انار: رویکردی جدید بر سامانه زودهنگام هشدار زمین‌لرزه با هدف کاهش تأخیر زمانی

علی ریاحی
فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد ژئوفیزیک، مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
A.Riahi.seismo@gmail.com

مهدی نوازنده
دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی نرم‌افزار، دانشگاه فردوسی مشهد؛ شرکت وب‌گستر انار، مشهد، ایران
M.Navazandeh@gmail.com

مجید سدارتی
کارشناس نرم‌افزار، مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ شرکت وب‌گستر انار، مشهد، ایران
Majid.Sedaraty@gmail.com

کلید واژه‌ها: *سامانه زودهنگام زمین‌لرزه، مدیریت شبکه، کاهش تأخیر زمانی، ایستگاه با سطح نوفه بالا، روش اصلاح‌شده فیلترپیکر*

چکیده

یکی از راه‌های مقابله با زلزله‌های شدید استفاده از سامانه‌های هشدار زودهنگام می‌باشد. این سامانه‌ها با دریافت برخط سیگنال‌های لرزه‌ای از ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و پردازش فاز P، به‌صورت آنی خطر رسید امواج مخرب را هشدار می‌دهند. با هدف کاهش خطر زلزله‌ها، شرکت وب‌گستر انار با دو رویکرد هشدار زودهنگام زمین‌لرزه و مدیریت شبکه‌های لرزه‌نگاری، سامانه انار را طراحی و پیاده‌سازی کرده است.

مهم‌ترین ویژگی این برنامه ایجاد زیرساخت مناسب برای پردازش سریع و هشدار آنی است. با توجه به اهمیت کاهش تأخیر در فرایند پردازش و هشدار، در طراحی انار از یک پروتکل ارتباطی استفاده شده است، که باعث توزیع پردازش‌ها از یک سرور مرکزی، به پردازش‌های درون‌ایستگاهی می شود تا این سامانه بتواند بدون ایجاد تأخیر در پردازش، تعداد بی‌شماری ایستگاه را مدیریت کند. هم‌چنین پایداری سامانه در شرایط مختلف، انعطاف‌پذیری نسبت به اجرای الگوریتم‌های مختلف و اجرای برون‌خط از ویژگی‌های لازمی است که در این سامانه اجرا شده است. علاوه بر این موارد، طراحی سامانه به‌نحوی است که مصرف انرژی آن پایین باشد. نصب و راه‌اندازی این برنامه بر روی زیرساخت‌های شبکه‌های مختلف ساده بوده و نیازی به متخصص ندارد. پیاده‌سازی عملی انار بر روی شبکه‌های لرزه‌نگاری نشان داده است که معماری آن منجر به کاهش چشمگیر تأخیرهای زمانی می‌شود.

علاوه بر نیاز به یک چهارچوب سریع و مدیریتی در شبکه‌های هشدار زودهنگام زمین‌لرزه، الگوریتم پردازش سیگنال‌ها نیز نقش مهمی در تعیین صحت خروجی ایفا می‌کنند. این الگوریتم‌ها باید از ویژگی‌های لازم برای کاهش سرعت پردازش و افزایش صحت خروجی برخوردار باشند. با توجه به نصب ایستگاه‌های لرزه‌ای هشدار زمین‌لرزه در اطراف شهرها، ممکن است که ایستگاه از سطح نوفه بالایی برخوردار باشند. لذا برای تعیین صحیح فاز P از روش اصلاح شده پیشنهادی توسط ریاحی و همکاران (۱۳۹۳) در انار استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با وجود حجم محاسباتی نسبتاً بالای این الگوریتم، انار می‌تواند ۵۰۰۰۰ سمپل را در مدت یک میلی‌ثانیه پردازش کند.

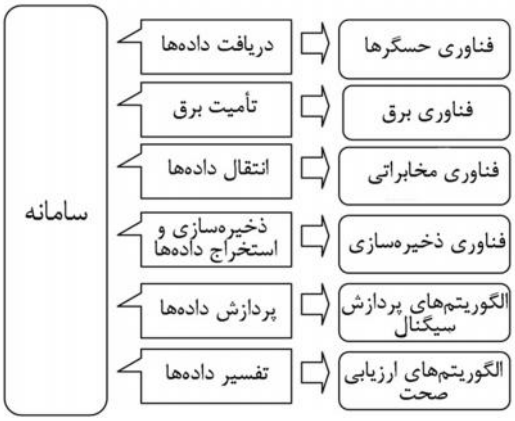
مقدمه

حرکت صفحات زمین‌ساختی و بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساخت ایران نشان می‌دهد که در اکثر نقاط ایران قابلیت وقوع زلزله وجود دارد. آمار نیز نشان می‌دهد که در هر دهه یک زلزله بسیار شدید در ایران رخ می‌دهد. زمین‌لرزه‌ها همواره منجر به خسارات جانی و مالی فراوانی شده‌اند. این خطر لرزه‌خیزی بالا بیان‌گر ضرورت ایجاد تدبیری جهت کاهش خسارات است. امروزه سامانه‌های هشدار زودهنگام زمین‌لرزه نقش مؤثری در مدیریت این بلای طبیعی می‌توانند ایفا کنند. از این رو لازم است تا چنین سامانه‌هایی در نقاط مختلف کشور پیاده‌سازی شوند.

بدون شک مهم‌ترین هدف از راه‌اندازی یک سامانه هشدار زودهنگام زمین‌لرزه برآورد، سریع و دقیق مشخصات زلزله رخ داده است، تا پیش از رسید امواج مخرب S اقدامات و هشدارهای لازم انجام شود. در طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه لرزه‌نگاری و مدیریت شبکه، گروه‌ها و فناوری‌های مختلفی دخیل هستند. تیم اجرایی متشکل از تخصص‌های مختلفی است که زیر نظر رهبر گروه فعالیت می‌کنند و از چندین زیر-گروه تشکیل شده‌اند (جدول ۱) (Baptie, 2012). فناوری‌های مورد نیاز برای راه‌اندازی چنین سامانه‌ایی در شکل ۱ شرح داده شده‌اند (Büyüköztürk and Yu, 2003).

جدول ۱: تیم های مورد نیاز جهت طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه لرزه‌نگاری (Baptie, 2012)

وظایف زیر-گروه‌ها	تخصص‌های لازم
تحقیقاتی	برآورد خطر لرزه‌ایی، شناسایی لرزه‌خیزی منطقه، ساختار پوسته
تحلیل‌گر	زلزله‌شناس
بهره‌برداری فنی	متخصص حسگر، مهندس میدانی، مهندس برق
پشتیبانی رایانه‌ایی	مهندس نرم‌افزار حسگر، مهندس رایانه
مشاوره	رهبر برنامه، دبیر برنامه



شکل ۱: فناوری‌های مورد نیاز جهت طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه لرزه‌نگاری (Büyüköztürk and Yu, 2003)

در طراحی معماری اینگونه سامانه‌ها، اصلی‌ترین چالش کاهش تأخیرهای زمانی از لحظه رسید سیگنال‌ها به ایستگاه‌ها و انتقال آن‌ها به مرکز داده تا اعمال پردازش‌های لازم است. به‌طور کلی عوامل ایجاد تأخیر زمانی شامل تأخیر در حسگر، تأخیر در دیجیتایزر، بسته‌بندی و ارسال داده‌ها توسط پروتکل، انتقال از ایستگاه تا مرکز شبکه، دریافت و باز کردن بسته و پردازش سیگنال هستند. در کنار این موارد برخی تجهیزات مانند روتر، سوئیچر و ... بر روی افزایش تأخیر زمانی تأثیرگذار هستند. کاهش تأخیرهای زمانی اینگونه سامانه‌ها همواره یکی از مسائل چالش‌برانگیز در طراحی آنها بوده است؛ به‌نحوی که در یک سامانه ایده‌آل باید جمع تمام این تأخیرها کمتر از ۱۰۰ میلی‌ثانیه باشد.

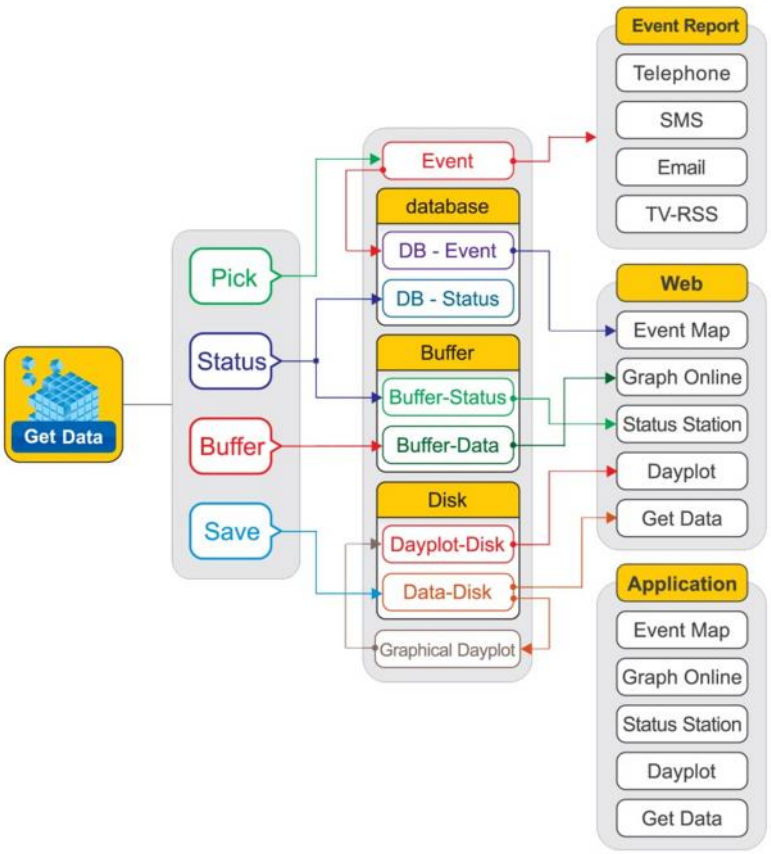
می‌توان ساختار شبکه‌های هشدار زودهنگام زمین‌لرزه را به دو بخش کلی تقسیم نمود. بخش اول شامل فناوری‌های ارتباطی، مدیریتی، چهارچوب کاری و زیرساخت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری است که در این مقاله با عنوان «بخش معماری» شرح داده می‌شوند. بخش دوم روش‌های مورد نیاز در پردازش سیگنال‌ها را معرفی می‌کند، که در این مقاله با عنوان «بخش پردازش سیگنال» معرفی می‌گردد. پردازش داده‌ی رسیده و برآورد صحت و دقت نتایج حاصل شده پیش از اعلام و هشدار زلزله به این بخش مرتبط است. این نتایج شامل تعیین صحیح فاز، تعیین محل رخداد و تعیین بزرگای آن می‌باشند. ترکیب مناسب این دو بخش نقش اساسی در خروجی سامانه‌های زودهنگام زمین‌لرزه ایفا می‌کنند.

با توجه به نیازها و بهبود کاستی‌های موجود در این سامانه‌ها، شرکت وب‌گستر انار، متشکل از متخصصین نرم‌افزار، سخت‌افزار و زلزله‌شناس، سامانه‌ای با عنوان «انار» را در راستای کاهش خسارات زمین‌لرزه بر پایه هشدار زودهنگام وقوع آن و مدیریت شبکه‌های لرزه‌نگاری طراحی و پیاده‌سازی نموده است. انار قابلیت هشدار زمین‌لرزه‌ها بلافاصله پس از رخداد آن و مدیریت شبکه به‌صورت خودکار و زمان‌واقعی[1] را دارد. ویژگی اصلی انار ساختار طراحی آن است که منجر گردیده تا مجموع تأخیرهای زمانی حاصل از دریافت، انتقال و پردازش داده‌ها کاهش بیابد. در ادامه به شرح هر یک از بخش‌های این سامانه پرداخته می‌شود.

1.Real-time

بخش معماری

سامانه انار از اجزاء مختلفی تشکیل شده است که هر بخش به صورت مستقل بوده و توسط پروتکل ارتباطی با یکدیگر مرتبط هستند. این اجزاء می‌توانند از نظر فیزیکی مجزا باشند و در نقاط مختلف جغرافیایی قرار بگیرند. شمای کلی سامانه و ارتباط اجزای مختلف آن با یکدیگر در سه سطح در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲: شمای کلی سامانه و ارتباط اجزای مختلف آن با یکدیگر

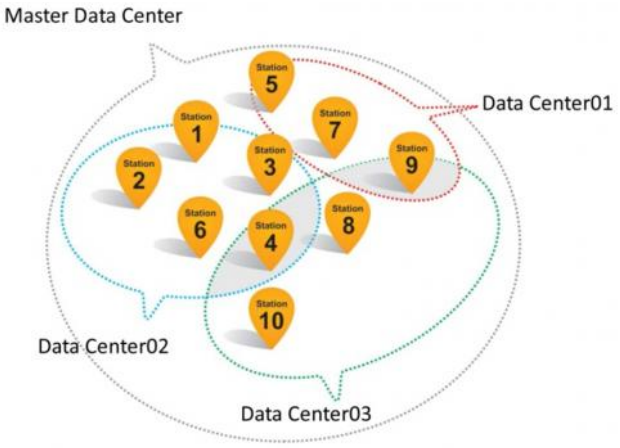
در طراحی انار سعی بر آن بوده تا یک سامانه هشدار زمین‌لرزه با یک چهارچوب کاری ثابت در تمامی مناطق جغرافیایی و با کمترین تأخیر زمانی فراهم شود. قابلیت کار و توسعه با انواع الگوریتم‌های تعیین فاز، تعیین محل و تعیین بزرگا از دیگر موارد مدنظر در طراحی معماری انار بوده است. برخی از ویژگی‌های انار اهمیت بالایی در اجرای آن دارد که در ادامه به شرح هر یک پرداخته می‌شود:

مقیاس‌پذیری: با توجه به حجم بالای داده‌های لرزه‌ای و پردازش آنها در شبکه‌های هشدار زودهنگام، همواره افزودن ایستگاه‌های جدید با محدودیت همراه بوده و توسعه شبکه یکی از مشکلات این شبکه‌ها می‌باشد. از این رو، گروه ما در طراحی پروتکل ارتباطی بین اجزاء این سامانه، مقیاس‌پذیری را در نظر گرفته است. با توجه به نوع، ساختار و وسعت شبکه، راهکارهای متفاوتی برای رفع مشکل مقیاس‌پذیری در انار قابلیت اجرایی دارد. به عنوان نمونه می‌توان به راهکارهای زیر اشاره نمود:

- قابلیت و توانایی تعریف بیش از یک درگاه دریافت داده در یک مرکز داده
- قابلیت و توانایی پردازش در محل (ایستگاه) که منجر می‌شود تا این سامانه نیاز به اتصال و ارسال حجم کمتری داده به مرکز شبکه داشته باشد و فقط در صورت نیاز اطلاعات ضروری پردازش شده را ارسال نماید.
- قابلیت تعریف چندین مرکز داده (بدون محدودیت مکان جغرافیایی) در این سامانه که باعث توزیع حجم داده و پردازش در مراکز شبکه می‌شود.

خوشه‌بندی: در شبکه‌های لرزه‌نگاری با توجه به وسعت، اهمیت یا مأموریت شبکه، گاهی لازم است تا تعدادی از ایستگاه‌ها را به عنوان یک گروه واحد معرفی کرد تا این گروه به صورت مجزا تعیین رخداد نمایید. این قابلیت یکی از موارد ذکر شده در بخش مقیاس‌پذیری است که

کمک شایانی در توزیع پهنای باند و حجم پردازش دارد. توانایی خوشه‌بندی به روش‌های دلخواه در سامانه انار مورد توجه قرار گرفته و اجرای آن ممکن شده است. نمونه‌ای از خوشه‌بندی شبکه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: تعریف سه مرکز پردازش داده‌ایی مجزا برای دریافت و پردازش اطلاعات با ایستگاه‌های اشتراکی و یک مرکز داده اصلی برای تمامی ایستگاه‌های موجود

انعطاف‌پذیری و پایداری: در شبکه‌های لرزه‌نگاری، داده‌های لرزه‌ای ثبت شده رکن اصلی شبکه هستند و در صورت نبود داده‌ها امکان هیچگونه پردازشی وجود ندارد. با توجه به اهمیت بالای حفظ داده‌ها، گروه ما سعی کرده است تا سامانه طراحی شده کاملاً پایدار و انعطاف پذیر باشد، به گونه‌ای که اگر ارتباط میان اجزا آن به هر دلیلی قطع شد، با ایجاد بافرهایی مانعِ از بین رفتن داده‌ها شود و بلافاصله پس از برقراری مجدد ارتباط، اطلاعات بافر شده به بخش مورد نظر ارسال شود. همچنین این سامانه به گونه‌ای طراحی شده است که با روش های مختلف پشتیبان‌گیری[۲] از راه‌های ارتباطی و داده‌ها، تا حد ممکن مانعِ از بین رفتن داده‌ها بشود.

توزیع شدگی: در این سامانه اجزای مستقل از هم توسط پروتکل ارتباطی بین اجزاء به یک سامانه یکپارچه تبدیل می‌شوند. در این حالت اجزاء می‌توانند از لحاظ موقعیت مکانی و فیزیکی از هم دور باشند و به طور مجزا بر روی سخت‌افزارهایی با معماری‌های مختلف قرار گیرند. این توزیع شدگی باعث ایجاد خصوصیاتی از جمله توزیع حجم پردازش، مدیریت بهینه منابع، افزایش امنیت و چیدمان مختلفی از اجزاء (شکل ۴) با توجه به کاربردهای متفاوت می‌گردد.

شکل ۴: قرار دادن یک سامانه پردازشی به ازای هر ایستگاه و ارسال اطلاعات پردازش شده به یک سیستم اصلی

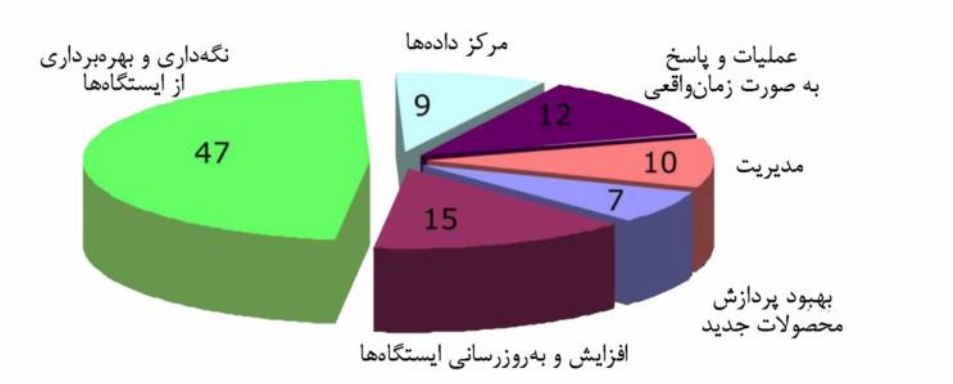
خصوصیات ذکر شده در توزیع‌شدگی امکان استفاده از شبکه‌های با پهنای باند کم و پردازش (تعیین فاز) در محل ایستگاه‌ها را فراهم می‌کند. این موضوع باعث استفاده بهینه در شبکه‌های ضعیف و صرفه‌جویی در هزینه و منابع می‌شود. با توجه به هزینه‌بر بودن برقراری ارتباط‌های شبکه‌ای قوی، موقعیت جغرافیایی قرارگیری ایستگاه‌های لرزه‌نگاری که معمولاً در مناطق صعب‌العبور و محروم از نظر امکانات واقع شده‌اند و با

2.Backup

توجه به اهمیت فاکتور زمان در شبکه‌های هشدار زودهنگام، این قابلیت در سامانه انار کمک شایانی به ایجاد یک ارتباط آسان، امن ، سریع و با صرفه کرده است.

سرعت و امنیت: ایجاد سرعت، دقت و امنیت داده‌های لرزه‌نگاری در شبکه‌های هشدار زودهنگام زمین‌لرزه از اهمیت بالایی برخوردار هستند. با توجه به ضرورت ایجاد بستری برای انتقال داده‌های لرزه‌ای از ایستگاه‌ها به مرکز شبکه با حداکثر سرعت، امنیت، دقت و پایداری، در طراحی انار پروتکلی جهت ارتباط و انتقال اطلاعات ایجاد گردیده است که با حداکثر سرعت و قابلیت رمزگذاری داده‌ها، کلیه مشکلات ارتباطی در محدوده جغرافیایی ایران را با حداقل امکانات مرتفع می‌نماید.

قابل حمل بودن (سبک و مستقل از سخت‌افزار): بیش از نیمی از هزینه‌های شبکه‌های هشدار سریع صرف نگهداری و توسعه آن می‌شود (شکل ۵) (Oppenheimer, 2006). یکی از مشکلات اساسی شبکه‌های هشدار زودهنگام موجود، نیاز به سخت‌افزار خاص و هزینه‌های بالای بروزرسانی و توسعه شبکه است. محدودیت استفاده از سخت‌افزار خاص برای این شبکه‌ها علاوه بر هزینه‌بر بودن باعث ایجاد محدودیت استفاده از فناوری‌های سخت‌افزاری روز و محدودیت در سرعت نیز می‌شود. جهت رفع این مشکل، در طراحی انار، سبک و قابل حمل بودن مدنظر قرار گرفته است. این سامانه با رفع محدودیت‌های سایر سامانه‌ها، قابلیت اجرا بر روی انواع سخت‌افزار از جمله GPU[3]، CELL و FPGA[4] را دارا می‌باشد.



شکل ۵: درصد هزینه‌های شبکه مانیتورینگ کالیفرنیا (Oppenheimer, 2006)

امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌های مختلف: با پیشرفت روزانه علم زلزله‌شناسی و بهبود الگوریتم‌های تعیین فاز، تعیین بزرگا و تعیین محل و همچنین ارائه روابط خاص برای هر منطقه جغرافیایی، لازم است تا سامانه‌های هشدار زودهنگام زمین‌لرزه توانایی پیاده‌سازی و توسعه الگوریتم‌های مدنظر را دارا باشند. در سامانه انار با توجه به مستقل بودن اجزاء و با بهره‌گیری از جدیدترین، منعطف‌ترین و خواناترین روش‌های کدنویسی، توسعه و تغییرات و آزمایش الگوریتم‌ها در آن به سادگی قابل انجام است.

استفاده بهینه از منابع: استفاده بهینه از منابع یکی از مباحث اصلی در کلیه علوم به شمار می‌رود. همواره محققان تلاش نموده‌اند تا با حداقل استفاده از منابع، حداکثر بهره‌وری را دریافت نمایند. به علت محدودیت‌های موجود و برخط بودن انتقال داده‌ها، اهمیت استفاده بهینه از منابع در شبکه‌های هشدار زودهنگام به صورت دوچندان قابل بررسی است. در سامانه انار جهت حداکثر بهره‌وری از منابع، در سطح الگوریتم و سطح کد و سخت‌افزار بهینه‌سازی صورت گرفته است که باعث بهره‌وری مناسب از منابع و صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود. این قابلیت ویژگی مهمی در ایستگاه‌هایی که دارای محدودیت منبع انرژی هستند، می‌باشد.

مدیریت یکپارچه و آسان: همانطور که پیشتر اشاره شد، بیش از ۵۰٪ هزینه‌ها در شبکه‌های لرزه‌نگاری صرف نگهداری و توسعه این شبکه‌ها می‌شود. نگهداری این شبکه‌ها علاوه بر هزینه‌بر بودن، به علت پیچیدگی در اجرا و مدیریت، نیازمند متخصصان خاص از رشته‌های مختلف است. پس از بررسی‌های صورت گرفته از نرم‌افزارهای مختلف مدیریت شبکه، یکی از مشکلات این نرم‌افزارها نبود یک مدیریت یکپارچه و آسان می‌باشد؛ به گونه‌ای که راه‌اندازی این سامانه‌ها نیاز به کارشناس مخصوص و انجام تنظیمات بسیار دارد. سامانه انار به نحوی طراحی شده است که راه‌اندازی و مدیریت آن به سادگی و با کمترین نیاز به کارشناس قابل انجام است و استفاده از آن کاربر پسند[5] می‌باشد. این سامانه شامل دو رابط کاربری برای افراد آماتور و حرفه‌ای است و قابلیت گزارش برخط توسط پیامک، رادیو، تلویزیون، اینترنت و ... را دارد.

3.GPU: Graphics Processing Units
4.FPGA: Field-Programmable Gate Arrays
5.User friendly

پیاده‌سازی انار بر روی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن خراسان

در حال حاضر سامانه انار بر روی ۱۱ ایستگاه شبکه لرزه‌نگاری باند پهن خراسان، وابسته به مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی (EQRC)[۶] دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شده است. انار در کنار مدیریت شبکه، اطلاعات زلزله‌های ثبت شده را به صورت زودهنگام در تارنمای EQRC منتشر می‌کند (http://eqrc.um.ac.ir). با توجه به برخط بودن ایستگاه‌های EQRC، تجربه اجرای عملی انار نشان‌دهنده سطح پایین مدت زمان تأخیر در رسید داده‌ها از ایستگاه‌ها به مرکز شبکه است. در جدول ۲ مقدار این تأخیر برای برخی از ایستگاه‌های این شبکه نشان داده شده است. باید توجه داشت که اگرچه این مقادیر در طول روز ثابت نیستند و با توجه به شرایط مختلف مخابراتی در نوسان هستند، ولی این جدول کلیات محدوده تأخیر را به خوبی بیان می‌کند.

جدول ۲: مقدار تأخیر برخی ایستگاه‌های شبکه باند پهن دانشگاه فردوسی مشهد در سامانه انار

کد ایستگاه	مدت زمان تأخیر (میلی‌ثانیه)
DARN	۱۳.۵۶۸
KHAF	۱۰.۷۴۵
KKHK	۱۲.۰۴۱۵
MSHD	۰.۳۳۵
NJFI	۱.۳۵۷
QUCH	۱۰.۵۴۸۵
SALH	۱۰.۵۱۲۵

بخش پردازش سیگنال

پیش از هشدار وقوع یک زلزله لازم است تا پس از رسید سیگنال‌ها پردازش‌های لازم انجام شود. این پردازش‌ها در سه گام تعیین فاز P، تعیین بزرگا و تعیین محل انجام می‌شوند. الگوریتم مورد استفاده در هر گام الزاماً باید با اهداف سامانه منطبق باشد تا پاسخ صحیح در کمترین زمان ممکن ارائه شود. به بیان دیگر، حجم پردازش‌ها نباید تأخیری بیش از حد معمول در سامانه ایجاد کند. در ادامه‌ی این مقاله صرفاً به الگوی تعیین فاز پراخته می‌شود.

برای تعیین فاز P، روش مرتبط با انرژی بیشترین گستردگی عملی را در سامانه‌های هشدار زودهنگام زمین‌لرزه داشته است. این روش بر پایه الگوریتم Allen (1978) و Baer and Kradolfer (1987) است که در آن فاز مربوطه هنگامی شناسایی می‌شود که نسبت بین STA[۷] به LTA[۸] از مقدار آستانه تعریف شده عبور کند. بر پایه این دو الگوریتم، Lomax et al. (2012) الگوریتم جدیدی با عنوان فیلترپیکر[۹] را ارائه کرد تا به‌صورت عملی در فرآیند دریافت سیگنال‌ها فاز P را در کسری از ثانیه به‌صورت خودکار تشخیص دهد.

پیش‌تر روش Allen (1978) در برنامه Earthworm پیاده شده بود. مقایسه دو روش نشان داده است که تعداد مقادیر ورودی کمتر و تشخیص بهتر فاز P در روش Lomax et al. (2012) نقطه قوت آن در مقایسه با روش Allen (1978) است (Vassallo et al., 2012). ارجحیت روش Lomax et al. (2012) زمانی مشخص‌تر می‌شود که داده‌ها از سطح نوفه بالایی برخوردار باشند.

با این وجود پیاده‌سازی روش Lomax et al. (2012) در سامانه انار نتایج قابل قبولی برای ایستگاه‌های با سطح نوفه بالا در شبکه EQRC ایجاد نکرد. در حقیقت در برخی از ایستگاه‌ها سطح نوفه چنان بالا است که این الگوریتم نیز برای سیگنال‌های دریافتی با انرژی کم پاسخگو نمی‌تواند باشد. از این رو ریاحی و همکاران (۱۳۹۳) الگوریتم Lomax et al. (2012) را اصلاح کردند. آنها نشان دادند که روش اصلاح شده دارای عملکرد بهتری در مقابل شکل‌موج‌های با نسبت سیگنال به نوفه پایین است.

روش خودکار تشخیص فاز Lomax et al. (2012) بر پایه اعمال فیلتر در حوزه زمان و تفکیک بسامدهای مختلف امواج رسیده است. در این روش فیلتر بالاگذر با دو رابطه (۱) و (۲) و فیلتر پایین‌گذر با رابطه (۳) به موج y اعمال می‌شوند.

$$Y_n^{HP1}(i) = C_n^{HP}\left[Y_n^{HP1}(i-1) + y'(i) - y'(i-1)\right] \quad (۱)$$

$$Y_n^{HP2}(i) = C_n^{HP}[Y_n^{HP2}(i-1) + Y^{HP1}(i) - Y^{HP1}(i-1)] \quad (۲)$$

6.EQRC: Earthquake Research Center
7.STA: Short Term Averaging
8.LTA: Long Term Averaging
9.FilterPicker

$$Y_n^{LP}(i)=Y_n^{LP}(i-1)+C_n^{LP}[Y^{HP2}(i)-Y^{HP2}(i-1)] \quad (۳)$$

که در آن $y'(i)=y(i)-y(i-1)$ بوده و ضرایب C_n^{LP}، C_n^{HP} دارای مقادیری وابسته به n و ΔT هستند. ΔT نرخ نمونه‌برداری موج رسیده است و مقدار صحیح $n=1,\ldots,N$ می‌باشد که بیشینه مقدار آن از رابطه $N=log2(T_filter/\Delta T)+1$ به دست می‌آید.

در ادامه روش فیلترپیکر، مقدار ویژه تابع $F_n^C(i)$ از رابطه (۴) و (۵) به‌دست می‌آید.

$$E_n(i)=Y_n^2(i) \quad (۴)$$

$$F_n^C(i)=\frac{E_n(i)-<E_n>(i-1)}{<\pm(E_n)>(i-1)} \quad (۵)$$

که در آن $<E_n>(i-1)$ و $<\pm(E_n)>(i-1)$ به‌ترتیب میانگین زمانی تا نمونه $i-1$ام در E_n و انحراف معیار در E_n هستند. در پایان ویژه تابع $F^C(i)$ برای هر نمونه از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

$$F^C(i)=\max\{F_n^c(i);n=0,\ldots,N\} \quad (۶)$$

با توجه به آستانه تعریف شده، تمام درایه‌های ویژه تابع $F^C(i)$ تحلیل می‌شوند تا زمین‌لرزه شناسایی شده و از نوفه‌های ضربه‌ایی تفکیک گردند. مرحله تشخیص فاز را می‌توان در حدود یک ثانیه پس از رسید فاز P زمین‌لرزه با قطعیت اعلام کرد (Lomax et al., 2012).

برای حصول نتیجه بهتر در ایستگاه‌های با سطح نوفه بالا ریاحی و همکاران (۱۳۹۳) روش Lomax et al. (2012) را با افزودن گام‌های جدیدی به الگوریتم، به‌شرح زیر اصلاح کرده‌اند. جهت دسترسی بهتر به بسامدهای پایین در حوزه زمان پیشنهاد کرده‌اند که روابط (۷) تا (۱۰) در ادامه رابطه (۳) اعمال شوند.

$$y''(i)=Y_n^{LP}(i)-Y_n^{LP}(i-1) \quad (۷)$$

$$Y_n^{HP3}(i)=C_n^{HP}[Y_n^{HP3}(i-1)+y''(i)-y''(i-1)] \quad (۸)$$

$$Y_n^{HP4}(i)=C_n^{HP}[Y_n^{HP4}(i-1)+Y^{HP1}(i)-Y^{HP3}(i-1)] \quad (۹)$$

$$Y_n^{LP}_new(i)=Y_n^{LP}_new(i-1)+C_n^{LP}\left[Y^{HP2}(i)-Y^{HP4}(i-1)\right] \quad (۱۰)$$

خروجی مقدار رابطه (۱۰) یعنی $Y_n^{LP}_new(i)$ در رابطه (۴) اعمال می‌شود تا $F^C(i)$ جدیدی به‌دست آید.

الگوریتم اصلاح شده تعیین فاز P در سامانه انار پیاده‌سازی شده است. برای دریافت پاسخ مطلوب بازه زمانی ۳۰ ثانیه‌ایی برای پردازش انتخاب شده است. با توجه به نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ سمپل رسید سیگنال‌ها در هر ثانیه از هر ایستگاه EQRC، لازم است که به ازای هر سمپل دریافتی (که در بازه زمانی ۰.۰۰۵ ثانیه از یکدیگر دریافت می‌شوند) تمام مراحل پردازش برای ۶۰۰۰ سمپل (۳۰×۲۰۰) انجام شود. با وجود حجم نسبتاً بالای الگوریتم فوق، آزمایش زمانی از انار نشان داد که نرم‌افزار می‌تواند ۵۰۰۰۰ سمپل را در مدت یک میلی‌ثانیه پردازش کند. این رقم بسیار کوچک‌تر از شرط زمانی سامانه‌های هشدار سریع می‌باشد (۱۰۰ میلی‌ثانیه). این آزمایش توسط یک رایانه شخصی انجام شده است که مشخصات آن به شرح جدول ۳ بوده است.

جدول ۳: مشخصات رایانه مورد استفاده برای آزمایش سرعت پردازش الگوریتم اصلاح شده فیلترپیکر در انار

ویژگی	کمیت
سیستم عامل	Release 7.4 (wheezy) 64-bit Kernel Linux 3.2.0-4-amd64 GNOME 3.4.2
حافظه RAM	GiB 3.8
پردازشگر	Intel® Core™ i5-2430M CPU @ 2.40GHz × 4

نتیجه‌گیری

در طراحی و پیاده‌سازی سامانه هشدار زودهنگام و مدیریت شبکه انار ویژگی‌های مختلفی مدنظر قرار گرفته است تا این سامانه بتواند ضمن ایجاد عدم محدودیت در حجم و توسعه شبکه، حداقل تأخیر زمانی ممکن را ایجاد کند. غالب معماری به‌کار رفته در شبکه با هدف کاهش تأخیر، کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری طراحی شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی آن به‌خوبی نشان می‌دهد که تأخیر سامانه بسیار کمتر از شرط ۱۰۰ میلی‌ثانیه می‌باشد (جدول ۲). همچنین سامانه انار نشان داده است که بخش پردازش آن در مقابل الگوریتم‌های با حجم محاسباتی به‌مانند روش پیشنهادی تعیین فاز P ریاحی و همکاران (۱۳۹۳) کاملاً عملکرد مناسبی داشته است و همچنان مقدار تأخیر زمانی ایجاد شده بسیار کمتر از شرط بیان شده است.

در حال حاضر توسعه انار در بخش معماری و تعیین فاز به مرحله بهره‌برداری عملی رسیده است و گروه علاوه بر توسعه بخش معماری، بر بهبود سایر الگوریتم‌های بخش پردازش سیگنال نیز متمرکز است.

تقدیر و تشکر

از مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد بابت در اختیار قرار دادن داده‌های برخط و امکانات شبکه لرزه‌نگاری باندپهن خراسان کمال تشکر و قدردانی را داریم. همچنین از جناب آقای دکتر رضا خواجوی بابت مطالعه مقاله و ارائه پیشنهادات برای ارتقای متن صمیمانه سپاسگزاریم.

فهرست مراجع

ریاحی ع، نوازنده م و سدارتی م (۱۳۹۳) تعیین خودکار فاز موج P در ایستگاه‌های با سطح نوفه بالا، *مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*، تهران، ایران

Allen RV (1978) Automatic earthquake recognition and timing from single traces, *Bulletin of Seismological Society of America*, 68: 1521-1532

Baer M and Kradolfer U (1987) An automatic phase picker for local and teleseismic events, *Bulletin of Seismological Society of America*, 77: 1437–1445

Baptie B (2012) UK earthquake monitoring 2011/2012, Twenty-third Annual Report, Edinburgh British Geological Survey, UK

Büyüköztürk O and Yu TY (2003) Structural health monitoring and seismic impact assessment, Proceeding of *Fifth National Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey.

Lomax A, Satriano C and Vassallo M (2012) Automatic picker developments and optimization: FilterPicker—a robust, broadband picker for real-time seismic monitoring and earthquake early warning, *Seismological Research Letters*, 83: 531-540

Oppenheimer D (2006) The California integrated seismic network: project status, CISN Report, Part I, Proceeding of *CISN Advisory and Steering Committees Meeting Agenda Engineering*, Berkeley, USA

Vassallo M, Satriano C and Lomax A (2012) Automatic picker developments and optimization: A strategy for improving the performances of automatic phase pickers, *Seismological Research Letters*, 83: 541-554