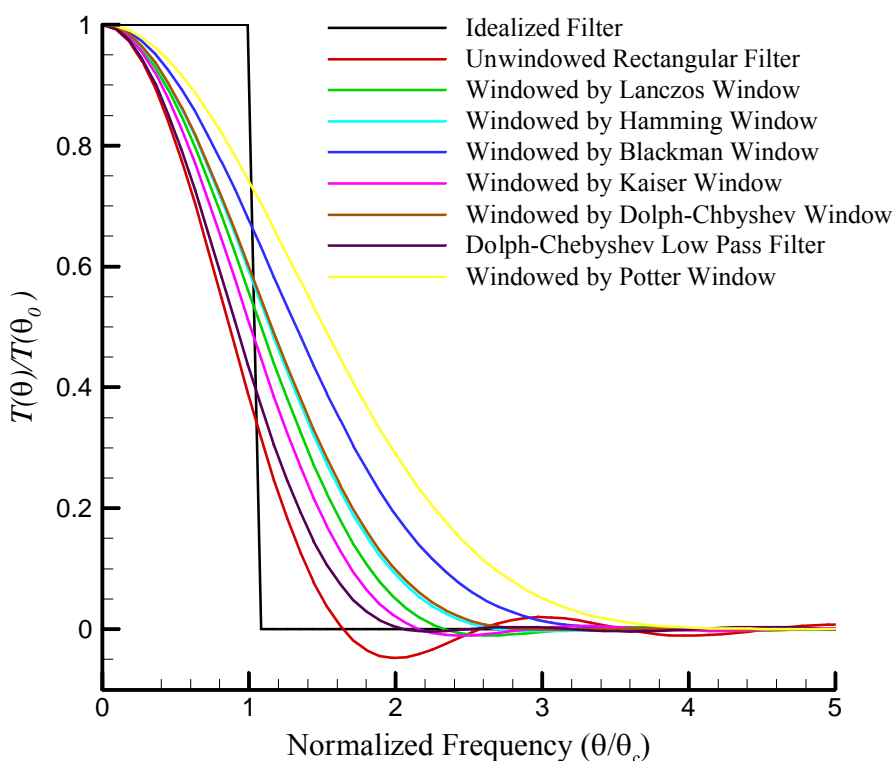
۵. تابع پنجره‌ای کیزر:

برای مقایسه عملکرد پالایه‌های مطرح شده در این بخش، تابع تبدیل آنها در شکل ۵ با پالایش ایدئال مقایسه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، پالایه رقومی دولف (نه پنجره دولف) از عملکرد مناسب‌تری نسبت به بقیه پالایه‌ها برخوردار است؛ زیرا هم دارای نوسانات کمتری است و هم از همه پالایه‌ها به پالایه ایدئال نزدیک‌تر است. برای کمی کردن خطای بین پالایه ایدئال و پالایه‌های مورد بحث در جدول ۱ نرم خطای نسبی I_2 آنها آمده است. در جدول ۱ مشاهده می‌شود که پالایه دولف - چپیشوف (بدون پنجره) دارای کمترین خطا است و بعد از آن پالایه پنجره کیزر قرار دارد. همچنین در این جدول مشخص است که روش پوتر دارای بیشترین خطا است.

$$h_n = \frac{1}{2N+1} \left[1 + 2r \sum_{m=1}^N T_{2N} \left(x_0 \cos \frac{\theta_m}{2} \right) \cos(m\theta_n) \right], \quad (15)$$

تابع تبدیل $T(\theta)$ تابعی است که از اعمال یک پالایه به یک نوسان خالص سینوسی حاصل می‌شود و معمولاً برای مقایسه پالایه‌های گوناگون و عملکرد آنها از آن استفاده می‌شود. برای پالایه متقارنی که در آن $h_k = h_{-k}$ است تابع تبدیل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T(\theta) = \sum_{k=-N}^N h_k e^{-ik\theta} = (h_0 + 2 \sum_{k=1}^N h_k \cos k\theta) \quad (16)$$



شکل ۵. مقایسه پالایه‌های گوناگون با پالایه ایدئال.

۳ نتایج و بحث

نسخه سوم مدل WRF که در آوریل ۲۰۰۸ عرضه شده است در سامانه کنترل اجرای مدل، دارای انتخاب‌های اجرا با آغازگری پالایه رقومی است (راهنمای کاربران مدل WRF، ۲۰۰۸). این سامانه شامل سه روش پالایه رقومی لانچ، دررو و دوطرفه به همراه انواع پالایه‌های نه‌گانه است. با توجه به نتیجه‌ای که از شکل ۵ حاصل شد پالایه دولف دارای مزیت نسبی است. بنابراین برای مقایسه نیازی به اجرای همه حالت‌ها نیست و از آنجا که روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای نسبت به دو روش دیگر ارجح است. بنابراین در این تحقیق اجرای مدل با روش‌های آغازگری لانچ و دررو فقط با پالایه دولف صورت گرفته است، ولی روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای با پالایه‌های گوناگون به انجام رسیده است.

حوزه حل به منظور اجرای مدل WRF در محدوده ۱۲-۵۰ درجه شمالی و ۱۲-۸۷ درجه شرقی در نظر گرفته شده است. همچنین فواصل شبکه‌ای ۴۵ کیلومتر برای مدل منظور شده است. زمان شروع انتگرال‌گیری ساعت مورخ ۲۰۰۸/۰۱/۱۱ است. بنابراین برای دستیابی به نتایج، اجراهای زیر صورت گرفته است:

۱. اجرای بدون آغازگری پالایه رقومی (برای مقایسه حالت‌های همراه با آغازگری پالایه رقومی)
۲. اجرای مدل با روش آغازگری پالایه رقومی لانچ با پالایه دولف
۳. اجرای مدل با روش آغازگری پالایه رقومی دررو با پالایه دولف
۴. اجرای مدل با روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای با انواع گوناگون پالایه‌ها (۹ حالت)

۳-۱ تأثیر بر نوسانات فشار

سه مشخصه اصلی برای یک آغازگری مطرح است. اول اینکه نوسان‌های با بسامد زیاد از پیش‌بینی حذف شوند.

دوم، تغییرات ایجاد شده در شرایط اولیه به اندازه کافی کوچک باشند و سوم این که مدل با ایجاد آغازگری ناپایدار نشود یا به جواب‌های نادرست منجر نشود. در آغازگری پالایه رقومی دو شرط آخر به خودی خود ارضا شده‌اند و نیاز به بررسی آنها نیست. برای نشان داد کارایی روش پالایه رقومی، شرط اول ترسیم نوسان‌های فشار سطحی است (ویلیامسون و تمپرتون، ۱۹۸۱؛ تمپرتون و روچ، ۱۹۹۱). برای نشان دادن نوسان‌های فشار سطحی از سه روش استفاده می‌شود:

۱. ترسیم منحنی تغییرات فشار سطحی در نقاط گوناگون (p_s)

۲. ترسیم منحنی تغییرات مشتق زمانی فشار سطحی در نقاط گوناگون $(\frac{\partial p_s}{\partial t})$

۳. ترسیم منحنی مجموع تغییرات مشتق زمانی فشار سطحی در همه نقاط

$$(N_1 = \frac{1}{I_{\max} J_{\max}} \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} \left| \frac{\partial p_s}{\partial t} \right|_{i,j})$$

به منظور بررسی نوسان‌های پیش‌گفته، ابتدا داده‌های خروجی مدل در هر ۱۵ دقیقه ذخیره و سپس به یک شبکه 373×188 میان‌یابی شده است. برای بررسی تغییرات فشار سطحی نقطه (۱۰۰، ۲۲۰) برای نمونه انتخاب شده است. در شکل ۶ تغییرات فشار سطحی برای این نقطه نشان داده شده است. در شکل ۶-الف این تغییرات برای سه روش آغازگری پالایه رقومی همراه با پالایه دولف نشان داده شده است در صورتی که در شکل ۶-ب همین تغییرات برای روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای با انواع گوناگون پالایه‌ها نشان داده شده است. به دلیل جلوگیری از تداخل خطوط در همدیگر، این خطوط با هم ترسیم نشده‌اند. نوسان فشار برای مشتق فشار سطحی نیز برای نقطه (۱۰۰، ۲۲۰) در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱. نُرم خطای نسبی I_2 برای پالایه‌های گوناگون نسبت به پالایه دقیق پله‌ای.

پالایه پنجره پوتر	پالایه دولف - چیبیشوف (بدون پنجره)	پالایه پنجره دولف - چیبیشوف	پالایه پنجره کیزر	پالایه پنجره بلکمن	پالایه پنجره همینگ	پالایه پنجره لنکزوز	پالایه یکنواخت	نوع پالایه
0.2782	0.1135	0.1413	0.1142	0.1959	0.1378	0.1229	0.1174	نرم I_2

نیم‌ساعت اول هیچ‌گونه پالایشی ندارد و به‌صورت ناگهانی بعد از آن شروع به پالایش می‌کند؛ که این مسئله از ماهیت روش پیش‌گفته ناشی می‌شود و در واقع از نصف فاصله زمانی در نظر گرفته شده برای روش پالایه رقومی به بعد پالایش آغاز می‌شود.

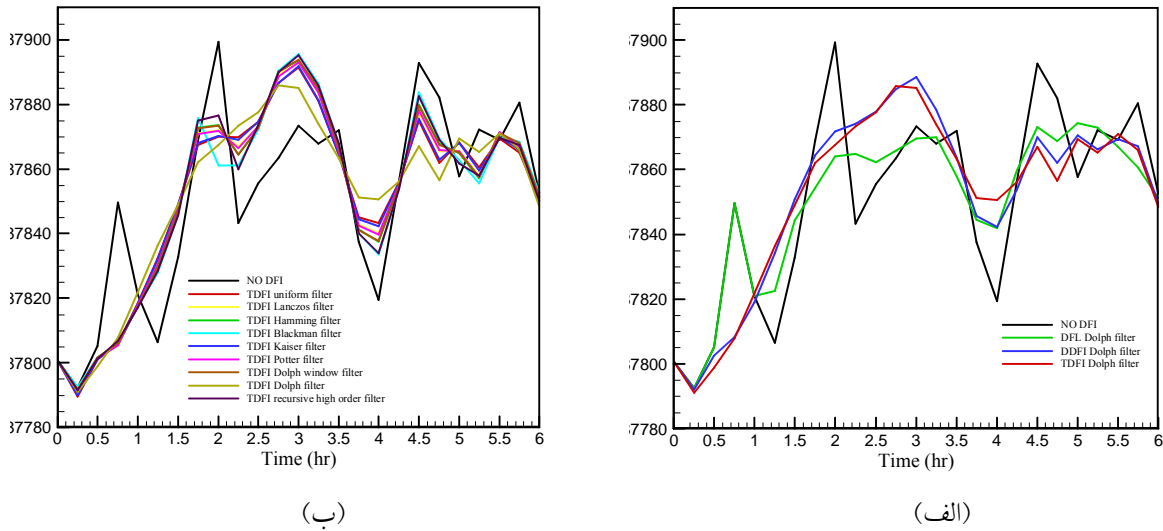
البته در این تحقیق تأثیر روش‌های گوناگون آغازگری پالایه رقومی روی بارندگی نیز صورت گرفته است ولی در اینجا به دلیل محدودیت تعداد صفحات مقاله از آوردن همه نتایج مربوط به این بررسی خودداری می‌شود.

۳-۲ تأثیر بر میزان بارندگی

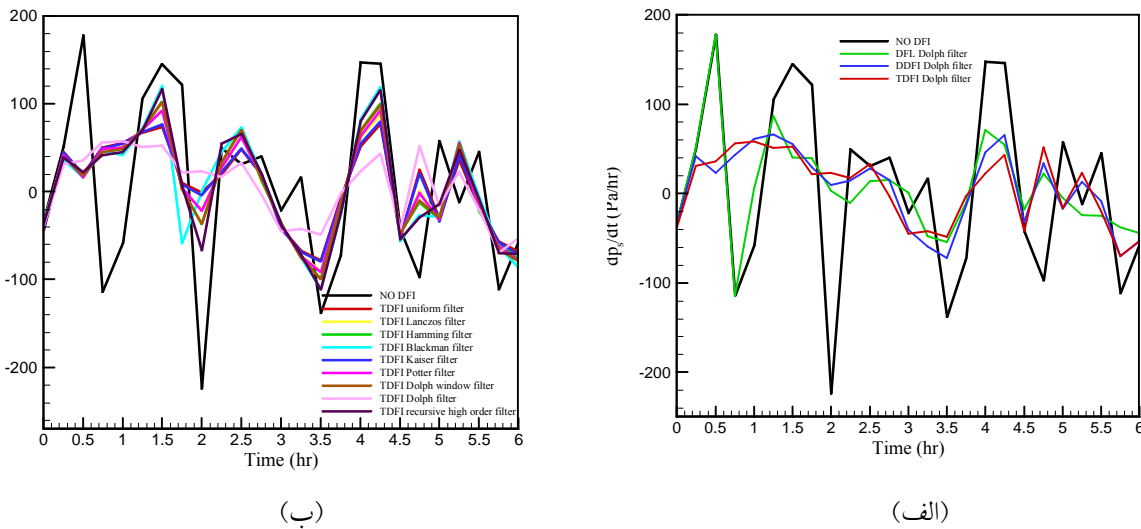
از جمله اثرات پالایه رقومی بر پارامترهای هواشناسی، تأثیر بر میزان بارش در ساعت‌های اولیه پیش‌بینی است. با توجه به این نکته برای بررسی این پدیده میزان بارش در ۳ ساعت اول و ۶ ساعت اول پیش‌بینی برای نقاط شبکه‌ای استخراج شده‌اند. این اطلاعات شامل پیش‌بینی بدون پالایه رقومی، پیش‌بینی با سه روش اصلی پالایه رقومی با پالایه دولف و پیش‌بینی با روش پالایه رقومی دومرتبه‌ای با انواع گوناگون پالایه‌ها است. از آنجا که تفاوت ایجاد شده در نتایج با روش‌های گوناگون آغازگری کوچک است، مقایسه تصویری پرندهای بارندگی مشخص‌کننده تفاوت‌ها نخواهد بود و بنابراین در اینجا از مقایسه تصویری خودداری می‌شود و مقایسه‌ها به‌صورت کمی آورده می‌شوند. برای این منظور دو روش در نظر گرفته می‌شود. در روش اول بارندگی روش‌های متفاوت پالایه

در شکل ۷-الف سه روش اصلی پالایه رقومی لانچ، در رو و دومرتبه‌ای با پالایه دولف با حالت بدون پالایه مقایسه شده‌اند و در شکل ۷-ب این مقایسه با روش اصلی پالایه رقومی دومرتبه‌ای (به‌منزله روش انتخاب شده) همراه با پالایه‌های گوناگون صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است، روش پالایه رقومی دومرتبه‌ای با پالایه دولف به‌لحاظ کاهش نوسان‌های فشار، دارای بهترین جواب است.

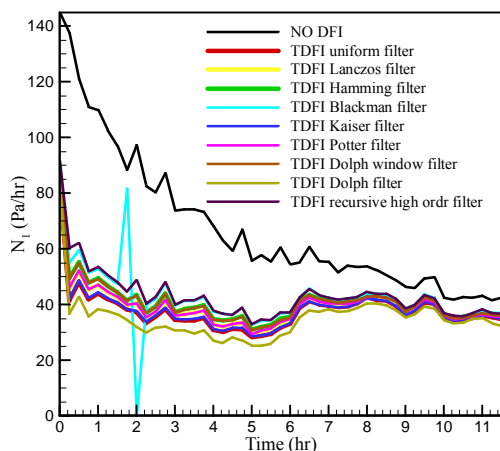
از آنجا که نمی‌توان در مورد کارایی روش‌ها با بررسی یک نقطه دلخواه قضاوت کرد، می‌توان این بررسی را به همه نقاط بسط داد. رابطه مربوط به N_1 این نوع تعمیم را نشان می‌دهد. در شکل ۸ این پارامتر برای روش‌های متفاوت اصلی پالایه رقومی با پالایه دولف (شکل ۸-الف) و روش پالایه رقومی دومرتبه‌ای همراه با پالایه‌های گوناگون (شکل ۸-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸-الف مشخص است، روش آغازگری پالایه دومرتبه‌ای در مقایسه با دو روش دیگر دارای کارایی بسیار بهتری است. این مسئله از این شکل به دو صورت استنباط می‌شود. اول آنکه در زمان بسیار کوتاهی روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای نوسان‌ها را به حداقل ممکن می‌رساند و دوم اینکه نوسان‌های باقی‌مانده در این روش از دو روش دیگر به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کوچک‌تر است. همچنین نکته قابل‌مشاهده دیگر در شکل ۸-ب اینک بهترین پالایه در بین پالایه‌های گوناگون پالایه دولف است. در ضمن در شکل ۸-الف کاملاً مشخص است که روش آغازگری پالایه رقومی لانچ در



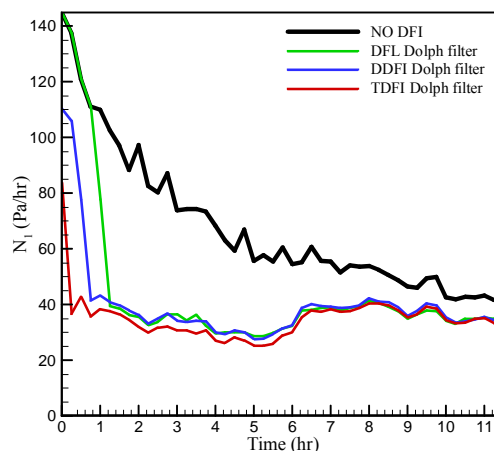
شکل ۶. مقایسه روش‌های متفاوت آغازگری پالایه رقمی در کنترل فشار سطحی در نقطه (۱۰۰، ۲۲۰) برحسب زمان، (الف) مقایسه سه روش اصلی آغازگری پالایه رقمی با حالت بدون پالایه و با یکدیگر، (ب) مقایسه روش آغازگری پالایه رقمی دومرتبه‌ای با انواع پالایه‌ها با یکدیگر و حالت بدون پالایه.



شکل ۷. مقایسه روش‌های متفاوت آغازگری پالایه رقمی در کنترل مشتق فشار سطحی در نقطه (۱۰۰، ۲۲۰) برحسب زمان، (الف) مقایسه سه روش اصلی آغازگری پالایه رقمی با حالت بدون پالایه و با یکدیگر، (ب) مقایسه روش آغازگری پالایه رقمی دومرتبه‌ای با انواع پالایه‌ها با یکدیگر و حالت بدون پالایه.



(ب)



(الف)

شکل ۸ مقایسه روش‌های متفاوت آغازگری پالایه رقمی در کنترل مشتق فشار تجمعی برحسب زمان، (الف) مقایسه سه روش اصلی آغازگری پالایه رقمی با حالت بدون پالایه و با یکدیگر، (ب) مقایسه روش آغازگری پالایه رقمی دومرتبه‌ای با انواع پالایه‌ها با یکدیگر و حالت بدون پالایه.

بهنجارسازی شده و در عدد ۱۰۰۰ ضرب شده تا اختلاف‌های به‌دست آمده قابل مقایسه باشند (برای جلوگیری از کوچک شدن اعداد برای مقایسه از ضرب ۱۰۰۰ به جای ۱۰۰ استفاده شده است). بنابراین ستون‌های قابل مقایسه در جدول ۲ ستون‌های چهارم، هفتم و دهم می‌باشند. چند نکته از مقایسه این ستون‌ها ناشی می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱. بیشترین افزایش در مقدار تجمعی بارش توسط روش پالایه رقمی لانچ مقدار ۷۷/۹۶۱ mm در هزار برای سه ساعت اول، ۲۲/۵۵۴ mm در هزار در ۶ ساعت اول و ۷/۹۹ mm- در هزار برای ۳ ساعت دوم است. این روش همانند شوکی به مدل اعمال شده است که در ۳ ساعت ابتدایی باعث افزایش ناگهانی در میزان بارندگی و در ۳ ساعت دوم کمی به تعادل رسیده و میزان بارندگی ۳ ساعت دوم روند کاهشی نسبت به حالت بدون پالایه به خود گرفته است. این مسئله نشان می‌دهد با پیشرفت زمان پیش‌بینی، این روند تعادلی ادامه پیدا می‌کند.

رقومی با حالت بدون پالایه مقایسه می‌شود و در روش دوم بارندگی پیش‌بینی عددی بدون پالایه رقمی و با پالایه رقمی با حالت واقعی مقایسه می‌شود.

۳-۳ مقایسه بارندگی با پالایه رقمی با حالت بدون پالایه رقمی

در این بررسی از جمع جبری مقادیر بارش در نقاط شبکه برای مقایسه استفاده می‌شود. نتایج نهایی این بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است. در ابتدا مجموع بارندگی در نقاط شبکه حل برای روش‌های مختلف محاسبه شده است. این مقادیر در ستون دوم برای ۳ ساعت اول، در ستون پنجم برای ۶ ساعت اول و در ستون هشتم برای ۳ ساعت دوم (۶ ساعت اول منهای ۳ ساعت اول) آمده‌اند. برای این که این مقادیر قابل مقایسه شوند در ابتدا اختلاف با حالت بدون پالایه (سطر اول) محاسبه شده و متناظر با هر یک از روش‌ها در سطر مربوطه نوشته شده است. با این حال هنوز نمی‌توان مقایسه‌ای صورت داد به همین منظور ابتدا این اختلاف‌ها با توجه به میزان بارش بدون پالایه

مقادیر خطای محاسبه شده بدون هیچ‌گونه حذف اطلاعات بیشینه‌ای انجام شده است. از آنجا که مقیاس شبکه‌ای مدل ۴۵ km کیلومتر در نظر گرفته شده و پارامترسازی فیزیکی نیز بر همین مبنا انجام شده است مدل توانایی پیش‌بینی بیشینه‌ها و شرایط حدی را به دلیل پیچیدگی‌های حاکم بر سیستم‌های هواشناسی و کاربری زمین به صورت دقیق ندارد. با حذف این شرایط حدی (سه داده مربوط به بارش‌های بیشینه) مقادیر RMS به صورت واضحی کاهش می‌یابد. ستون سوم جدول ۳ این مقادیر را نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت آن است که با حذف داده‌های بیشینه خطای RMS کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. این مسئله تأییدی بر این نکته است که مدل‌های عددی با درجه تفکیک کم (شبکه درشت) قادر به تشخیص شرایط محلی و بیشینه‌ای نیستند و بلکه بیشینه‌ها را توزیع می‌کنند. همچنین نکته دوم که از جدول ۳ قابل استخراج است این است که روش پالایه رقومی لانچ در ستون دوم جدول ۳ دارای کمترین خطای RMS است در صورتیکه با حذف بیشینه‌ها از داده‌ها دارای بیشترین خطا (حتی بزرگ‌تر از خطای بدون پالایه رقومی) می‌شود. با توجه به این نکته و مقایسه قسمت قبل (یعنی ایجاد شوک به مدل با این روش) می‌توان این‌گونه استنباط کرد که ستون سوم جدول ۳ برای مقایسه قابل استنادتر است. در ستون سوم جدول ۳ روش پالایه دررو با پالایه دولف دارای کمترین خطا است ولی بقیه روش‌ها نیز اختلاف فاحشی با این مقدار ندارند؛ به طوری که همه حالت‌های پالایه رقومی به جز روش لانچ باعث کاهش میزان خطا نسبت به حالت بدون پالایه می‌شوند. البته مجدداً باید در اینجا متذکر شد که اگر داده‌های ایستگاهی میزان بارش به صورت ۳ ساعته در دسترس بودند، با اطمینان بیشتری می‌توانستیم به محاسبات و نتایج به دست آمده اعتماد کنیم.

۲. در اکثر موارد (به جز روش دررو با پالایه دولف و روش دومرته‌ای با پالایه یکنواخت) میزان تغییرات در بارندگی تجمعی در ۳ ساعت اول بیشتر از ۳ ساعت دوم است (مقایسه ستون‌های چهارم و دهم).

۳. روش پالایه رقومی دومرته‌ای با پالایه دولف که قبلاً کارایی آن در حذف نوسانات فشار نشان داده شد باعث کاهش بارندگی تجمعی در ۳ ساعت اول به میزان ۹/۷۷ mm- در هزار شده است به طوری که این مقدار در ۶ ساعت اول تعدیل شده و به میزان ۳/۴۴ mm- رسیده است.

۴. از بین روش‌های مختلف پالایه رقومی، پالایه رقومی دومرته‌ای با پالایه دولف در ۳ ساعت دوم (۳ ساعت تا ۶ ساعت) کمترین تأثیر را داشته به طوری که افزایش ۰/۴۷ mm در هزار را دارد. این نکته در به این معنی است که این روش در ۳ ساعت اولیه به تعادل رسیده و نوسانات مربوط به شرایط اولیه را به خوبی حذف نموده است.

۳-۴ مقایسه بارندگی با پالایه رقومی و بدون پالایه رقومی با حالت واقعی

در مقایسه قبل مشخص شد که تأثیر پالایه رقومی در ۳ ساعت اول بیشتر از ۳ ساعت دوم است و بهتر است مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها و مقادیر پیش‌بینی شده در این بازه انجام شود ولی از آنجا که ایستگاه‌های هواشناسی در ساعت‌های اصلی میزان بارندگی را گزارش می‌کنند امکان مقایسه در ۳ ساعت اول وجود ندارد. بنابراین با توجه به این محدودیت مقایسه بین مقادیر بارندگی ایستگاه‌ها و مقادیر پیش‌بینی در ساعت ۰۶ انجام شده است. این مقایسه با میان‌یابی داده‌های پیش‌بینی روی نقاط ایستگاهی و محاسبه خطای RMS انجام شده است. در جدول ۳ ستون دوم این مقادیر خطا نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که

جدول ۲. مقایسه بین روش‌های متفاوت آغازگری پالایه رقومی در پیش‌بینی بارش.

اختلاف نرمال شده در mm به هزار	اختلاف تجمع بارش ۳ ساعته دوم با حالت بدون پالایه	تجمع بارش ۳ ساعته دوم (mm)	اختلاف نرمال شده به mm در هزار	اختلاف تجمع بارش ۶ ساعته اول با حالت بدون پالایه	تجمع بارش ۶ ساعته اول (mm)	اختلاف نرمال شده در mm در هزار	اختلاف تجمع بارش ۳ ساعته اول با حالت بدون پالایه	تجمع بارش ۳ ساعته اول (mm)	ساعت محاسبه روش پالایه رقومی
0	0	5817.823	0	0	9024.66	0	0	3206.837	بدون پالایه
-7.98663	-46.4648	5771.359	22.55409	203.543	9228.203	77.96088	250.0078	3456.845	روش لایچ پالایه دولف
1.929811	11.2273	5829.051	1.009456	9.11	9033.77	-0.66025	-2.1173	3204.719	روش دررو پالایه دولف
1.288007	7.4934	5825.317	1.096861	9.8988	9034.559	0.750085	2.4054	3209.242	روش دومرتبه‌ای پالایه یکنواخت
0.892258	5.191	5823.014	2.261027	20.405	9045.065	4.744239	15.214	3222.051	روش دومرتبه‌ای پالایه لنتکروز
2.988437	17.3862	5835.21	4.062081	36.6589	9061.319	6.009879	19.2727	3226.109	روش دومرتبه‌ای پالایه همینگ
2.969358	17.2752	5835.099	5.167031	46.6307	9071.291	9.154036	29.3555	3236.192	روش دومرتبه‌ای پالایه بلکمن
1.342633	7.8112	5825.635	1.457939	13.1574	9037.817	1.667126	5.3462	3212.183	روش دومرتبه‌ای پالایه کیزر
1.337872	7.7835	5825.607	2.571487	23.2068	9047.867	4.809506	15.4233	3222.26	روش دومرتبه‌ای پالایه پوتر
3.376933	19.6464	5837.47	4.317891	38.9675	9063.628	6.024972	19.3211	3226.158	روش دومرتبه‌ای پالایه پنجره دولف
0.047062	0.2738	5818.097	-3.44032	-31.0477	8993.612	-9.7671	-31.3215	3175.515	روش دومرتبه‌ای پالایه دولف
1.868964	10.8733	5828.697	4.065139	36.6865	9061.347	8.049428	25.8132	3232.65	روش دومرتبه‌ای پالایه مرتبه بالا برگشتی

جدول ۳. مقایسه خطای RMS روش‌های متفاوت پالایه رقومی با مقادیر بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها.

روش	خطای RMS بدون حذف سه داده پیشینه	خطای RMS با حذف سه داده پیشینه
بدون پالایه	4.1628	2.6805
روش لایچ پالایه دولف	4.1420	2.6900
روش دررو پالایه دولف	4.1490	2.6641
روش دومرتبه‌ای پالایه یکنواخت	4.1548	2.6648
روش دومرتبه‌ای پالایه لنتکروز	4.1535	2.6651
روش دومرتبه‌ای پالایه همینگ	4.1565	2.6660
روش دومرتبه‌ای پالایه بلکمن	4.1560	2.6646
روش دومرتبه‌ای پالایه کیزر	4.1551	2.6673
روش دومرتبه‌ای پالایه پوتر	4.1547	2.6657
روش دومرتبه‌ای پالایه پنجره دولف	4.1555	2.6646
روش دومرتبه‌ای پالایه دولف	4.1579	2.6675
روش دومرتبه‌ای پالایه مرتبه بالا برگشتی	4.1565	2.6670

۴ نتیجه‌گیری

کارایی بهتری نسبت به سایر پالایه‌ها است. در ادامه مدل WRF با روش‌های آغازگری پالایه رقومی همراه با انواع پالایه‌ها مورد تحقیق قرار گرفت. در مرحله اول این بررسی سه روش اصلی آغازگری پالایه رقومی شامل روش لانچ، دررو و دومرتبه‌ای همراه با پالایه دولف با یکدیگر مقایسه شدند. این مقایسه روشن ساخت که روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای دارای مزیت نسبی در کنترل نوسان‌های فشار است. در مرحله دوم این بررسی روش آغازگری پالایه رقومی دولف با انواع پالایه‌ها مورد آزمون قرار گرفت و نتایج نشان داد که در این مقایسه پالایه دولف نسبت به سایر پالایه‌ها دارای مزیت است. بنابراین روش آغازگری پالایه رقومی مناسب برای مدل WRF، روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای همراه با پالایه دولف است.

در این مقاله نوسانات فشار سطحی و بارندگی به‌منزله متغیرهای هواشناسی که به‌شدت از اعمال روش‌های آغازگری تأثیر می‌گیرند، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. با این بررسی مشخص شد که روش‌های گوناگون در حذف نوسانات فشار (پارامتر N_I) بسیار خوب کار می‌کنند و همان‌طور که ذکر شد روش آغازگری پالایه رقومی دومرتبه‌ای با پالایه دولف بهترین عمل کرد را دارد. همچنین، روشن شد که بارندگی ۳ ساعت اول نسبت به ۳ ساعت دوم از تأثیرپذیری بسیار بیشتری برخوردار است. همچنین خطاهای RMS محاسبه شده برای بارندگی نشان می‌دهد که حالت همراه با پالایه رقومی از حالت بدون پالایه دارای خطای کمتری است ولی قضاوت برای تعیین بهترین روش آغازگری پالایه رقومی برای بارندگی مشکل است؛ زیرا خطاهای آنها از یک مرتبه هستند. برای ارزیابی اثرات گوناگون آغازگری پالایه رقومی با جزئیات بیشتر، نیاز به تحقیقات گسترده‌تری است که از آن جمله می‌توان به موارد متعددی نظیر تأثیر تفکیک

در مقاله عرضه شده هانگ و همکاران (۲۰۰۷) روش پالایه رقومی معمولی به‌همراه پالایه دولف به مدل WRF اعمال شده است. در آن مقاله روش‌های متفاوت پالایه رقومی به همراه پالایه‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند تا بتوان مقایسه کاملی بین نتایج مقاله حاضر با آن را عملی ساخت. آنچه که از نتایج مقاله هانگ برمی‌آید در تطابق کامل با نتایج مقاله حاضر است؛ به‌طوری که اعمال روش پالایه رقومی معمولی به همراه پالایه دولف نوسانات پارامتر را همانند مقاله حاضر کاهش می‌دهد. در مقاله هانگ و همکاران (۲۰۰۷) هدف اصلی تحقیق اعمال روش پالایه رقومی به نسخه دوم مدل WRF بوده است که در آن زمان این روش‌ها به‌صورت جزئی از خود مدل نبوده‌اند. همچنین، در مقاله پیش‌گفته به اثبات رسیده است که در اکثر مواقع، اعمال روش آغازگری پالایه رقومی باعث کاهش خطا در پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی می‌شود. همچنین در تحقیق دیگری چن و هانگ (۲۰۰۶) روش آغازگری پالایه رقومی معمولی را به مدل عملیاتی MM5 با حالت متفاوت گوارد داده‌ها به‌کار بردند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که کاربرد روش آغازگری پالایه رقومی در حذف نوسانات فشار، بسیار موثرتر از سایر روش‌ها است. بنابراین اعمال روش آغازگری پالایه رقومی در دو تحقیق پیش‌گفته به مدل‌های عملیاتی MM5 و WRF، کارایی و پتانسیل روش آغازگری پالایه رقومی در حذف امواج ناخواسته را به اثبات می‌رساند.

در این مقاله با ملاحظه مطالب بالا، در ابتدا، روش‌های متفاوت آغازگری پالایه رقومی به همراه پالایه‌های گوناگون بررسی و به‌لحاظ نظری، مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها بیان شد. مقایسه بین پالایه‌های گوناگون روشن ساخت که پالایه دولف (نه پنجره دولف) دارای

Halem, M., Kalnay, E., Baker, W. E., and Atlas, R., 1982, An assessment of the FGGE satellite observing system during SOP-1: *Bull. Amer. Met. Soc.*, **63**, 407-426.

Huang, X. Y., and Lynch, P., 1993, Diabatic digital filter Initialization: Application to the HIRLAM Model: *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 589-603.

Huang, X. Y., Chen, M., Wang, W., Kim, J. W., Skamarock, W., and Henderson, T., 2007, Development of digital filter initialization for WRF and its implementation at IUM, preprints: 8th annual WRF User's Workshop.

Juvanon du Vachat, R., 1986, A general formulation of normal modes for limited-area models: applications to initialization: *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 2478-2487.

Kalnay, E., 2003, Atmospheric modeling, data assimilation and predictability: Cambridge University Press.

Lynch, P., 1992, Richardson's barotropic forecast: a reappraisal: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 35-47.

Lynch, P., 1997, The Dolph-Chebyshev window: a simple optimal filter: *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 655-660.

Lynch, P., Giard, D., and Ivanovici, V., 1997, Improving the efficiency of a digital filtering scheme: *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1976-1982.

Lynch, P., and Huang, X. Y., 1992, Initialization of HIRLAM model using a digital filter: *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1019-1034.

Lynch, P. and Huang, X. Y., 1994, Diabatic initialization using recursive filters: *Tellus*, **46A**, 583-597.

Machenhauer, B., 1977, On the dynamics of gravity oscillations in shallow water model, with application normal mode initialization: *Beitr. phys. Atmos.*, **50**, 253-271.

Nitta, T., and Hovermale, J., 1969, A technique of objective analysis and initialization for the primitive forecast equations: *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 652-658.

Okamura, Y., 1969, A finite-difference scheme for the primitive equation model with special emphasis on the suppress of the two-grid interval noise, proceedings of the WMO/IUGG symposium on numerical weather prediction: Tokyo, Meteorological Society of Japan, Tokyo, 1-11.

Parish, D., and Derber, J. D., 1992, The national meteorological center spectral statistical interpolation analysis system: *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747-1763.

افقی و قائم در نتایج آغازگری، چگونگی رفتار مدل با روش‌های گوناگون عددی همراه با آغازگری و تأثیر پارامترسازی‌های فیزیکی در نتایج آغازگری، اشاره کرد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت و همکاری پژوهشکده هواشناسی و دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران به انجام رسیده است. بنابراین، نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا نهایت تشکر و قدردانی را از این دو نهاد محترم ابراز کنند.

منابع

اشرفی، خ.، ۱۳۸۷، گزارش نهایی طرح بررسی روش آغازگری دیجیتال فیلترینگ و اعمال آن به یکی از مدل‌های WRF یا MM5: پژوهشکده هواشناسی.

اصفهانیان، و.، قادر، س.، و اشرفی، خ.، ۱۳۸۱، گزارش نهایی طرح آغازگری معادلات آب کم عمق با استفاده از روش ضمنی مدهای بهنجار همراه با اعمال به مدل نیمه لاگرانژی - نیمه ضمنی: سازمان هواشناسی کشور.

Baer, F., and Tribia, J. J., 1977, On complete filtering of gravity modes through nonlinear initialization: *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1536-1539.

Ballish, B., 1979, Comparison of some nonlinear initialization techniques, preprints: Fourth Conf. on Numerical Weather Prediction, Silver Spring, Amer. Meteor. Soc., 9-12.

Bloom, S. C., Takacs, L. L., da Silva, A. M., and Ledvina, D., 1996, Data assimilation using incremental analysis updates, analysis system: *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1265-1271.

Chen, M., and Huang, X. Y., 2006, Digital filter initialization for MM5: *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1222-1236.

Fillion, L., Mitchell, H. L., Richie, H., and Staniforth, A., 1995, The impact of a digital filter initialization technique in a global data assimilation system: *Tellus*, **47A**, 304-323.

Grant, W. F., 1975, Initialization procedure for primitive equation models: M.Sc. Thesis, MIT.

- regional model: Mon. Wea. Rev., **119**, 667-677.
- Termonia, P., 2008, Scale-selective digital-filtering initialization: Mon. Wea. Rev., **136**, 5246-5255.
- Wergen, W., 1988, Normal mode initialization scheme: Beitr. Phys. Atmosph., **61**, 274-304.
- Weygandt, S., S., and Benjamin, S., 2007, Radar reflectivity-based initialization of precipitation systems using a diabatic digital filter within the rapid update cycle. preprints: 22nd Conf. Wea., Analysis Forecasting / 18th Conf. Num. Wea., Pred., Park City, UT, Amer. Meteor. Soc., ams.confex.com/ams/pdfpapers/124540.pdf
- Williamson, D., Temperton, C., 1981, Normal mode initialization for a multilevel grid-point model, part II: nonlinear aspect: Mon. Wea. Rev., **109**, 744-757.
- WRF User Guide 2008, http://www.wrf_model.org.
- Tatiana, G. S., 2009, Implementation and testing of WRF digital filter initialization (DFI) at NOAA/earth system research laboratory: 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction, Grand Ballroom East, Amer. Meteor. Soc. ams.confex.com/ams/pdfpapers/154325.pdf
- Temperton, C., 1985, Applications of a new principle for normal mode initialization, preprints: 7th Conference on Numerical Weather Prediction, Montreal, Amer. Meteor. Soc., 105-107.
- Temperton, C., 1988, Implicit normal mode initialization: Mon. Wea. Rev., **116**, 1013-1031.
- Temperton, C., and Roch, M., 1991, Implicit normal mode initialization for an operational