

طراحی و کاربرد عملی پالایه‌های رقیمی در پردازش سیگنال‌های هواشناسی

ابوالفضل نیستانی*

استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۶/۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰)

چکیده

روش‌های پالایش رقیمی برای جداسازی اطلاعات مجزا از سیگنال‌های پیچیده هواشناسی بسیار مؤثر هستند. هدف از مطالعه حاضر طراحی پالایه‌های مناسب برای اعمال بر روی سیگنال‌های هواشناسی دما و بارش به منظور هموارسازی، جداسازی مؤلفه‌های بسامدی با اهمیت و حذف نوفه‌های بسامد بالای بی‌اهمیت است. طراحی این پالایه‌ها، هم در حوزه زمان و هم در حوزه بسامد امکان‌پذیر است که در این تحقیق طراحی و اعمال پالایه در حوزه زمان انجام شده است. نتایج اهمیت انتخاب پالایه مناسب در تحلیل محتوای طیفی موجود در سیگنال هواشناسی را نشان می‌دهد. با پالایش سیگنال خام دما و بارش ماهانه طی دوره آماری ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ در ایستگاه‌های تهران و تبریز به مؤلفه‌های فصلی، سالانه و بین سالی، ارتباط خطی بین این مؤلفه‌ها به‌طور مجزا توسط ضریب همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفته و شباهت‌ها و تفاوت‌ها با هم مقایسه شده‌اند. همچنین پالایه همینگ نسبت به پالایه میانگین متحرک ساده، عملکرد بهتری را در تضعیف نوسان‌های گیس در بخش‌های جانبی پاسخ بسامدی پالایه نشان می‌دهد. البته انتخاب تعداد وزن بیشتر در طراحی پالایه می‌تواند در بهبود عملکرد پالایه اثرگذار باشد. این مسئله در زمانی که تعداد مؤلفه‌های با اهمیت بیشتری در طیف بسامدی سیگنال هواشناسی وجود دارند، بایستی بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پالایه رقیمی، پردازش سیگنال، تغییرپذیری، پنجره‌گذاری، هواشناسی.

۱. مقدمه

هواشناسی و اقلیمی ناشی از پیچیدگی‌های موجود در سامانه جو و اقیانوس است که استخراج اطلاعات فیزیکی و ساختن تفسیرهای معتبر با به‌کارگیری صرفاً سیگنال مرکب و بدون استفاده از پالایه‌های رقیمی را با مشکل مواجه می‌کند؛ بنابراین در مطالعات جوی به‌منظور جداسازی تغییرپذیری هدف از طیف کلی، از روش‌های کارآمد مانند پالایش رقیمی به‌طور گسترده استفاده می‌شود (دکی و پایدالیور، ۱۹۹۵؛ پلاوارپو و همکاران، ۲۰۰۰؛ فیسر، ۲۰۰۶؛ دی اولیویرا و همکاران، ۲۰۰۹؛ مون و همکاران، ۲۰۱۸؛ پوهل و همکاران، ۲۰۱۸؛ نی و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰). این روش‌ها به‌طور کلی برای حذف نوفه بسامد بالا، هموارسازی سیگنال و همچنین جداسازی یک نوار طیفی خاص در این حوزه مورد توجه هستند.

پالایه‌ها در مراکز پیش‌بینی عددی وضع هوا برای حذف نوفه‌ها در پیش‌بینی‌ها به‌کار می‌روند. برای مثال برای

پالایه‌های رقیمی جزء لاینفک تحلیل سیگنال‌های گسسته زمانی یا فضایی هستند. در واقع سیگنال‌ها توابعی از یک یا چند متغیر مستقل‌اند که معمولاً اطلاعاتی در مورد رفتار و طبیعت یک پدیده در بر دارند (اپنهایم و ورقسی، ۲۰۱۷). هدف کلی از پالایش سیگنال‌های هواشناسی تحلیل مجزای مؤلفه‌های فوریه است که توصیف‌کننده آن سیگنال است. این فرایند با اصلاح یک توالی از داده‌ها توسط یک سری از وزن‌ها که تابع وزن پالایه نامیده می‌شوند، به‌منظور تولید مجموعه جدیدی از داده‌ها انجام می‌شود (دوچون، ۱۹۷۹). با به‌کارگیری این پالایه‌ها می‌توان اثرات فیزیکی و تناوبی پدیده‌های مختلف در سیگنال‌های هواشناسی و اقلیمی را از نوفه‌های تصادفی جداسازی کرد. به‌عبارتی، پالایه‌ها برای جداسازی اطلاعات ترکیب‌شده در یک سیگنال مرکب به‌کار می‌روند (رایموند و گاردنر، ۱۹۹۱).

از طرف دیگر پیچیدگی‌های موجود در سیگنال‌های

وانگ و همکاران (۲۰۱۸) به منظور بررسی بسامد رخداد نوسان مادن-جولیان (MJO Madden-Julian Oscillation) بر روی تغییرپذیری درون سالانه فعالیت موج استراتوسفری در نیمکره شمالی و در فصل زمستان، برای همه میدان‌های تحت بررسی به استثنای شاخص MJO، ابتدا چرخه فصلی را از داده‌ها حذف کردند. سپس یک پالایه رقمی بالاگذر بر روی سری‌های زمانی روزانه اعمال کردند. پالایه بالاگذر به گونه‌ای انتخاب شده بود که تغییرات جوی در مقیاس زمانی درون فصلی حفظ شوند و دیگر عوامل مانند نوسان شبه دوساله QBO (Quasi-Biennial Oscillation) یا نوسان جنوبی ENSO (El Niño-Southern Oscillation) در نظر گرفته نشوند، زیرا این عوامل ممکن است ارتباط بین MJO و فعالیت موج در استراتوسفر جنب استوایی را مغشوش کنند.

لی و همکاران (۲۰۱۹) تغییرپذیری‌های دهه‌ای SST را در جنوب شرق اقیانوس هند و تأثیر آن را بر روی اقلیم منطقه‌ای بررسی کردند. برای هر متغیر جوی و اقیانوسی، چرخه فصلی اقلیمی و روند خطی برای به دست آوردن بی‌هنجاری حذف شده است و سپس یک پالایه رقمی پایین‌گذر با بسامد قطع ۵ساله و پنجره‌گذاری شده به روش هنینگ (von Hann) به منظور برجسته‌سازی تغییرپذیری‌های دهه‌ای استفاده شده است. نتایج آنها حساس به انتخاب نوع پالایه نبود. آنها همچنین پالایه‌های پایین‌گذر ۷ و ۹ ساله را استفاده کردند و نتایج آنها خیلی تغییر عمده‌ای نداشت.

چندین روش برای مسئله پالایش وجود دارد. ساده‌ترین راه به کار بردن میانگین بلوک در زمان است. نوع پالایه به کار رفته به ویژگی داده‌ها و مقیاس‌های زمانی پدیده مورد بررسی، بستگی دارد. برای تعیین مؤلفه تغییرات دهه‌ای در سیگنال اصلی، پالایه پایین‌گذر با بسامد قطع پایین می‌تواند به کار می‌رود. نوار فصلی تا بین‌سالی با به کار بردن یک پالایه نوارگذر که عرض نوار گذر آن بین ۳ ماه تا ۵ سال متغیر است، می‌تواند جداسازی شود، در حالی که نوار درون‌فصلی (تغییرات پُربسامد) با یک

مقداردهی آغازین مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا و به‌منظور کاهش مؤلفه‌های موج گرانی ساختگی تا یک سطح واقع‌بینانه این روش مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و باعث حذف این مؤلفه‌های بسامد بالا می‌شود (هوآنگ و لینگ، ۱۹۹۳؛ گوستافسن، ۱۹۹۲؛ اشرفی و همکاران، ۱۳۹۰؛ پکهام و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین توانایی روش پالایش رقمی برای کنترل نوفه بسامد بالا در پیش‌بینی‌های عددی وضع هوای بر پایه معادلات بسط در محتوای سامانه داده‌گواری جهانی توسط فیلون و همکاران (۱۹۹۵) آزمایش شده است.

پالایه‌های رقمی نوارگذر نیز به‌طور وسیعی در روش‌های مطالعه تغییر اقلیم و تغییرپذیری اقلیم به کار می‌روند. دوچون (۱۹۷۹) تصویر کاملی از آنچه که می‌توانست با پالایش رقمی از نوع لانکروس (Lanczos) انجام شود، پیشنهاد کرد و نتایج مطالعات او در بسیاری از تحقیقات بعدی مورد استفاده قرار گرفت (برای نمونه: کسکای و کایانو، ۱۹۹۴؛ لزنز، ۱۹۹۶؛ ایچیکاوا و یاسوناری، ۲۰۰۸؛ هوایل و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱). سادگی محاسبه وزن‌ها و پاسخ مناسب این پالایه، آن را تبدیل به روشی جذاب برای پالایش سیگنال‌ها کرده است.

پلاوارپو و همکاران (۲۰۰۰) به بررسی داده‌گواری وردشی چهار بعدی (4DVAR Four Dimensional Variational Data Assimilation) همراه با آغازگری به روش پالایه رقمی پرداختند. هدف از کار آنها ارزیابی تأثیر اضافه کردن قید ضعیف و قوی بر روی تحلیل‌های 4DVAR بود. هر دو نوع قید به کار رفته، امواج گرانی ساختگی بسامد بالا را با به کارگیری پالایه رقمی برای هموار کردن "تحلیل" در این روش داده‌گواری کنترل کرد. از آنجایی که رویکرد پالایه رقمی در بحث آغازگری مدل‌های عددی وضع هوا، فقط وابسته به بسامدهای بالا است، منطقی است که انتظار داشته باشیم کاربرد رویکرد پالایه رقمی، نتایج مشابه با روش‌های دیگر تولید کند.

همیشه مطلوب نیستند. در بسیاری از کاربردهای هواشناسی، بخش‌هایی از سیگنال اصلی که باید جدا شوند، در نوارهای بسامدی کاملاً مجزا قرار ندارند. در این وضعیت‌ها گذر تدریجی از نوار عبور به نوار قطع ترجیح داده می‌شود (اپنهایم و ورقسی، ۲۰۱۷). همچنین در موقعیت‌هایی که قطع سریع‌تر برای پالایه واقعی ترجیح داده می‌شود، تیز شدن لبه نوار عبور یا نوار قطع، مشروط به طولانی شدن پاسخ ضربه پالایه (Impulse Response) خواهد بود.

به‌طور کلی از لحاظ کاربردی یک پالایه پایین‌گذر خوب باید مشخصه‌هایی مانند نقطه قطع تیز، نوار گذر نسبتاً هموار، پاسخ گذرای خالص، انتقال فاز صفر و زمان محاسبه قابل قبول داشته باشد. به‌عنوان یک قانون در این زمینه، بسیاری از ویژگی‌های مطلوب دو به دو ناسازگارند و بنابراین محدودیت‌های شدیدی برای رسیدن به پالایه مطلوب وجود دارد (امری و تامسون، ۲۰۱۴).

به‌منظور پالایش سیگنال ورودی در حوزه زمان و به‌دست آوردن سیگنال گسسته پالایش شده، عملیات پیچش (Convolution) بر روی سیگنال ورودی و پاسخ ضربه پالایه رقمی به‌صورت زیر انجام می‌شود:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k]h[n-k] \quad (1)$$

عملیات پیچش در حوزه زمان، معادل با ضرب طیف مربوط به سیگنال اصلی در طیف پاسخ ضربه (یا همان پاسخ بسامدی پالایه) در حوزه بسامد (فوریه) است. در صورتی که این ضرب طیفی برای طیف گسسته انجام شود و فرایند تبدیل فوریه معکوس نیز انجام شود، سیگنال پالایش شده خروجی به‌دست خواهد آمد؛ بنابراین اعمال پالایه هم می‌تواند در حوزه زمان و هم در حوزه بسامد باشد.

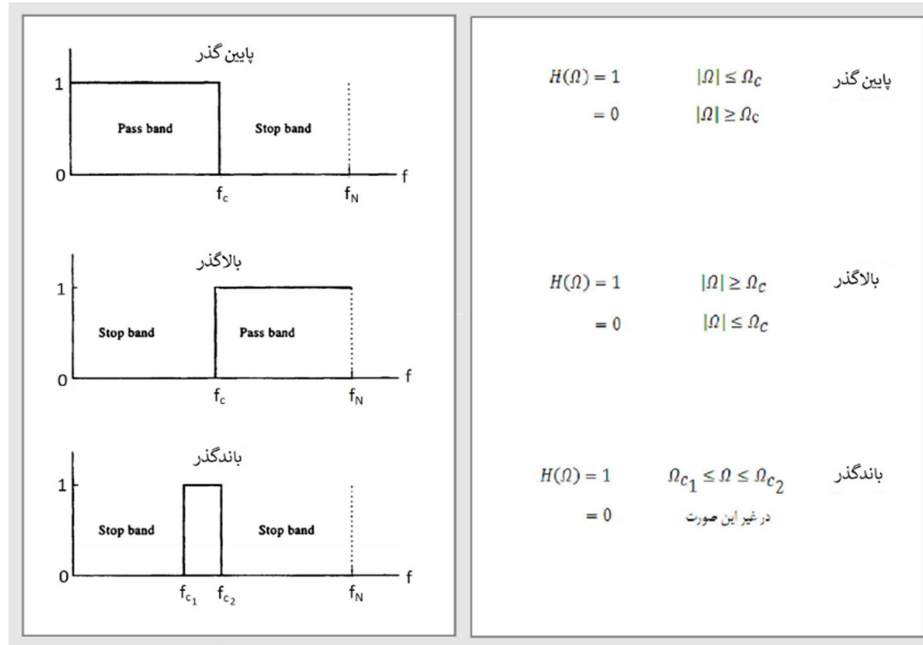
پالایه بالاگذر با بسامد قطع بزرگ (معادل با تغییرات زمانی کمتر از ۳ ماه) می‌تواند ساخته می‌شود (کارتون و جیس، ۲۰۰۸).

از آنجایی که کاربرد پالایه‌ها در مطالعات علوم جوی روز به روز گسترده‌تر می‌شود، تحقیق حاضر به بررسی بعضی جنبه‌ها و کاربردهای این روش در پالایش سیگنال‌های مرتبط می‌پردازد. هدف در اینجا آشنایی با عملکرد پالایه‌های مختلف و انتخاب پالایه مناسب در زمینه هموارسازی، حذف نوفه و یا جداسازی بخش‌های مختلف از سیگنال‌های جوی دما و بارش است. برای این منظور تعدادی پالایه رقمی بر روی داده‌های نمونه بارش ماهانه و دمای سطحی ماهانه در یک دوره آماری ۴۲ ساله اعمال شده و نقاط ضعف و قوت هر روش به‌طور کامل توصیف شده است. در ادامه ابتدا پالایه‌های رقمی و روش پنجره‌گذاری که در این تحقیق استفاده شده معرفی می‌شوند. سپس داده‌های انتخابی برای اعمال فرایند پالایش توصیف می‌شوند. همچنین نتایج اعمال پالایه بر سیگنال‌های هواشناسی با جزئیات شرح داده می‌شوند و در نهایت نتایج نهایی تحقیق خلاصه شده‌اند.

۲. روش تحقیق

پالایه‌های رقمی در حالت کلی به سه دسته پایین‌گذر، نوارگذر و بالاگذر تقسیم می‌شوند. پالایه‌های پایین‌گذر نقش هموارسازی سیگنال‌ها را دارند و می‌توانند برای ساختن دیگر انواع پالایه‌ها به کار روند. پاسخ بسامدی پالایه‌های بالاگذر، پایین‌گذر و نوارگذر آرمانی در شکل ۱ نشان داده شده است که به‌صورت یک تابع پله‌ای عمل می‌کند و در بسامد قطع f_c مقدار پاسخ بسامدی به‌طور آنی از صفر به یک یا از یک به صفر تغییر می‌کند.

در عمل مشخصه‌های قطع ناگهانی پالایه‌های آرمانی


 شکل ۱. پاسخ بسامدی پالایه‌های پایین‌گذر، بالاگذر و نوارگذر آرمانی ($\Omega_c = 2\pi f_c$).

ورودی است و درجه هموارسازی با افزایش M افزایش می‌یابد.

برای تبدیل پالایه میانگین متحرک پایین‌گذر به یک پالایه نوارگذر، پاسخ ضربه پالایه را در $\cos n\Omega_0$ ضرب می‌کنیم که Ω_0 بسامد زاویه‌ای مرکزی پالایه جدید است. این تکنیک می‌تواند برای طیف گسترده‌ای از پالایه‌ها با پهنای نوار مشخص و بسامدهای مرکزی مختلف پیاده‌سازی شود. یک پالایه بالاگذر با ضرب پاسخ ضربه در $\cos n\pi$ ساخته می‌شود که در این حالت پالایه اثر وارونگی پیدا می‌کند. در هر دو حالت بالا $-M \leq n \leq +M$ می‌باشد (لین و فرست، ۱۹۹۴).

طراحی پالایه‌های رقمی غیربازگشتی به روش پنجره‌گذاری کاربرد زیادی دارد. در این حالت یک پنجره با طول محدود در پاسخ ضربه پالایه ضرب می‌شود که این پنجره معین می‌کند چه مقدار از پاسخ ضربه بایستی دیده شود (عملیات بریدگی یا قطع $h[n]$). پنجره‌ها می‌توانند به صورت مربعی، مثلثی یا کسینوسی تعمیم‌یافته باشند که هر کدام از آنها به نوبه خود دارای مزایا و معایبی هستند. پالایه‌هایی که روش پنجره‌گذاری کسینوسی را برای تضعیف اثرات نوسان‌های گیبس در

پالایه‌های رقمی میانگین متحرک (MA) به‌طور گسترده‌ای در تحقیقات مرتبط با علوم جوی و اقیانوسی استفاده می‌شوند (امری و تامسون، ۲۰۱۴). آنها در حالت کلی پایین‌گذر هستند، اما می‌توان آنها را به‌عنوان پالایه بالاگذر و نوارگذر هم به‌کار برد. باید توجه داشت که ممکن است پالایه میانگین متحرک ساده برای بعضی از کاربردها مناسب نباشد و انتخاب‌های زیاد دیگری در این زمینه وجود دارد (به‌طور نمونه: بارتلت (Bartlett)، بلاکمن (Blackman)، همینگ (Hamming)، هنینگ (Von Hann)، دلف-چیچف (Dolph-Chebyshev)، کایزر (Kaiser) و غیره).

پاسخ ضربه یک پالایه میانگین متحرک پایین‌گذر غیرعلی (متقارن نسبت به نقطه مبدأ، دارای مقادیر غیرصفر در n منفی) به‌ازای M نقطه و همچنین پاسخ بسامدی آن به‌صورت زیر است (لین و فرست، ۱۹۹۴):

$$h[n] = \frac{1}{2M+1} \quad -M \leq n \leq M \quad (2)$$

$$h[n] = 0 \quad \text{در غیر این صورت}$$

$$H(\Omega) = \frac{1}{2M+1} [1 + 2 \sum_{k=1}^M \cos k\Omega] \quad (3)$$

عمل این پالایه در حالت پایین‌گذر، هموارسازی سیگنال

شکل ۲ نشان داده شده است. مقادیر ثابت در رابطه‌های تعریف این پنجره‌ها باعث می‌شود که همه نمونه‌ها مقدار مثبت داشته باشند.

تحقق انواع مختلف پالایه‌های میانگین متحرک پایین‌گذر، بالاگذر و نوارگذر بر روی سیگنال گسسته ساخته شده از داده‌های انتخابی مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پنجره‌گذاری به روش همینگ نیز به‌طور جداگانه بررسی شده است. عملیات پالایش رقمی بر روی سیگنال توسط برنامه‌های کامپیوتری در محیط نرم‌افزار Matlab انجام شده است. پس از اعمال پالایه‌ها، سیگنال‌های زمانی هموار شده (نوفه‌گیری شده)، مؤلفه پُرسامد و همچنین مؤلفه جداسازی شده در یک نوار بسامدی خاص با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به این که هدف از به‌کارگیری پالایه‌های پایین‌گذر هموارسازی سیگنال‌هاست، این پالایه‌ها به‌طور مستقیم بر روی داده‌های اصلی و بدون حذف روند خطی تغییرات داده‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. اما برای اعمال پالایه‌های بالاگذر و نوارگذر، روند خطی از داده‌های اولیه حذف شده است تا پالایش سیگنال از مؤلفه بسامد صفر (میانگین) کمتر تأثیر پذیرد. پالایه‌های بالاگذر صرفاً جهت جداسازی مؤلفه‌های بسامد بالا در داده‌های انتخابی استفاده شده‌اند که اساساً هدف از به‌کارگیری آنها جداسازی و نمایش نوفه‌ها است. علاوه بر اعمال پالایه‌ها بر سیگنال‌ها، همبستگی‌های سیگنال‌های زمانی در نوارهای بسامدی معجزا به منظور یافتن ارتباط خطی احتمالی یا رفتار مشابه محاسبه شده‌اند.

۳. داده‌ها

در این تحقیق داده‌های مجموع بارش ماهانه و دمای سطحی میانگین ماهانه در دو ایستگاه منتخب (تهران و تبریز) برآورد شده و مورد استفاده قرار گرفته است. ابتدا داده‌های بارش روزانه بر اساس داده‌های مبتنی بر باران‌سنج مرکز پیش‌بینی اقلیمی CPC (Climate Prediction Center) بر روی نقاط شبکه با تفکیک ۰/۵ درجه استخراج شده و سپس با میانگین‌گیری نزدیک‌ترین

پاسخ بسامدی پالایه به‌کار می‌برند، شامل پالایه‌های همینگ، هنینگ و لانکروس هستند. پنجره‌گذاری مشابه با روش‌های دیگر پالایش سیگنال می‌تواند در حوزه زمان یا بسامد انجام شود. در حوزه زمان، پاسخ ضربه پنجره $w[n]$ در پاسخ ضربه پالایه رقمی ضرب می‌شود و پالایه رقمی جدید از حاصل ضرب آنها در حوزه زمان ساخته می‌شود.

نوسان‌های گیس که در اطراف نوار اصلی گذر یک پالایه واقعی در پاسخ بسامدی آن پالایه ایجاد می‌شوند، شکل نوار گذر را تغییر می‌دهند و نوارهای گذر جانبی و ناخواسته را برای آن پالایه خاص ایجاد می‌کنند. اگر طول پنجره مربعی در حوزه زمان افزایش یابد، طیف مربوط به آن باریک‌تر می‌شود و نوسان‌های گیس در پیرامون بسامد قطع تجمع پیدا می‌کنند؛ بنابراین انتقال از نوار گذر به نوار قطع پالایه سریع‌تر اتفاق می‌افتد. همچنین هر چه پنجره اعمال شده تعداد جملات بیشتری داشته باشد، عملکرد پالایه از لحاظ قطع سریع در بسامد قطع انتخابی بهتر می‌شود. معمولاً با بررسی نوسان‌های گیس در هر پالایه با پنجره اعمال شده می‌توان عملکرد پنجره‌های مختلف را با هم مقایسه کرد.

پنجره‌های کسینوسی تعمیم‌یافته بسیار مناسب هستند و به‌طور گسترده‌ای در طراحی پالایه‌های رقمی غیربازگشتی برای کاربردهای جوی و اقیانوسی استفاده می‌شوند. رابطه کلی تعریف پنجره‌های همینگ و هنینگ با $M+1$ جمله و تابع طیف کلی این پنجره‌ها به‌صورت زیر است (لین و فرست، ۱۹۹۴):

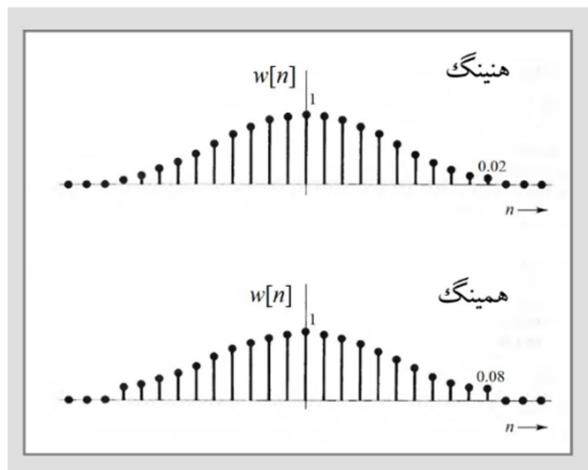
$$w[n] = A + B \cos\left(\frac{n\pi}{c}\right) \quad -M \leq n \leq M \quad (۴)$$

$$w[n] = 0 \quad \text{در غیر این صورت}$$

$$W(\Omega) = w(0) + 2 \sum_{k=1}^M w[k] \cos(k\Omega) \quad (۵)$$

برای پنجره هنینگ در رابطه (۴) مقدار $A=B=0.5$ و $C=M+1$ در نظر گرفته می‌شود. اما برای پنجره همینگ، $A=0.54$ ، $B=0.46$ و $C=M$ در نظر گرفته می‌شود. پنجره هنینگ و همینگ با ۲۱ جمله ($M=10$) در حوزه زمان در

نیست، اما به طور کلی دامنه نوسان‌های گیس در بسامدهای بالاتر نسبت به پالایه ۷ وزنی، کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. پنجره هیننگ و همینگ با ۲۱ جمله (لین و فرست، ۱۹۹۴).

در شکل ۳-ب، پنجره‌گذاری به روش همینگ بر روی پاسخ ضربه پالایه انجام شده است. برای پالایه میانگین متحرک ۷ وزنی، بعد از اعمال پنجره نوسان‌های بیشتری حتی نسبت به حالت بدون پنجره‌گذاری (شکل ۳-الف) قابل مشاهده است. انتظار بر این است که با روش پنجره‌گذاری عملکرد بسامدی پالایه بهبود پیدا کند، اما در اینجا نتایج نسبت به حالت قبل بدتر شده است. این وضعیت به این دلیل است که پنجره‌گذاری همینگ نوسان‌های گیس را به شدت تضعیف کرده است ولی عرض بخش اصلی پالایه در نمودار پاسخ بسامدی بیش از دو برابر شده است. بنابراین به مؤلفه‌های بسامدی بیشتری اجازه عبور داده شده است. به عبارت دیگر نوسان‌های با دامنه بالا در این شکل ناشی از نوسان‌های گیس نیست و به طور مستقیم در ارتباط با نوار اصلی گذر پالایه است. تأثیر افزایش وزن‌های پالایه با منحنی مشکی رنگ نشان داده شده است که درجه بالایی از هموارسازی را نشان می‌دهد. اثر پدیده گیس در این وضعیت بسیار تضعیف شده است، ولی نسبت به حالت بدون پنجره‌گذاری، عرض نوار اصلی عبور پالایه در نمودار پاسخ بسامدی دو برابر شده است (معادل با نقطه قطع ۱۰/۵ ماه در مقیاس

نقاط اطراف ایستگاه همدیدی، مقدار بارش در هر ایستگاه به ازای هر ماه برآورد شده است. داده‌های میانگین ماهانه دمای دو متری بر اساس داده‌های شبکه‌ای مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP National Center for Environmental Prediction) استخراج شده و سپس با درون‌یابی به روش میانگین‌گیری مقادیر در نزدیک‌ترین نقاط شبکه به ایستگاه مورد نظر، مقدار دما در آن ایستگاه‌ها برآورد شده است. این داده‌های ماهانه در یک دوره زمانی ۴۲ ساله (۱۹۷۹-۲۰۲۱) که شامل ۵۰۴ ماه است، مورد استفاده قرار گرفته است.

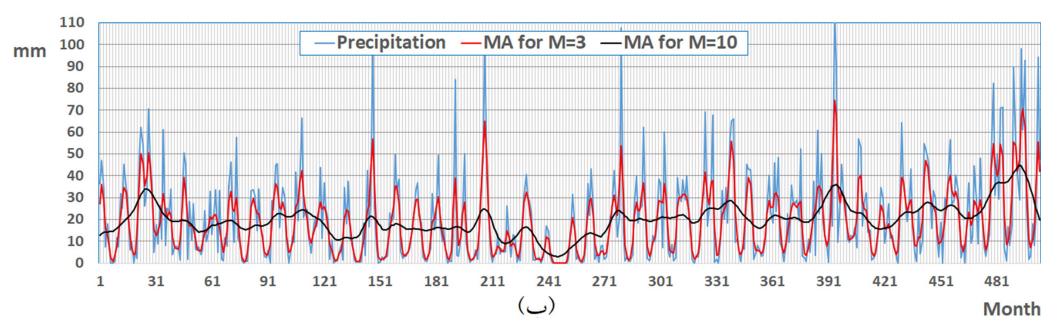
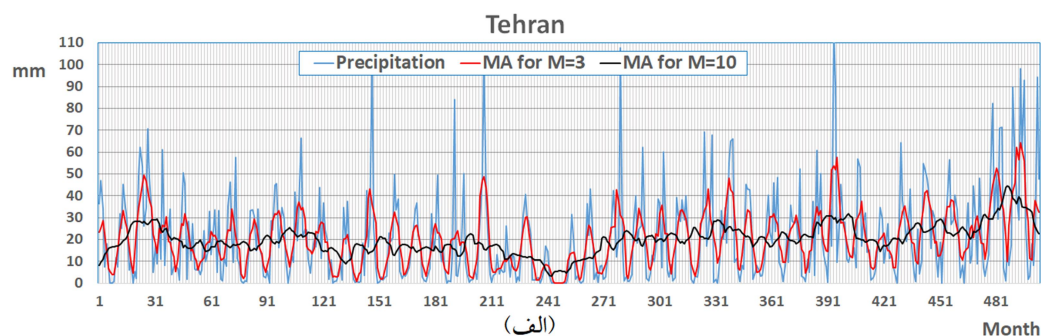
۴. بحث و بررسی نتایج

۴-۱. پالایه پایین‌گذر (هموارساز)

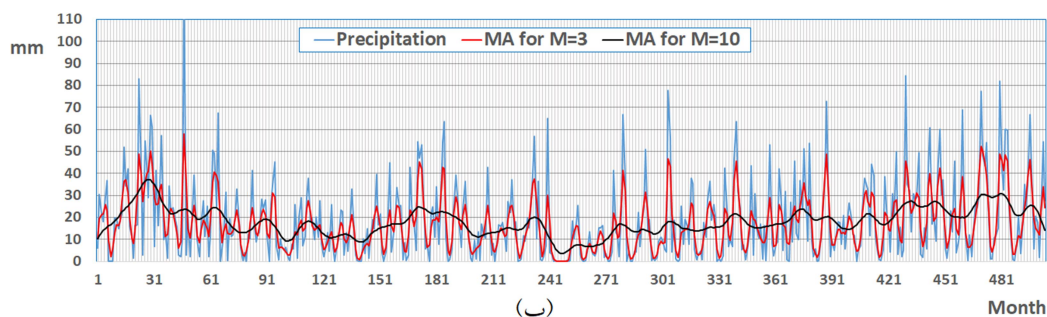
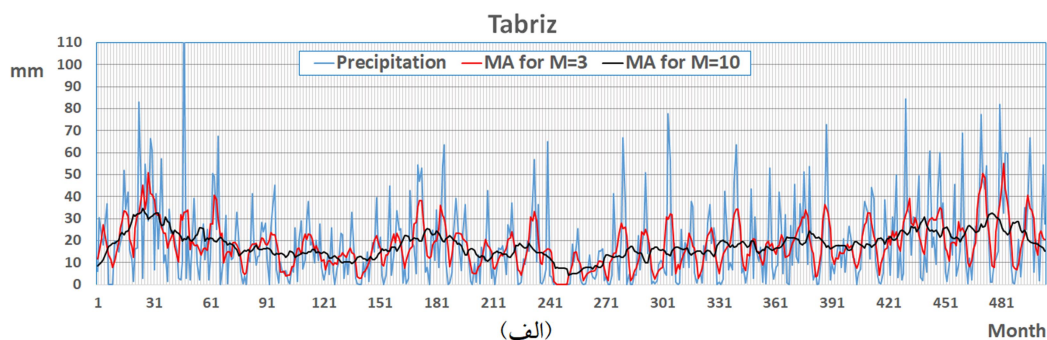
نتایج اعمال پالایه پایین‌گذر میانگین متحرک (MA) بر روی داده‌های بارش ماهانه تهران به مدت ۴۲ سال (۵۰۴ ماه) در شکل ۳ نشان داده شده است. پالایه با ۷ وزن ($M=3$) و ۲۱ وزن ($M=10$) در اینجا دارای عملکرد متفاوتی از لحاظ جداسازی بسامدی و هموارسازی سیگنال هستند. سیگنال هموار شده با پالایه ۷ وزنی (نمودار قرمز رنگ)، هموارسازی قابل توجهی را نشان نمی‌دهد (شکل ۳-الف). در این حالت عرض قسمت اصلی پالایه در منحنی پاسخ بسامدی برابر با $\Omega = 2\pi/7$ است (نقطه قطع معادل با ۷ ماه در مقیاس زمانی) و چند نوسان گیس با حداکثر ۲۰٪ دامنه قسمت اصلی گذر پالایه نیز وجود خواهد داشت. بنابراین از آنجایی که دامنه نوسان‌های گیس قابل توجه است، در سیگنال هموار شده مؤلفه‌های با دوره تناوب کمتر از ۷ ماه نیز با دامنه قابل توجه، ظاهر خواهند شد. سیگنال هموار شده با ۲۱ وزن (نمودار مشکی رنگ) درجه هموارسازی بالاتری را نشان می‌دهد، زیرا عرض قسمت اصلی گذر پالایه در نمودار پاسخ بسامدی کاهش یافته است ($\Omega = 2\pi/21$ ، معادل با نقطه قطع ۲۱ ماه در مقیاس زمانی). در این حالت هم به دلیل وجود تعداد زیادی نوسان‌های گیس با دامنه نسبتاً زیاد در پاسخ بسامدی پالایه، عملکرد هموارسازی مطلوب

هموارسازی با انتخاب وزن‌های بیشتر برای پالایه به همراه اعمال پنجره‌گذاری قابل حصول است. البته باید به این نکته نیز توجه داشت که در طراحی پالایه‌های رقمی بایستی انتخاب عملکرد مناسب با انتخاب کمترین تعداد وزن برای پالایه نیز همراه باشد و نباید تعداد وزن‌ها را بیش از حد لزوم افزایش داد.

زمانی). به‌طور مشابه با داده‌های بارش ماهانه تهران، پالایه پایین‌گذر بر روی داده‌های بارش ماهانه تبریز نیز اعمال شد و نتایج مشابهی به‌دست آمد که تأثیر این پالایش بر سیگنال بارش ماهانه تبریز در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل هم می‌توان مشاهده کرد که بیشترین



شکل ۳. اعمال پالایه پایین‌گذر میانگین متحرک با ۷ و ۲۱ وزن به داده‌های بارش ماهانه تهران، (الف) بدون پنجره‌گذاری، (ب) با پنجره‌گذاری همینگ.



شکل ۴. مشابه شکل ۳، اما برای داده‌های بارش ماهانه تبریز.

۴-۲. پالایه بالاگذر

پالایه بالاگذر میانگین متحرک برای جداسازی نوفه بسامد بالا از سیگنال اصلی بارش ماهانه در ایستگاه‌های تهران و تبریز مورد استفاده قرار گرفت. روند خطی تغییرات از سیگنال اصلی حذف شده است تا اثر مؤلفه بسامد صفر در سیگنال پالایش شده صفر شود. نتایج برای ایستگاه تهران در شکل ۵ و برای ایستگاه تبریز در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۵-الف، با افزایش وزن‌های پالایه از ۷ به ۲۱ وزن، نوسان‌های ناشی از اثر گیس در نمودار پاسخ بسامدی پالایه به تعداد بیشتر اما با دامنه کمتر رخ می‌دهد و بنابراین دامنه نوسان‌های سیگنال بارش در بسامدهای بالا با افزایش وزن‌ها کاهش یافته است (منحنی مشکی). همچنین با تغییر تعداد وزن‌ها، پهنای نوار گذر اصلی بسامدی در منحنی پاسخ بسامدی ۶۵٪ کوچک‌تر می‌شود. بنابراین منحنی مشکی جداسازی بسامدهای بالاتری را نسبت به منحنی قرمز نشان می‌دهد، گرچه بخش عمده‌ای از نوار بسامدی گذر هر دو پالایه یکسان است.

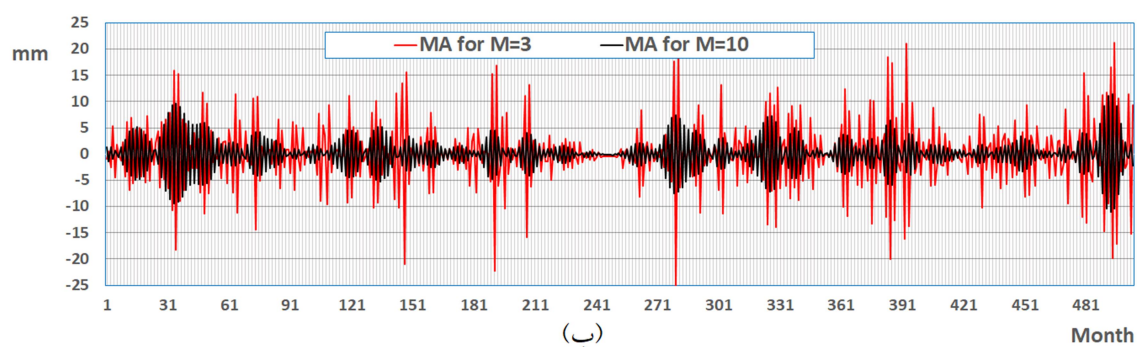
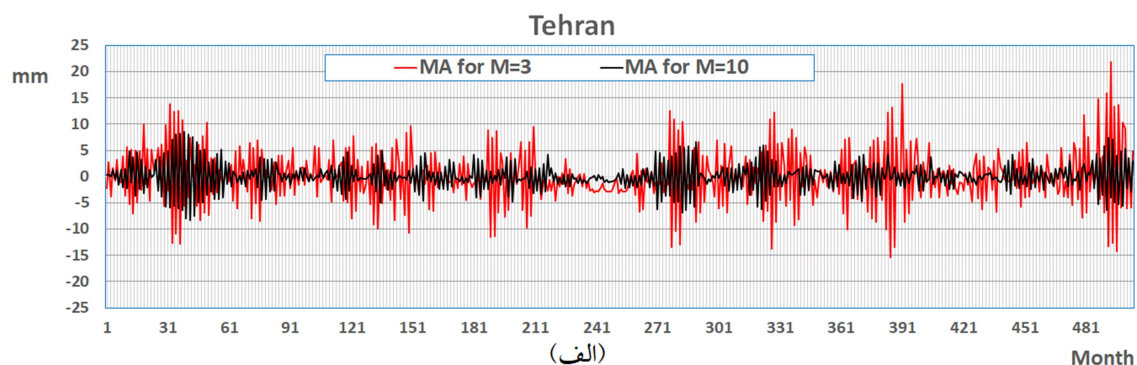
در شکل ۵-ب، پنجره‌گذاری به روش همینگ باعث افزایش دامنه نوفه‌ها مخصوصاً برای پالایه با تعداد وزن کمتر (منحنی قرمز) شده است. با پنجره‌گذاری همینگ نوسان‌های گیس در بسامدهای کمتر به شدت تضعیف می‌شوند، اما عرض نوار بسامدی اصلی گذر پالایه در این حالت تقریباً دو برابر می‌شود. بنابراین در این وضعیت بسامدهای پایین‌تر از طریق بخش اصلی گذر پالایه در نمودار پاسخ بسامدی عبور داده می‌شوند. این اختلاط بسامدی در حالتی که تعداد وزن‌ها کمتر باشد، منجر به افزایش بیشتر

در دامنه نوسان‌های سیگنال خواهد شد (منحنی قرمز).

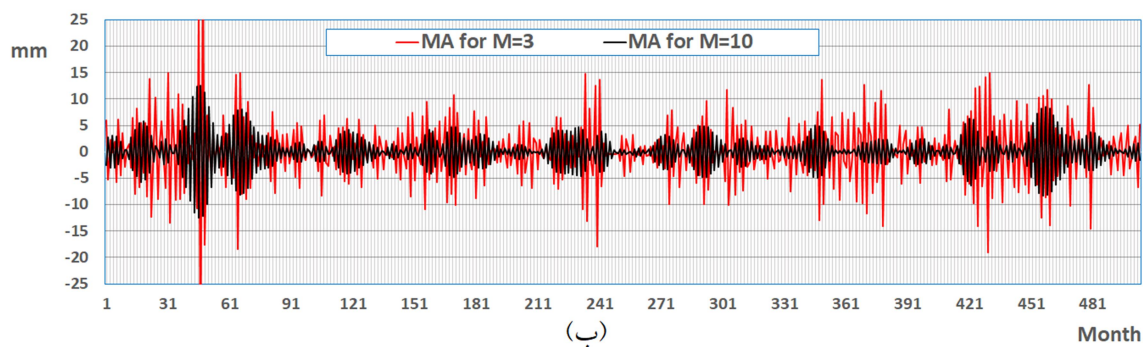
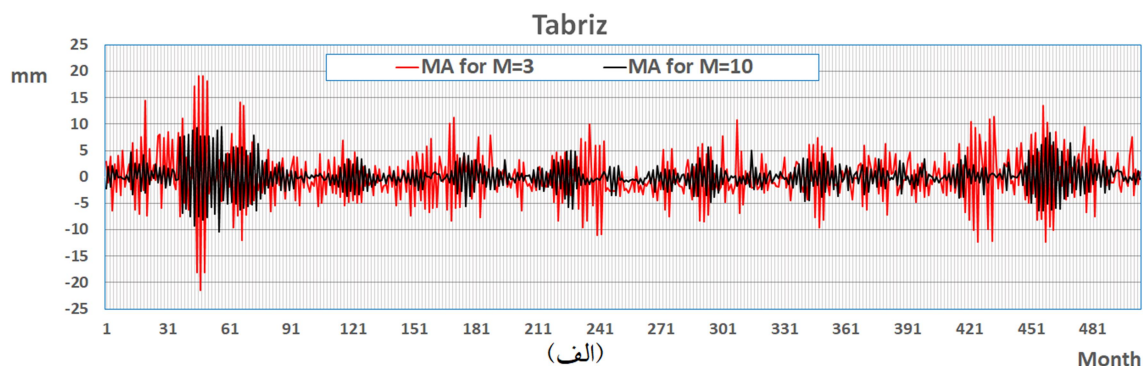
اعمال پالایه‌های بالاگذر برای جداسازی نوسان‌های بسامد بالا بر روی داده‌های بارش ماهانه تبریز (شکل ۶)، تأثیر مشابهی را در مقایسه با نوسان‌های بسامد بالا در داده‌های بارش ماهانه تهران نشان می‌دهد. به عبارتی در اینجا هم انتخاب وزن کمتر برای پالایه به دلیل پهن‌شدگی نوار گذر یا افزایش اثر گیس باعث افزایش دامنه نوسان‌ها در سیگنال شده است.

۴-۳. پالایه نوار گذر

پالایه نوار گذر میانگین متحرک برای جداسازی نوارهای فصلی، سالانه و بین‌سالی از سیگنال اصلی بارش ماهانه و دمای میانگین سطحی در ایستگاه‌های تهران و تبریز مورد استفاده قرار گرفت. در اینجا نیز روند خطی به منظور از بین بردن اثر مؤلفه بسامد صفر از داده‌ها حذف شده است. نوار فصلی طوری انتخاب شده است که مرکز آن در بسامد زاویه‌ای $\Omega_0 = \pi/2$ قرار گرفته است که مطابق با دوره تناوب چهار ماهه است. مرکز نوار سالانه در بسامد $\Omega_0 = \pi/24$ و مرکز نوار بین‌سالی در بسامد $\Omega_0 = \pi/101$ قرار گرفته است. پالایش فصلی در سه نوار انجام شده است (Band 1، Band 2 و Band 3) و پالایش سالانه و بین‌سالی هم هر کدام در دو نوار انجام شده است (Band 4 و Band 5 برای سالانه، Band 6 و Band 7 برای بین‌سالی). در هر کدام از این نوارها تعداد وزن‌های پالایه متفاوت است و بنابراین علی‌رغم یکسان بودن بسامد مرکزی در هر کدام از پالایه‌های فصلی، سالانه و بین‌سالی، عرض بخش اصلی گذر پالایه متفاوت خواهد بود. اثر پنجره‌گذاری همینگ نیز در هر کدام از نوارها مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۵. اعمال پالایه بالاگذر میانگین متحرک با ۷ و ۲۱ وزن به داده‌های بارش ماهانه تهران، (الف) بدون پنجره‌گذاری، (ب) با پنجره‌گذاری همینگ.



شکل ۶. مشابه شکل ۵، اما برای داده‌های بارش ماهانه تبریز.

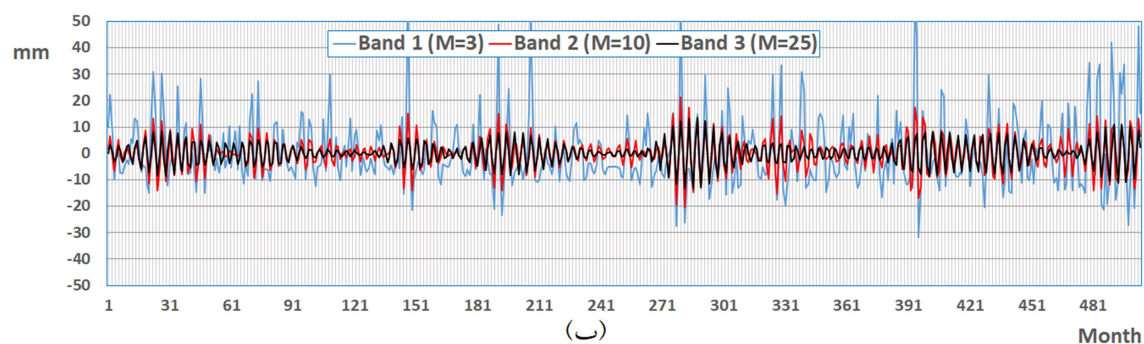
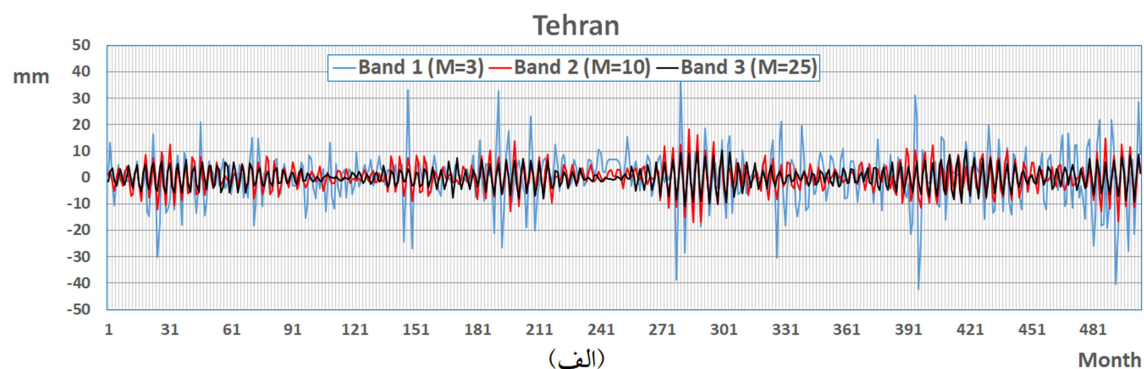
بهترین عملکرد مربوط به Band 3 خواهد بود، اما در صورتی که هدف جداسازی گستره بسامدی وسیع‌تری در اطراف بسامد مرکزی پالایه باشد (مثلاً دوره تناوب‌های ۳ تا ۶ ماه)، Band 2 قادر به نمایش بهتر تغییرپذیری‌های سیگنال در این گستره است.

فرایند پالایش فصلی برای سیگنال بارش ماهانه تبریز در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج اثر هر کدام از پالایه‌ها در Band 1، Band 2 و Band 3، هم در حالت بدون پنجره‌گذاری (شکل ۸-الف) و هم در حالت پنجره‌گذاری همینگ (شکل ۸-ب) از لحاظ دامنه و رفتار نوسان‌های جداسازی شده، مشابه با اثر همین پالایه‌ها بر سیگنال بارش در ایستگاه تهران است. همچنین مؤلفه فصلی در بعضی از سال‌ها قوی‌تر و در بعضی از سال‌ها ضعیف‌تر ظاهر شده است و دامنه یکسانی در طول دوره زمانی مورد بررسی ندارد. اگرچه شباهت‌هایی در دامنه سیگنال فصلی بارش بین دو ایستگاه تهران و تبریز در هر زمان خاص مشاهده می‌شود، اما تفاوت‌ها نیز بسیار برجسته هستند.

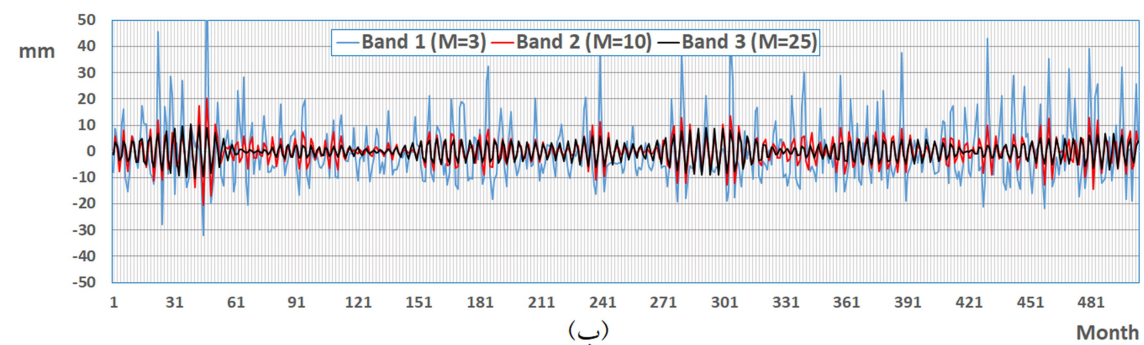
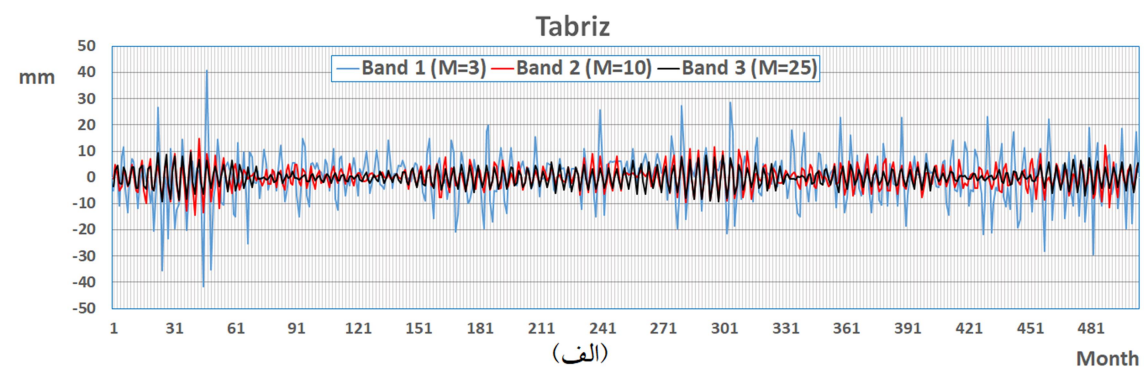
جداسازی مؤلفه بسامدی سالانه بارش توسط پالایه نوارگذر میانگین متحرک در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. این مؤلفه بسامدی در نتیجه واداشت سالانه تابش خورشید ایجاد می‌شود. با توجه به این که مؤلفه سالانه (با دوره تناوب ۱۲ ماه) تنها مؤلفه بسامدی غالب در سری زمانی دمای تهران و تبریز است، بنابراین اعمال پالایه منجر به گذر مناسب محتوای طیفی ۱۲ ماهه خواهد شد و تأثیر محتوای طیفی در دیگر بسامدها در سیگنال پالایش‌شده کمتر مشاهده می‌شود. با افزایش وزن‌های پالایه در Band 5 نسبت به Band 4، اختلاط بسامدی در سیگنال سالانه کمتر می‌شود. در روش همینگ چون عرض نوار گذر پالایه دو برابر می‌شود (شکل ۹-ب و ۱-ب)، دامنه نوسان‌ها مخصوصاً در Band 4 اندکی افزایش می‌یابد (به دلیل اختلاط بسامدی).

شکل ۷ جداسازی نوار بسامدی فصلی را برای داده‌های بارش ماهانه در ایستگاه تهران را نشان می‌دهد. در اینجا عرض قسمت اصلی گذر پالایه در Band 1 بیش از سه برابر Band 2 و در Band 2، دو برابر Band 3 است. کمتر بودن تعداد وزن‌های پالایه در هر نوار مشخص، منجر به افزایش دامنه پاسخ بسامدی به دلیل اثر گیس در خارج از بخش اصلی نوار گذر پالایه می‌شود، اما افزایش وزن‌ها تعداد نوسان‌های گیس را افزایش می‌دهند که البته دامنه این نوسان‌ها در این حالت کمتر است. بعد از اعمال پنجره‌گذاری همینگ در شکل ۷-ب، نوسان‌های گیس به شدت تضعیف می‌شوند. در این حالت چون عرض گستره گذر Band 1 نسبت به حالت بدون پنجره‌گذاری ۳۵٪ افزایش می‌یابد، کل گستره بسامدی سیگنال اصلی از پالایه عبور خواهد کرد، اما با دور شدن از نقطه بسامد مرکزی پالایه، مقدار عبور آن مؤلفه بسامدی به سرعت کاهش می‌یابد. در این حالت در Band 2 و Band 3 نیز عرض بخش اصلی عبور پالایه در نمودار پاسخ بسامدی افزایش یافته و تقریباً به دو برابر حالت بدون پنجره‌گذاری می‌رسد.

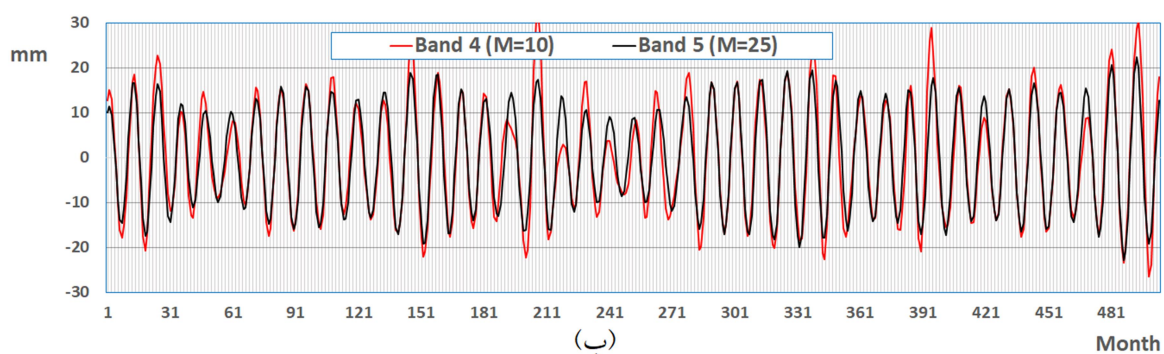
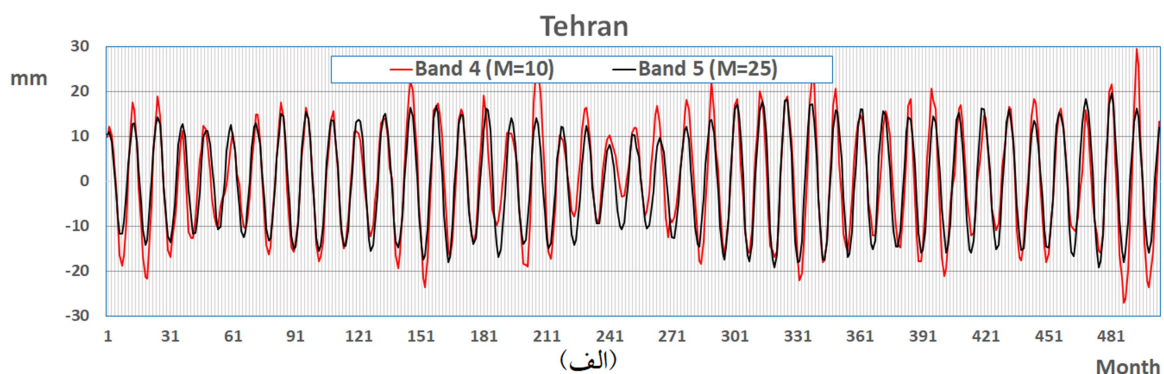
در شکل ۷-الف افزایش تعداد وزن‌ها در نوارهای مختلف منجر به کاهش دامنه نوسان‌ها در سیگنال خروجی شده است. به عبارت دیگر سیگنال پالایش‌شده از بسامدهای دورتر از بسامد مرکزی پالایه (معادل با دوره تناوب ۴ ماه)، تأثیرپذیری کمتری داشته است. در شکل ۷-ب با اعمال پنجره‌گذاری همینگ، عرض قسمت اصلی پالایه در مقایسه با حالت بدون پنجره‌گذاری (شکل ۷-الف) افزایش یافته و بنابراین در هر نوار، بسامدهای بیشتری از پالایه عبور می‌کنند. وقتی که تعداد وزن‌های پالایه کم باشد (Band 1)، اثر اختلاط بسامدی بیشتر خود را نشان می‌دهد (افزایش دامنه سیگنال به دلیل مؤلفه‌های طیفی با اهمیت). اگر هدف از فرایند پالایش جداسازی دوره تناوب‌های بسیار نزدیک به ۴ ماه از سیگنال اصلی باشد،



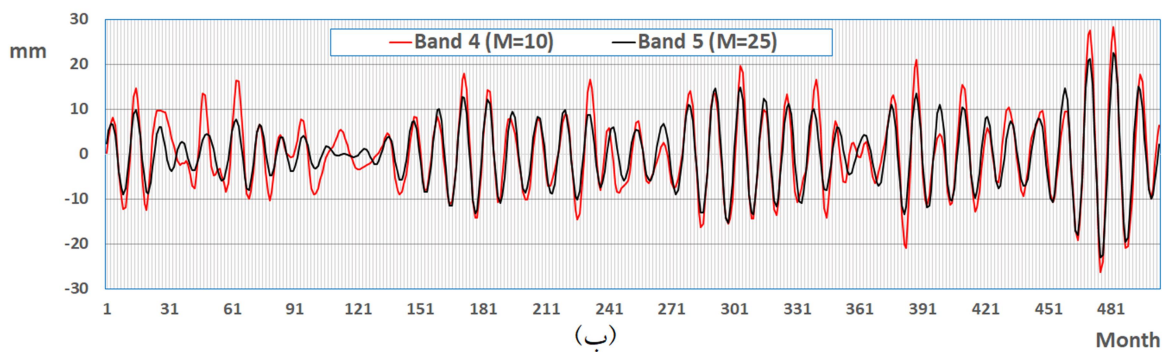
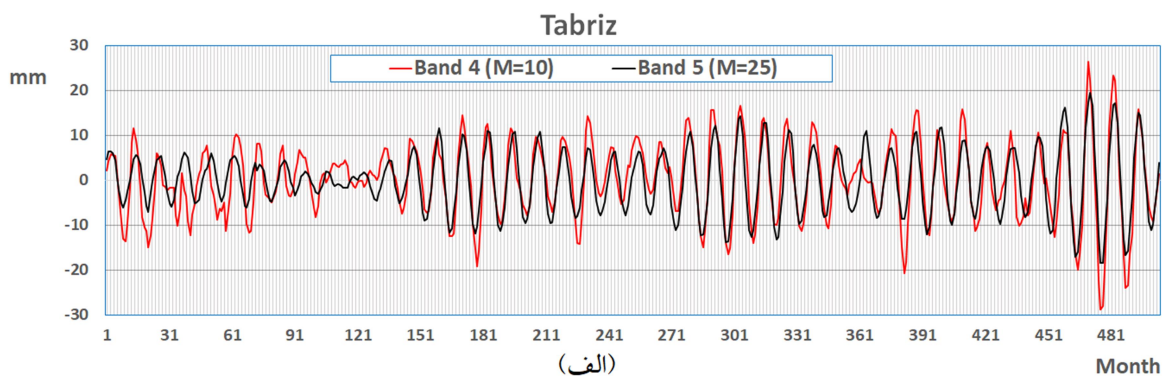
شکل ۷. جداسازی نوار بسامدی فصلی از داده‌های بارش ماهانه تهران با استفاده از پالایه نوارگذر میانگین متحرک با ۲۱ و ۵۱ وزن، (الف) بدون پنجره‌گذاری، (ب) با پنجره‌گذاری همینگ.



شکل ۸. مشابه شکل ۷، اما برای داده‌های بارش ماهانه تبریز.



شکل ۹. جداسازی نوار بسامدی سالانه از داده‌های بارش ماهانه تهران با استفاده از پالایه نوارگذر میانگین متحرک با ۲۱ و ۵۱ وزن، (الف) بدون پنجره‌گذاری، (ب) با پنجره‌گذاری همینگ.



شکل ۱۰. مشابه شکل ۹، اما برای داده‌های بارش ماهانه تبریز.

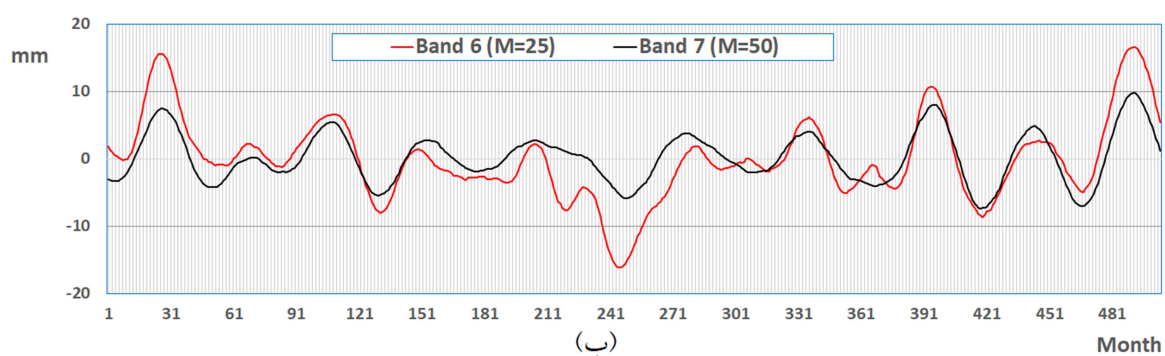
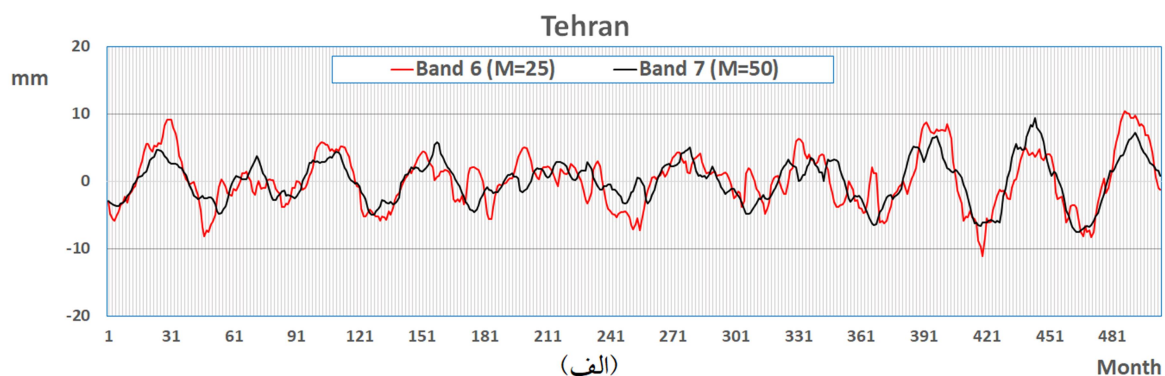
از این حالت‌ها به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در اینجا نوسان سالانه (منحنی مشکی، Band 5) بسیار منظم بوده و کاملاً از واداشت چرخش زمین به دور خورشید و تغییر فصل‌ها در عرض‌های جغرافیایی میانه پیروی می‌کند. با توجه به این که دامنه مؤلفه‌های طیفی فصلی و بین‌سالی دما بسیار کمتر است، به‌کارگیری پنجره‌گذاری همینگ تأثیر زیادی بر عملکرد پالایه در جداسازی مؤلفه سالانه دما در هر دو ایستگاه ندارد.

اختلاف فاز بین نوسان‌های سالانه ایستگاه تبریز و تهران بسیار کم است و تقریباً هر دو مؤلفه هم‌فاز هستند. همچنین دامنه نوسان سالانه در تبریز نسبت به تهران بیشتر است. این بیانگر این مطلب است که گستره اختلاف دما در سیگنال اصلی مرتبط با ایستگاه تبریز (سیگنال پالایش نشده) بین سردترین و گرم‌ترین ماه سال بیشتر از ایستگاه تهران است. مقدار بیشینه و کمینه نوسان سالانه دما در شکل ۱۳ و ۱۴ نسبت به دمای میانگین هر ماه کوچک‌تر است، زیرا همان‌طور که بیان شد، روند خطی (مؤلفه بسامد صفر) از سیگنال اصلی دمای هر دو ایستگاه قبل از فرایند پالایش رقیمی حذف شده‌اند و علاوه بر این، سیگنال سالانه فاقد مؤلفه‌های فصلی و بین‌سالی می‌باشد.

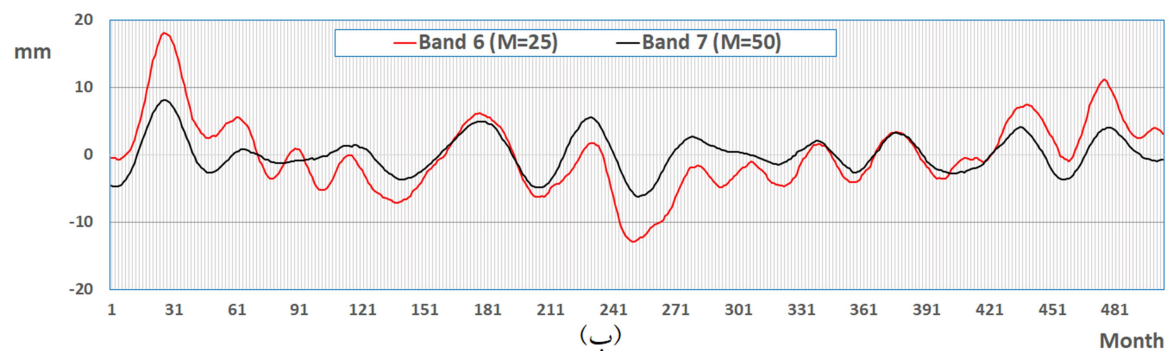
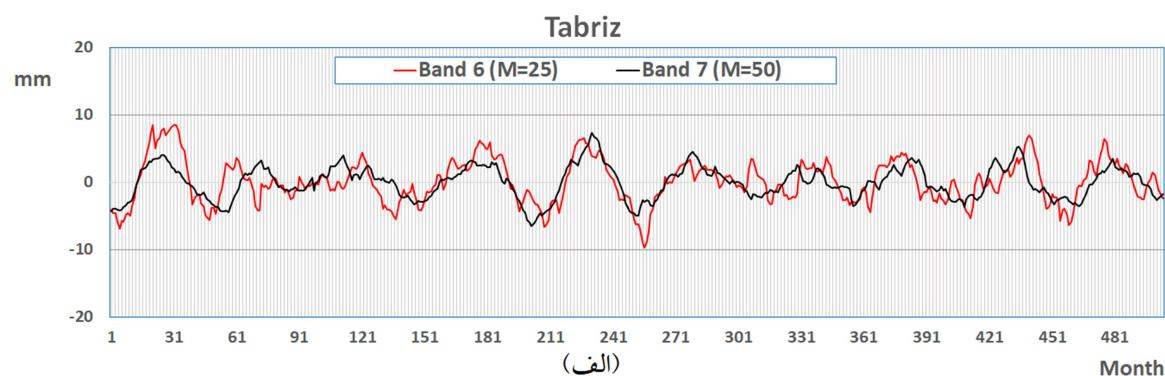
سیگنال پالایش شده دمای فصلی (Band 3) و دمای بین‌سالی (Band 7) برای ایستگاه‌های تهران و تبریز دارای دامنه بیشینه بسیار کوچکی در حد 1°C است. اگرچه این مقدار کم است، این به معنای بی‌اهمیت بودن آن بر اقلیم نیست. بدون اعمال پنجره‌گذاری همینگ (شکل ۱۳-الف و ۱۴-الف)، اختلاط بسامدی به دلیل اثر گیس مخصوصاً از بسامد سالانه دما که دارای توان طیفی قابل توجه است اتفاق افتاده و بنابراین سیگنال فصلی و بین‌سالی به خوبی پالایش نشده است.

جداسازی نوار بسامدی بین‌سالی از سیگنال‌های بارش مورد بررسی در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند. دوره تناوب معادل با بسامد مرکزی این پالایه نوارگذر معادل با ۵۰ ماه (تقریباً ۴ سال) است. در Band 6 بدون اعمال پنجره همینگ، عرض نوار اصلی گذر بسامدی پالایه و همچنین دامنه نوسان‌های گیس نسبت به Band 7 بیشتر است. در نتیجه اثرات اختلاط بسامدی در بسامدهای خارج از نوار اصلی گذر پالایه افزایش می‌یابد. بنابراین هم در ایستگاه تهران و هم در ایستگاه تبریز، نوسان‌های سیگنال در Band 6 بیشتر است. اعمال پنجره‌گذاری همینگ اثرات گیس را به شدت تضعیف می‌کند، اما متقابلاً نوار اصلی گذر پالایه تا حداکثر دو برابر نسبت به حالت بدون پنجره‌گذاری افزایش می‌یابد. اما علی‌رغم این افزایش نوار گذر، چون بسامدهای بالا به شدت تضعیف می‌شوند، منحنی همواری برای تغییرات بین‌سالی به دست می‌آید. افزایش نوار اصلی گذر در Band 6 منجر به عبور بخشی از سیگنال مرتبط با بسامد سالانه و پیرامون آن و در نتیجه اختلاط آن با سیگنال بین‌سالی شده است. به‌طور کلی دامنه تغییرات سیگنال بین‌سالی از سیگنال فصلی و سالانه در هر دو ایستگاه کمتر است. نوسان‌های ایجاد شده در دو ایستگاه نسبتاً مشابه است ولی زمان بیشینه و کمینه نوسان‌ها در هر سال با هم اختلاف فاز دارد.

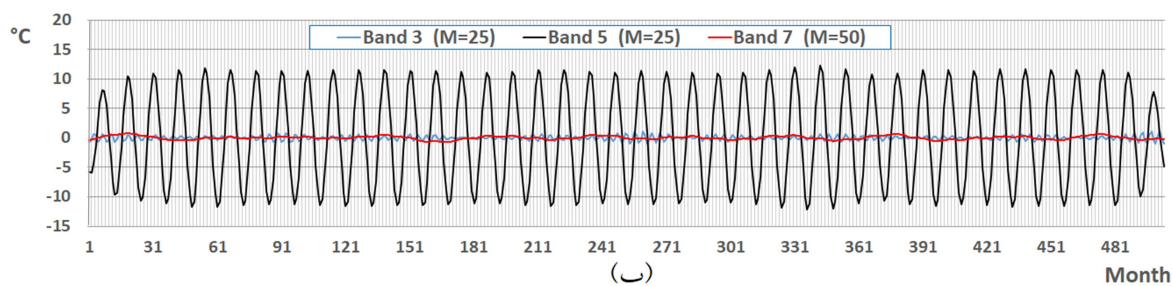
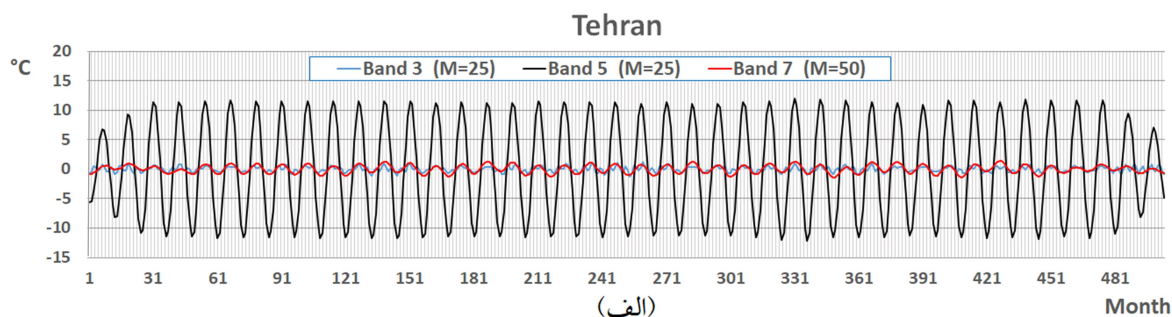
اثر پالایه رقیمی نوارگذر فصلی، سالانه و بین‌سالی بر روی سیگنال دمای سطحی میانگین ماهانه تهران و تبریز در شکل ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند. در اینجا تنها حالت‌هایی انتخاب شده‌اند که وزن‌های پالایه بیشتر بوده و در نتیجه عملکرد پالایه در پالایش سیگنال در محدوده بسامدی انتخابی بهتر است (Band 3، Band 5 و Band 7). اثر پنجره‌گذاری همینگ بر سیگنال خروجی نیز در هر کدام



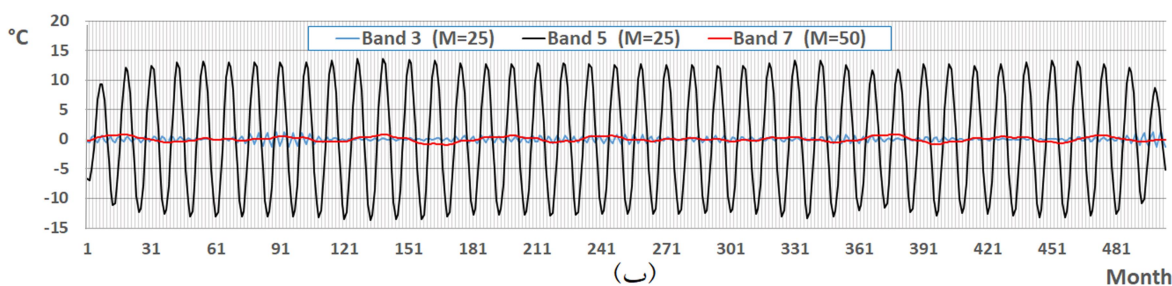
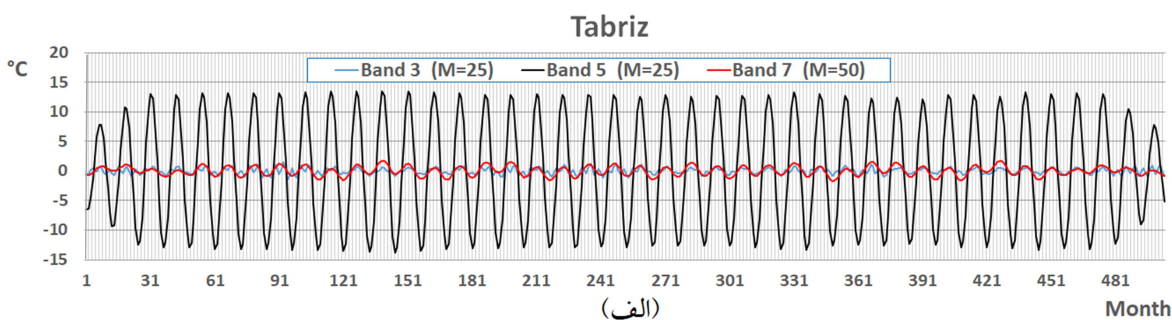
شکل ۱۱. جداسازی نوار بسامدی بین‌سالی از داده‌های بارش ماهانه تهران با استفاده از پالایه نوارگذر میانگین متحرک با ۵۱ و ۱۰۱ وزن، (الف) بدون پنجره-گذاری، (ب) با پنجره‌گذاری همینگ.



شکل ۱۲. مشابه شکل ۱۱، اما برای داده‌های بارش ماهانه تبریز.



شکل ۱۳. جداسازی نوار بسامدی فصلی و سالانه با ۵۱ وزن و بین سالی با ۱۰۱ وزن از داده‌های دمای میانگین ماهانه تهران با استفاده از پالایه نوارگذر میانگین متحرک، (الف) بدون پنجره‌گذاری، (ب) با پنجره‌گذاری همینگ.



شکل ۱۴. مشابه شکل ۱۳، اما برای دمای میانگین ماهانه تبریز.

۴-۴. تحلیل همبستگی

در این بخش همبستگی خطی بین سیگنال‌های پالایش شده در نوارهای بسامدی مختلف بین دو ایستگاه تهران و تبریز و همچنین بین دو سیگنال هواشناسی دمای سطحی و بارش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل ۱۵ مقدار ضریب

همبستگی پیرسون (%) بین سیگنال بارش ماهانه تهران و تبریز در نوارهای بسامدی فصلی، سالانه و بین سالی را نشان می‌دهد. در نوار فصلی (شکل ۱۵-الف)، بیشترین مقدار همبستگی در Band 3 بدون اعمال پنجره‌گذاری همینگ به میزان ۵۴٪ قابل مشاهده است (به دلیل تعداد

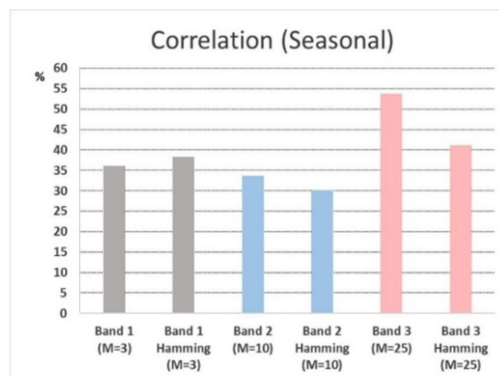
وزن بیشتر در رابطه پالایه رقمی). این افزایش همبستگی الزاماً به معنای بهتر بودن عملکرد پالایه در مقایسه با حالتی که روش همینگ اعمال شده است، نیست. اگر چه در روش همینگ نوار گذر پالایه افزایش پیدا می‌کند، اما به دلیل تضعیف نوسان‌های گیس اثر مؤلفه سالانه و بین‌سالی در پالایش فصلی ضعیف‌تر خواهد بود؛ بنابراین تصمیم در مورد اعمال پنجره همینگ در پالایش رقمی، به محتوای طیفی سیگنال اصلی مورد بررسی بستگی دارد.

در نوار سالانه در شکل ۱۵-ب بیشترین ضریب همبستگی مربوط به Band 5 و حالت بدون پنجره‌گذاری همینگ است. با پنجره‌گذاری همینگ ضریب همبستگی ۸٪ کاهش یافته است. در پالایش به روش همینگ، نوار گذر پالایه در اطراف بسامد مرکزی مرتبط با دوره تناوب یک‌ساله بیشتر است، اما اختلاط بسامدی از بسامدهای خیلی زیاد و خیلی کم در این حالت به دلیل تضعیف اثرات گیس کمتر خواهد بود. در نوار بین‌سالی در شکل ۱۵-ج بیشترین همبستگی در Band 6 همراه با اعمال روش همینگ است. زیرا در این حالت نوار گذر پالایه به دلیل کم بودن وزن‌ها و پنجره‌گذاری عریض‌تر می‌شود و در نتیجه مؤلفه سالانه که دارای توان قابل توجه است و همچنین مؤلفه‌های بین‌سالی با بسامد بسیار کم در داخل بخش اصلی گذر پالایه قرار می‌گیرند (البته با تأثیر کمتر). بنابراین این افزایش همبستگی ناشی از حضور بخشی از مؤلفه سالانه در سیگنال بین‌سالی است. در Band 7 به روش همینگ، علاوه بر عدم حضور مؤلفه سالانه در سیگنال خروجی، تضعیف اثرات گیس باعث عدم حضور دیگر مؤلفه‌های بسامد بالا و بسامد پایین در سیگنال بین‌سالی می‌شود. بنابراین این حالت با ضریب همبستگی تقریباً ۳۰٪ برای سیگنال‌های پالایش شده بارش تهران و تبریز، مقایسه بهتری از رفتار مؤلفه‌های بسامدی بین‌سالی در این دو ایستگاه را نشان می‌دهد.

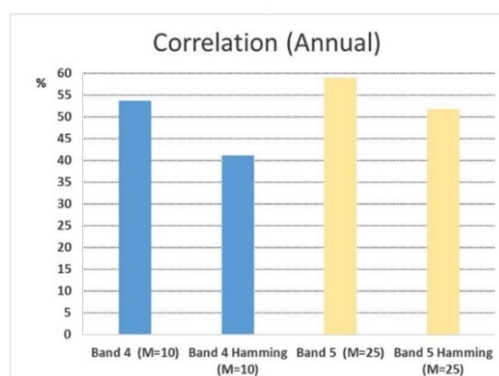
در شکل ۱۶، همبستگی بین سیگنال‌های دمای فصلی،

سالانه و بین‌سالی برای ایستگاه‌های تهران و تبریز نشان داده شده است. تأثیر پنجره‌گذاری به روش همینگ در هر نوار مشخص نیز بر ضریب همبستگی ارزیابی شده است. برای سیگنال دمای سطحی تنها پالایه‌هایی با تعداد وزن بیشتر که عملکرد بهتری در جداسازی سیگنال پالایش شده دارند، در اینجا مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Band 3، Band 5 و Band 7). در نوار فصلی (Band 3) همبستگی بین سیگنال دمای سطحی تهران و تبریز بدون پنجره‌گذاری همینگ حدود ۸۴٪ است که در این حالت بخشی از مؤلفه سالانه نیز از پالایه فصلی به دلیل نوسان‌های گیس عبور می‌کند و منجر به افزایش کاذب ضریب همبستگی فصلی می‌شود. اما بعد از اعمال پنجره‌گذاری همینگ علی‌رغم زیادشدن عرض بخش اصلی گذر پالایه، به دلیل تضعیف نوسان‌های گیس به مؤلفه سالانه اجازه عبور داده نمی‌شود؛ بنابراین ضریب همبستگی تا حدی کاهش می‌یابد و به ۷۴٪ می‌رسد که مقدار واقعی‌تری از میزان تشابه سیگنال پالایش شده فصلی بارش بین دو ایستگاه است.

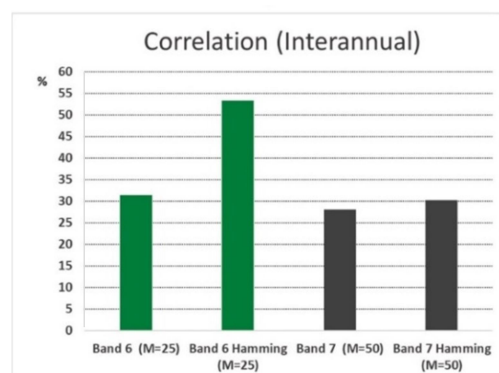
سیگنال سالانه پالایش شده (Band 5) همبستگی بسیار بالایی را نشان می‌دهد (بیش از ۹۹٪) که با پنجره‌گذاری همینگ اندکی افزایش می‌یابد؛ بنابراین برای جداسازی نوار سالانه که توان طیفی بالایی دارد، استفاده از پنجره‌گذاری همینگ ضرورتی ندارد. در نوار بین‌سالی (Band 7) بدون اعمال پنجره همینگ، همبستگی ۹۸٪ و همراه با پنجره‌گذاری همینگ به ۹۳٪ کاهش می‌یابد. افزایش همبستگی در این وضعیت بدون پنجره‌گذاری به دلیل اختلاط بسامد سالانه در پالایه میانگین متحرک ساده است که قادر به جداسازی دقیق سیگنال بین‌سالی نبوده است. در نتیجه مقدار همبستگی برای سیگنال بین‌سالی دما با پنجره‌گذاری همینگ واقعی‌تر است، البته تأثیر پنجره‌گذاری در این حالت بر روی مقدار همبستگی چشمگیر نیست.



(الف)

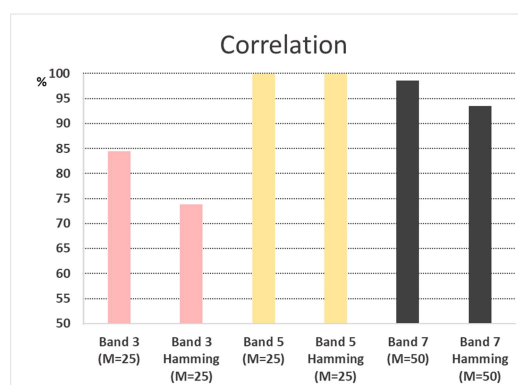


(ب)



(ج)

شکل ۱۵. ضریب همبستگی (%) بین بارش ماهانه تهران و تبریز در نوارهای بسامدی مختلف بدون در نظر گرفتن پنجره‌گذاری و همراه با پنجره‌گذاری همینگ در طراحی پالایه: (الف) نوار فصلی، (ب) نوار سالانه، (ج) نوار بین‌ساله.



شکل ۱۶. ضریب همبستگی (%) بین دمای تهران و تبریز در نوارهای بسامدی فصلی، سالانه و بین‌ساله.

جدول ۱ علاوه بر نمایش مقدار همبستگی (%) بین سیگنال‌های اصلی دمای سطحی و بارش ماهانه دو ایستگاه تهران و تبریز، مقدار همبستگی برای سیگنال‌های پالایش شده دما و بارش در مقیاس‌های فصلی، سالانه و بین‌سالی را نیز نشان می‌دهد. پالایه‌های انتخاب شده مشابه با شکل ۱۶، پالایه‌هایی هستند که بهترین عملکرد را در نمایش دقیق‌تر نوارهای فصلی، سالانه و بین‌سالی داشته‌اند. در مورد همبستگی‌های دمای سطحی، سیگنال فصلی کمترین رابطه خطی (همبستگی ۷۳/۸۲٪) و سیگنال سالانه بیشترین رابطه خطی را بین دو ایستگاه نشان می‌دهد (همبستگی ۹۹/۹۳٪). اما در مورد سیگنال‌های بارش دو ایستگاه، سیگنال بین‌سالی رابطه خطی کمتری را بین مقادیر بارش دو ایستگاه نسبت به مؤلفه‌های دیگر نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، همبستگی بین بارش و دمای سطحی در هر دو ایستگاه تهران و تبریز

تقریباً همیشه منفی است (نوسان‌های دو سیگنال در فاز مخالف). برای سیگنال اصلی پالایش نشده بارش و دما که شامل همه بسامدها (به استثنای بسامد صفر) است، مقدار همبستگی در ایستگاه تهران ۵۳/۵۴٪- است که در ایستگاه تبریز این همبستگی تقریباً نصف تهران است. با جداسازی سیگنال سالانه (Band 5) می‌توان دریافت که بزرگی همبستگی در این نوار بین سیگنال‌های دما و بارش هر دو ایستگاه به شدت افزایش می‌یابد، اما نوسان‌های دما و بارش تقریباً در فاز مخالف هستند (مخصوصاً در ایستگاه تهران به دلیل بزرگ‌تر بودن مقدار همبستگی). بنابراین کاهش ضریب همبستگی در سیگنال‌های اصلی دما و بارش تهران و تبریز نسبت به مؤلفه سالانه آنها ناشی از اثرات مؤلفه‌های فصلی و بین‌سالی اقلیمی است که در یک ایستگاه مشخص (بین دو متغیر جوی) یا در بین دو ایستگاه (برای یک متغیر جوی یا بین دو متغیر جوی) تفاوت بیشتری با هم دارند.

جدول ۱. مقایسه ضریب همبستگی بین داده‌های بارش و داده‌های دمای سطحی ماهانه تهران و تبریز با ضریب همبستگی نوارهای بسامدی فصلی، سالانه و بین سالی.

همبستگی دمای تهران و دمای تبریز	همبستگی بارش تهران و بارش تبریز	
۹۹/۳۳	۴۰/۴۷	سیگنال اصلی بارش و دمای ماهانه
۷۳/۸۲	۴۱/۰۸	سیگنال فصلی (Band 3) با روش همینگ
۹۹/۹۳	۵۷/۶۳	سیگنال سالانه (Band 5) با روش همینگ
۹۳/۴۷	۳۰/۲۱	سیگنال بین‌سالی (Band 7) با روش همینگ
همبستگی بارش تبریز و دمای تبریز	همبستگی بارش تهران و دمای تهران	
-۲۴/۹۹	-۵۳/۵۴	سیگنال اصلی بارش و دمای ماهانه
-۳/۶۸	-۲۴/۴۶	سیگنال فصلی (Band 3) با روش همینگ
-۵۴/۷۲	-۹۰/۰۲	سیگنال سالانه (Band 5) با روش همینگ
۶/۳۳	-۱۳/۷۶	سیگنال بین‌سالی (Band 7) با روش همینگ

۵. نتیجه‌گیری

اعمال پالایه‌ها به سیگنال‌های دما و بارش نشان داد، این سیگنال‌ها دارای یک مؤلفه طیفی سالانه غالب در ایستگاه‌های انتخابی هستند که دامنه این مؤلفه طیفی در سیگنال دما بسیار قابل توجه است. همچنین سیگنال‌های فصلی در مقیاس‌های کمتر از ۱۱ ماه و سیگنال‌های بین سالی در دوره تناوب‌های بزرگ‌تر از ۱۳ ماه قابل جداسازی و بررسی هستند. در واقع سیگنال اصلی از ترکیب این مؤلفه‌ها با توان‌های متفاوت تشکیل می‌شود. با انتخاب پالایه‌های مناسب و استفاده از آنها می‌توان ارتباط احتمالی بین تغییرپذیری‌های شاخص‌های اقلیمی و متغیرهای هواشناسی را در هر منطقه به‌طور دقیق بررسی کرد. این کار بدون استفاده از پالایه‌های رقمی و تنها با بررسی سیگنال‌های اصلی بسیار مشکل است و ممکن است نتایج گمراه‌کننده به‌همراه داشته باشد. بنابراین به-کارگیری پالایه‌های رقمی در پردازش سیگنال‌های جوی و اقیانوسی بسیار ضروری است.

مراجع

اشرفی، خ.، آزادی، م. و ثابت قدم، س.، ۱۳۹۰، بررسی تأثیر روش‌های گوناگون آغازگری پالایه رقمی بر نتایج مدل WRF، مجله ژئوفیزیک ایران، ۵ (۱)، ۳۳-۱۶.

در این تحقیق طراحی و پیاده‌سازی پالایه‌های رقمی میانگین متحرک برای اعمال بر سیگنال‌های هواشناسی مورد ارزیابی قرار گرفت. اگرچه عملکرد این پالایه آرمانی نیست، اما در بسیاری از کاربردهای هواشناسی نیاز به بسامد قطع تیز وجود ندارد. دلیل این مسئله به محتوای طیفی سیگنال‌های هواشناسی برمی‌گردد که بیشتر توان طیفی در چند نوار مجزای بسامدی با فاصله از هم توزیع شده است و علاوه بر این در بعضی از کاربردها یک گستره از بسامدها باید حفظ شوند.

به‌طور کلی پالایه‌های پایین‌گذر میانگین متحرک به منظور هموارسازی سیگنال‌ها و حذف نوفه‌های بسامد بالا استفاده می‌شوند که میزان هموارسازی با اعمال پنجره‌گذاری بر تابع ضربه پالایه افزایش می‌یابد. پالایه‌های بالاگذر و میان‌گذر را می‌توان به سادگی از پالایه پایین‌گذر میانگین متحرک ساخت. هدف از به‌کارگیری پالایه بالاگذر جداسازی نوسان‌های بسامد بالا و هدف از پالایه میان‌گذر، جداسازی سیگنال مرتبط با یک نوار بسامدی خاص از سیگنال اصلی است. به این طریق می‌توان تغییرپذیری‌های با مقیاس‌های زمانی مختلف را به‌طور جداگانه مطالعه کرد.

Carton, J. A. and Giese, B. S., 2008, A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, 136, 2999–3017. <https://doi.org/10.1175/2007MWR1978.1>.
De Oliveira, M. M. F., Ebecken, F. F., De Oliveira, J. L. F. and De Azevedo Santos, I., 2009, Neural network model to predict a storm surge. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 143–155. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1907.1>.
Déqué, M. and Piedelievre, J. P., 1995, High resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics*, 11, 321–339. <https://doi.org/10.1007/BF00215735>.
Duchon, C. E., 1979, Lanczos filtering in one and two dimensions. *J Appl Meteorol*, 18, 1016–1022. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018%3c1016:LFIOAT%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018%3c1016:LFIOAT%3e2.0.CO;2).

Emery, W. J. and Thomson, R. E., 2014, *Data Analysis Method in Physical Oceanography*. Third edition, Elsevier B.V. 716 pp.
Fillion, L., Mitchell, H. L., Ritchie, H. and Staniforth, A., 1995, The impact of a digital filter finalization technique in a global data assimilation system. *Tellus*, 47A, 304–323. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v47i3.11518>.
Feser, F., 2006, Enhanced detectability of added value in limited-area model results separated into different spatial scales. *Monthly Weather Review*, 134, 2180–2190. <https://doi.org/10.1175/MWR3183.1>.
Gustafsson, N., 1992, Use of a digital filter as a weak constraint in variational data assimilation. *Workshop on Variational Data Assimilation, with special emphasis on Three-dimensional Aspects*, Shinfield Park, Reading.
Hoell, A., Barlow, M. and Saini, R., 2013, *Intraseasonal and seasonal-to-interannual*

- Indian Ocean convection and hemispheric teleconnections. *Journal of Climate*, 26, 8850–8867. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00306.1>.
- Huang, X-Y. and Lynch, P., 1993, Diabatic digital-filtering initialization: Application to the HIRLAM model. *Monthly Weather Review*, 121, 589–603. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<0589:DDFIAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0589:DDFIAT>2.0.CO;2).
- Ichikawa, H. and Yasunari, T., 2008, Intraseasonal variability in diurnal rainfall over New Guinea and the surrounding oceans during austral summer. *Journal of Climate*, 21(12), 2852–2868. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1784.1>.
- Lanzante, J. R., 1996, Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology*, 16, 1197–1226. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199611\)16:11%3c1197::AID-JOC89%3e3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199611)16:11%3c1197::AID-JOC89%3e3.0.CO;2-L).
- Li, Y., Han, W., Wang, F., Zhang, L. and Duan, J., 2020, Vertical structure of the upper-Indian Ocean thermal variability. *Journal of Climate*, 33, 7233–7253. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0851.1>.
- Li, Y., Han, W., Zhang, L. and Wang, F., 2019, Decadal SST variability in the southeast Indian Ocean and its impact on regional climate. *Journal of Climate*, 32, 6299–6318. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0180.1>.
- Liu, Q., Li, T. and Zhou, W., 2021, Impacts of multi-timescale circulations on meridional moisture transport, *Journal of Climate*, 34(19), 8065–8085. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0126.1>.
- Lynne, P. A. and Fuerst, W., 1994, *Introductory Digital Signal Processing with Computer Applications*. John Wiley & Sons Ltd. 371 pp.
- Koch, S. E., Golus, R. E. and Dorian, P. B., 1988, A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part II: Interactions between mesoscale convective systems and the antecedent waves. *Monthly Weather Review*, 116(12), 2545–2569. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<2545:AMGWEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2545:AMGWEO>2.0.CO;2).
- Kousky, V. E. and Kayano, M. T., 1994, Principal modes of outgoing longwave radiation and 250-mb circulation for the South American sector. *Journal of Climate*, 7, 1131–1143. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<1131:PMOOLR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<1131:PMOOLR>2.0.CO;2).
- Moon, J. Y., Wang, B., Lee, S. S. and Ha, K. J., 2018, An intraseasonal genesis potential index for tropical cyclones during Northern Hemisphere summer. *Journal of Climate*, 31(22), 9055–9071. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0515.1>.
- Nie, Y., Ren, H-L. and Zhang, Y., 2019, The role of extratropical air-sea interaction in the autumn subseasonal variability of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, 32, 7697–7712. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0060.1>.
- Oppenheim, A. V. and Verghese, G. C., 2017, *Signals, Systems & Inference*. Pearson Education Limited, 604 pp.
- Peckham, S. E., Smirnova, T. G., Benjamin, S. G., Brown, J. M. and Kenyon, J. S., 2016, Implementation of a digital filter initialization in the WRF model and its application in the Rapid Refresh. *Monthly Weather Review*, 144, 99–106. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0219.1>.
- Pohl, B., Dieppois, B., Crétat, J., Lawler, D. and Rouault, M., 2018, From synoptic to interdecadal variability in southern african rainfall: toward a unified view across time scales. *Journal of Climate*, 31(15), 5845–5872. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0405.1>.
- Polavarapu, S., Tanguay, M. and Fillion, L., 2000, Four-dimensional variational data assimilation with digital filter initialization. *Monthly Weather Review*, 128, 2491–2510. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2491:FDVDAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2491:FDVDAW>2.0.CO;2).
- Raymond, W. and Garder, A., 1991, A review of recursive and implicit filters. *Monthly Weather Review*, 119, 477–495. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0477:ARORAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0477:ARORAI>2.0.CO;2).
- Wang, F., Tian, W., Xie, F., Zhang, J. and Han, Y., 2018, Effect of Madden-Julian Oscillation occurrence frequency on the interannual variability of northern hemisphere stratospheric wave activity in winter. *Journal of Climate*, 31, 5031–5049. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0476.1>.
- Wu, Z., Huang, N. E., Long, S. R. and Peng, C. K., 2007, On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(38), 14889–14894. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701020104>.

On the design and implementation of digital filters to process meteorological signals

Neyestani, A.*

Assistant Professor, Department of Physics, Razi University, Kermanshah, Iran

(Received: 26 Aug 2021, Accepted: 10 Jan 2022)

Summary

Separation of different frequency bands in the complex and combined signals related to meteorological variables and also climatic indices requires the use of digital filtering methods. In this way, the information on different frequency bands can be organized and used. Given that these signals generally exhibit complex and nonlinear behavior, the use of mathematical filtering methods to identify their stochastic and periodic components leads to a better understanding of their behavior and helps modeling them as well. Therefore, the use of digital filters in order to recognize regular variabilities and facilitate statistical forecasting is one of the main goals in this field.

The design and implementation of these filters are possible both in time and frequency domains. In the frequency space, this process is performed based on the Fourier transform of the signals on the basis of the Fast Fourier Transform Algorithm (FFT), in which the variances of the desired signal can be extracted based on spectral analysis in different frequencies. By employing different types of non-recursive and recursive digital filters, which they can be implemented as low-pass, high-pass, band-pass, and band-stop, the related signal in the time domain for each state can be constructed, and the corresponding spectrum can be studied. The isolated spectrum can be related to the effect of a special phenomenon that influences the main signal. In addition, it is possible to remove high frequency components from the original signal, which include noises and may not contain important information. Moreover, the process of optimal smoothing the original signal can also be carried out.

In this study, different digital filters have been designed and then applied to meteorological data such as monthly surface temperature and precipitation. Two synoptic stations over Iran are selected and the related discrete monthly signals are constructed for 504 months during 1979-2021. Then, the moving average (MA) filter is used as a main filter, because it is the most common filter in digital signal processing (DSP), and also it is the easiest digital filter to understand and use. In spite of its simplicity, the moving average filter is optimal for a common task such as reducing random noise while retaining a sharp step response. This makes it the premier filter for time domain encoded signals. The filtering process in this study is conducted to denoise the original signals, and also to examine seasonal, annual, and inter-annual components of the original signals. Since employed filters are digital, they must be applied to the initial discrete signal in the form of convolution with the finite impulse response (FIR) of the filter in the time domain, or they can be applied in the form of multiplication in the frequency domain based on discrete Fourier transform and then using of the inverse Fourier transform to recover the desired signal.

The results of this study show the importance of using digital filters in analyzing the spectral contents of meteorological signals. Furthermore, the Hamming filter, which is defined based on the cosine truncation and windowing, shows better performance in attenuating Gibbs oscillations in the lateral sidelobes of the filter frequency response than the simple moving average (MA) filter. In addition, the correlation analysis is carried out separately to indicate the linear relationships between different frequency components of the signals. The higher correlations are observed in annual frequency bands of the temperature and precipitation signals for the selected stations. It shows the effect of external climate forcing on both temperature and precipitation that is stemmed from the earth's motion around the sun during a year. Obviously, choosing more weights in the design of a filter can improve the filtering performance, but it should be avoided to use more weights than necessary.

Keywords: Digital filter, Signal processing, Variability, Windowing, Meteorology.

* Corresponding author:

neyestani@razi.ac.ir