

بررسی اثر راستاگرایی بر جنبش نیرومند زمین در زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه - سیلاخور

کتایون بهزاد افشار^۱، نوربخش میرزایی^۲، مرتضی اسکندری قادی^۳، فریدون سینائیان^۴، غلامرضا قدرتی امیری^۵

^۱ دانش‌آموخته دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات (e-mail: katayoun_behzadafshar@yahoo.com)

^۲ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (e-mail: nmirzaii@ut.ac.ir)

^۳ دانشکده علوم پایه پردیس دانشکده فنی دانشگاه تهران (e-mail: morteza_ekandari@yahoo.com)

^۴ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (e-mail: sinaeian@yahoo.com)

^۵ دانشگاه علم و صنعت ایران (e-mail: ghodrati@iust.ac.ir)

(دریافت: ۸۷/۰۴/۰۵، پذیرش نهایی: ۸۷/۰۶/۱۱)

چکیده

پدیده راستاگرایی گسلش باعث ایجاد تغییرات در مولفه‌های جنبش نیرومند زمین می‌شود که از آن جمله می‌توان به تغییرات مولفه افقی عمود بر گسل و مولفه افقی موازی با گسل اشاره کرد که در مورد پارامتر سرعت جنبش زمین بیشتر مشهود است. در این مقاله فاکتوری که میزان اثر پدیده راستاگرایی در روابط تضعیف مربوط به سرعت جنبش نیرومند زمین را تعیین می‌کند، معرفی می‌شود. این فاکتور به منظور لحاظ کردن اثر پدیده راستاگرایی در روابط تضعیف سرعت جنبش نیرومند زمین، بر پایه مدل‌سازی ارائه می‌شود. بدین منظور زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ در آستانه-سیلاخور، با استفاده از روش اجزای محدود و با نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی می‌شود.

پارامترهای مورد بررسی شامل نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (v_n) به مولفه افقی سرعت موازی با گسل (v_p) و نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به مولفه افقی میانگین (v) است. نتایج حاصل از داده‌های جنبش نیرومند زمین مربوط به زمین‌لرزه ۱۳۸۵ در آستانه-سیلاخور و داده‌های حاصل از مدل‌سازی این زمین‌لرزه نشان‌دهنده افزایش نسبت مولفه افقی عمود بر گسل به مولفه افقی موازی با گسل سرعت در دو انتهای گسل، هم در جهت پیشرو که سرعت بیشتر است و چه در جهت پسرو که سرعت کمتری دارد است، یعنی نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به مولفه افقی موازی با گسل وابسته به زاویه راستاگرایی است. همچنین، نسبت سرعت مولفه افقی عمود بر گسل به سرعت افقی میانگین با استفاده از مدل‌سازی زمین‌لرزه در آستانه-سیلاخور با روش اجزای محدود تعیین شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که این نسبت با تغییر زاویه راستاگرایی، فاصله تا رومرکز زمین‌لرزه و طول گسیختگی تغییر می‌کند. در مورد داده‌های ثبت شده از زمین‌لرزه در آستانه-سیلاخور نیز همین روند قابل مشاهده است. بدین ترتیب رابطه‌ای برای تعیین تغییرات v_n/v_p برحسب زاویه راستاگرایی ارائه شده است. معادله پیشنهاد شده برای نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به سرعت افقی میانگین (v_n/v) برحسب $(R/L)\cos^2\theta$ برای زمین‌لرزه مدل‌سازی شده مورد نظر به دست آمده است. این معادله برای دخالت دادن راستاگرایی در روابط تضعیف مربوط به سرعت در چنین ناحیه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: راستاگرایی، زمین‌لرزه در آستانه-سیلاخور، روش اجزای محدود، سرعت جنبش نیرومند زمین

۱ مقدمه

گسیختگی به طرف یک ایستگاه با سرعتی نزدیک به سرعت موج برشی باعث می‌شود تا بیشتر انرژی لرزه‌ای حاصل از گسیختگی، در قالب یک تپ بزرگ که در ابتدای نگاشت ثبت می‌شود به ایستگاه برسد. این تپ بزرگ نشان‌دهنده اثرات تجمعی انرژی لرزه‌ای حاصل از گسلش است. الگوی تابشی جابه‌جایی برشی روی گسل باعث می‌شود تا این تپ بزرگ در جهت عمود بر صفحه

عوامل متعددی بر پارامترهای جنبش نیرومند زمین تأثیر می‌گذارند که از آن جمله می‌توان به فاصله، بزرگای، شرایط زمین‌شناسی زیر ایستگاه‌ها، عمق و مدت دوام گسیختگی، پدیده راستاگرایی و الگوی تابش اشاره کرد. زمین‌لرزه در اثر گسیختگی در یک گسل به وجود می‌آید که از یک نقطه شروع می‌شود و با سرعتی که تقریباً برابر با سرعت موج برشی منطقه است انتشار می‌یابد. انتشار

راستاگرایی بر طیف پاسخ شتاب، مدت دوام شتاب زمین و نسبت بین مولفه افقی شتاب عمود بر راستای گسل به مولفه افقی شتاب موازی با راستای گسل پرداختند. آنها مطرح ساختند که اثر راستاگرایی در تناوب‌های بیش از ۰/۶ ثانیه مشهود است. آگارد و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از مدل‌سازی با روش اجزای محدود با نرم‌افزار IDEAS به بررسی اثر راستاگرایی بر مولفه افقی سرعت جنبش زمین در زمین‌لرزه ۱۹۹۱ چی-چی تایوان پرداختند. در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی راستاگرایی در زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور ($M_w = 5/9$)، با روش اجزای محدود (به کمک نرم‌افزار ANSYS) تأثیر راستاگرایی بر سرعت جنبش نیرومند زمین بررسی شده است. با توجه به تأثیر این پدیده بر مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (V_n)، اثر راستاگرایی بر نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (V_n) به مولفه افقی سرعت موازی با گسل (V_p) و نیز نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (V_n) به سرعت افقی میانگین (V) کمی شده است و روابطی برای دخالت دادن تأثیر راستاگرایی در روابط تضعیف مربوط به سرعت افقی جنبش زمین در چنین ناحیه‌ای ارائه شده است.

۲ زمین‌لرزه یازدهم فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور

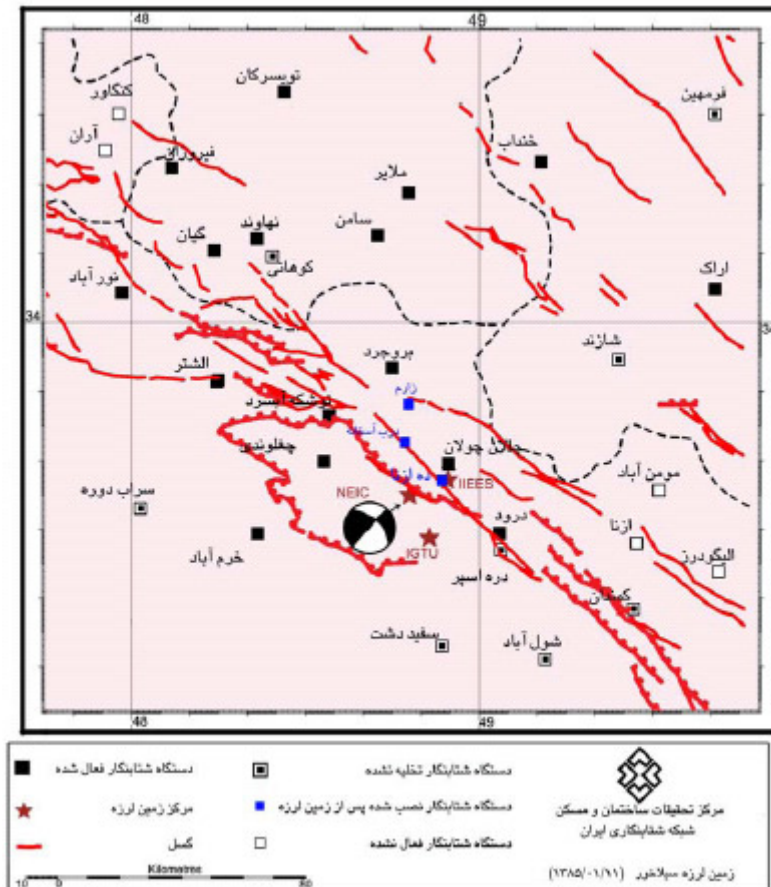
زمین‌لرزه یازدهم فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور را شبکه‌های لرزه‌نگاری کشور و مؤسسه‌های بین‌المللی مکان‌یابی و گزارش کردند. موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران بزرگای این زمین‌لرزه را ۵/۹ در مقیاس امواج درونی و رومرکز آن را نقطه‌ای در مختصات ۳۳/۴۸ درجه عرض شمالی و ۴۸/۸۶ درجه طول شرقی گزارش کرد. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله رومرکز را در نقطه‌ای با مختصات ۳۳/۶۲ درجه عرض شمالی و ۴۷/۹۱ درجه طول شرقی و بزرگای زمین‌لرزه را ۶/۱ در

گسل قرار گیرد و راستاگرایی پیشرو رخ دهد (داگلاس و همکاران، ۱۹۸۸). راستاگرایی پیشرو هنگامی پدید می‌آید که دو شرط برقرار باشد: ۱- جبهه گسیختگی به سمت ایستگاه انتشار یابد ۲- جهت لغزش در روی گسل، به سمت ایستگاه باشد. اگر ایستگاه در راستایی قرار گیرد که جبهه گسیختگی از ایستگاه دور شود، روی نگاهت، پراکندگی امواج دریافتی قابل مشاهده است که باعث افزایش مدت دوام و کاهش دامنه امواج ثبت شده روی نگاهت‌ها می‌شود. در این حالت راستاگرایی پسرو رخ می‌دهد (سامرویل و همکاران، ۱۹۹۷).

اثر زاویه بین امتداد گسیختگی و راستای انتشار امواج (زاویه راستاگرایی) را اولین بار بنیوف (۱۹۵۵) به‌مثابه پدیده‌ای شبیه به اثر دوپلر مطرح ساخت. وی مسئله افزایش دامنه امواج در جهت گسیختگی و کاهش دامنه در خلاف جهت گسیختگی را عنوان کرد. بررسی پدیده راستاگرایی بر پایه داده‌های زمین‌لرزه‌ای را نخستین بار هاسکل (۱۹۶۹) با استفاده از داده‌های شتابنگاری زمین‌لرزه ۱۹۶۶ پارکفیلد عملی ساخت. در بررسی پیش‌گفته این نتیجه به‌دست آمد که دامنه امواج حاصل از جنبش نیرومند زمین در مولفه افقی عمود بر گسل، در ایستگاه‌های پیشرو و پسرو متفاوت است. بولن و بولت (۱۹۸۵) اثرات ایجاد شده روی الگوی تابش در حوزه بسامد را در حکم پدیده راستاگرایی مطرح کردند. بوت‌رایت (۱۹۸۲) به تجزیه و تحلیل شتابنگاشت‌های حاصل از زمین‌لرزه ۱۹۸۰ لیورمور پرداخت تا اثر زاویه راستاگرایی را مشخص کند. وی به این نتیجه رسید که با حذف اثر ساختگاه زاویه راستاگرایی می‌تواند حتی تا ۱۰ برابر روی دامنه‌ی جنبش ثبت شده تأثیرگذار باشد. وی همچنین دریافت که از بین پارامترهای جنبش نیرومند زمین، پدیده راستاگرایی، روی سرعت جنبش زمین بهتر دیده می‌شود. سامرویل و همکاران (۱۹۹۷) با استفاده از داده‌های میدان نزدیک ۲۱ زمین‌لرزه به بررسی اثر

گسل دورود که در حکم یکی از مهم ترین قطعات لرزه‌زا از گسل عهد حاضر مطرح است، مسبب زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه- سیلاخور شناخته شده است. این گسل با راستای ۳۱۳ درجه دارای روند شمال غربی- جنوب شرقی است. طول این گسل افزون بر ۱۰۰ کیلومتر است که در زمین لرزه درب آستانه- سیلاخور شکستگی در ۴۴ کیلومتر از طول گسل به صورت یک طرفه از جنوب شرق به شمال غرب، روی داده است (پاکزاد و میرزائی، ۱۳۸۶). در شکل ۱ گسل های منطقه و رومرکز زمین لرزه به همراه سازوکار تعیین شده مرکز اطلاع رسانی زمین لرزه ایالات متحده برای این زمین لرزه ارائه شده است.

مقیاس محلی گزارش کرد. مرکز ملی اطلاع رسانی زمین لرزه سازمان زمین شناسی ایالات متحده بزرگای گشتاوری این رویداد را ۶/۱ و رومرکز آن را نقطه ای با مختصات ۳۳/۵۸ درجه عرض شمالی و ۴۸/۹۴ درجه طول شرقی اعلام کرد. سازوکار ارائه شده برای این زمین لرزه را هاروارد (HRVD) و مرکز اطلاع رسانی زمین لرزه ایالات متحده (NEIC)، امتدادلغز راستگرد با مولفه نرمال است. همچنین، پاکزاد و میرزائی (۱۳۸۶) با استفاده از روش برگردان خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان، سازوکار به دست آمده برای زمین لرزه اصلی را امتدادلغز راستگرد تعیین کردند.



شکل ۱. گسل های منطقه دورود، رومرکز زمین لرزه و سازوکار کانونی تعیین شده با NEIC برای زمین لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه- سیلاخور (میرزائی علویچه و همکاران، ۱۳۸۵).

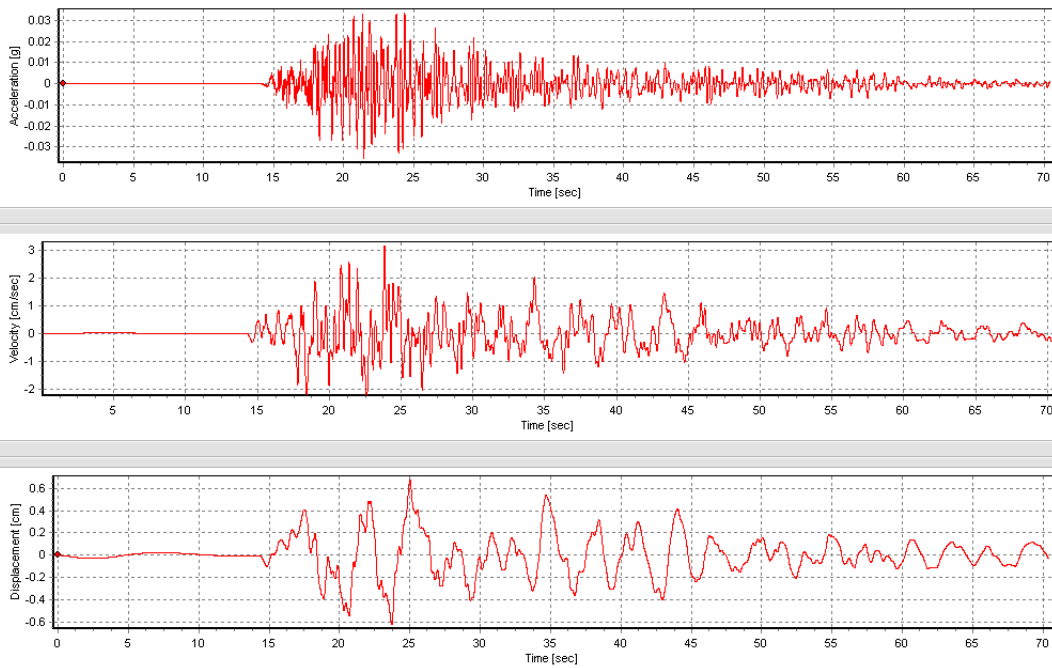
۱-۲ داده‌های جنبش نیرومند زمین

که در شمال غرب رومرکز قرار گرفته‌اند بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل را بیشتر از ایستگاه‌هایی که در جنوب شرق رومرکز زمین‌لرزه قرار گرفته‌اند ثبت کرده‌اند (میرزایی علویجه و همکاران، ۱۳۸۵).

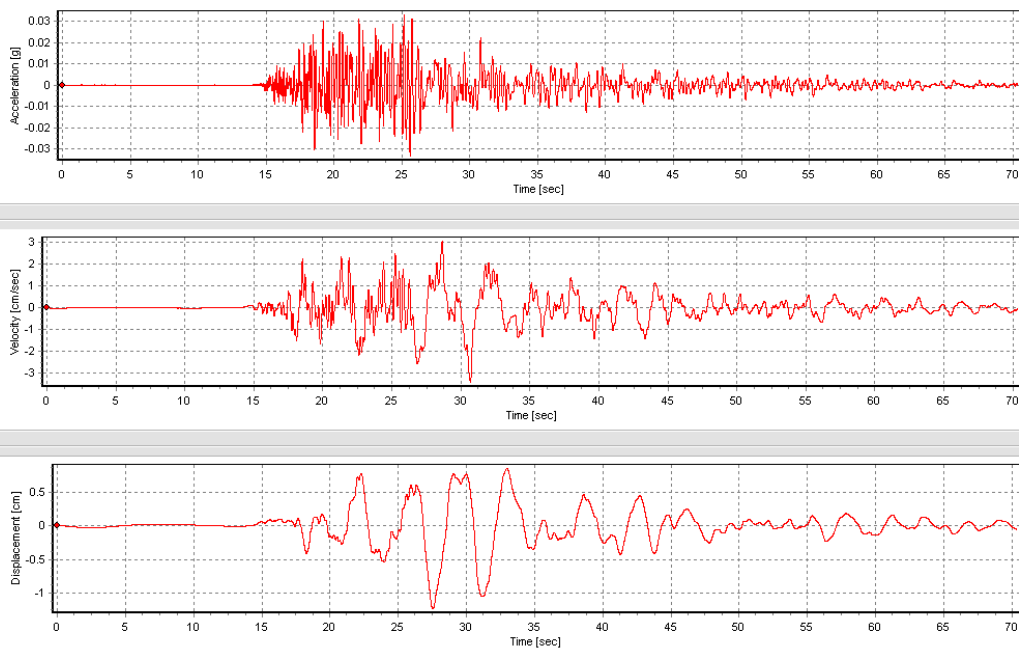
زمین‌لرزه یازدهم فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه- سیلاخور را دستگاه‌های شتاب‌نگار رقمی SSA-2 به ثبت رساندند که مشخصات مربوط به ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است. با بررسی شتابنگاشت‌های موجود، ملاحظه شد که کلیه ایستگاه‌هایی

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های شتابنگاری مورد استفاده در این پژوهش (برگرفته از میرزایی علویجه و همکاران، ۱۳۸۵).

زاویه نصب		موقعیت جغرافیایی		نام ایستگاه	ردیف
T	L	N	E		
۹۵	۵	۳۳/۵۸	۴۸/۲۶	الشر	۱
۱۶۱	۷۱	۳۳/۷۸	۴۸/۶۲	توشک آبسرد	۲
۳۲۰	۲۳۰	۳۴/۵۵	۴۸/۴۲	تویسرکان	۳
۱۴۹	۵۹	۳۳/۶۵	۴۸/۹۱	چالان چولان	۴
۲۰۰	۱۱۰	۳۳/۶۳	۴۸/۵۵	چغلوندی	۵
۳۵۵	۲۶۵	۳۳/۴۸	۴۸/۳۵	خرم آباد	۶
۳۱۵	۴۵	۳۴/۴۰	۴۹/۱۵	خنداب	۷
۱۱۹	۲۹	۳۳/۴۵	۴۹/۰۶	دره اسیر	۸
۳۰۵	۲۱۵	۳۳/۴۶	۴۹/۰۷	دورود	۹
۱۱۲	۲۲	۴۳/۱۷	۴۸/۲۴	گیان	۱۰
۲۹۸	۲۰۷	۳۴/۲۱	۴۸/۷۰	سامن	۱۱
۱۱۰	۲۰	۳۳/۲۱	۴۸/۸۹	سپیددشت	۱۲
۲۶۵	۱۷۵	۳۳/۹۳	۴۹/۴۰	شازند	۱۳
۳۰۰	۲۱۰	۳۳/۲۰	۴۹/۱۸	شول آباد	۱۴
۳۰	۳۰۰	۳۴/۶۸	۴۸/۷۴	گنبد	۱۵
۳۰۵	۲۱۵	۳۴/۳۶	۴۸/۱۱	فیروزان	۱۶
۱۱۰	۲۰	۳۴/۳۰	۴۸/۸۰	ملایر	۱۷
۲۴۶	۱۵۶	۳۴/۰۶	۴۷/۹۷	نورآباد	۱۸
۱۹۲	۹۲	۳۴/۱۸	۴۸/۳۷	نهایند	۱۹



شکل ۲. نگاهت‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی مولفه افقی عمود بر گسل درود، ثبت شده در ایستگاه دورود.



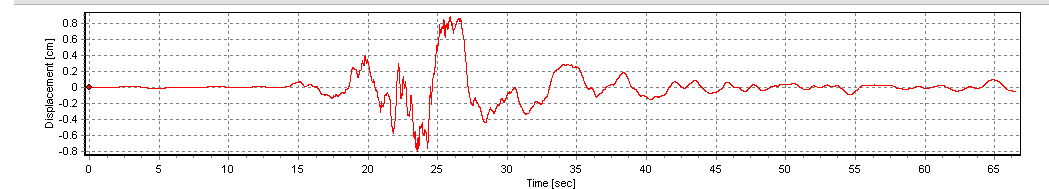
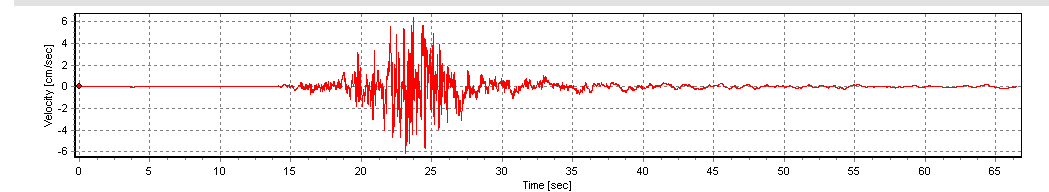
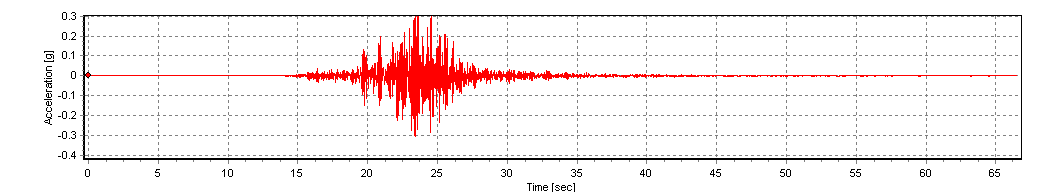
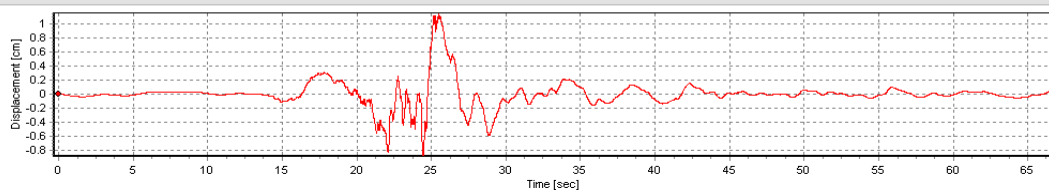
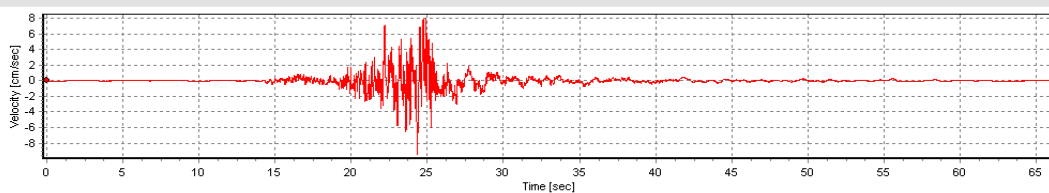
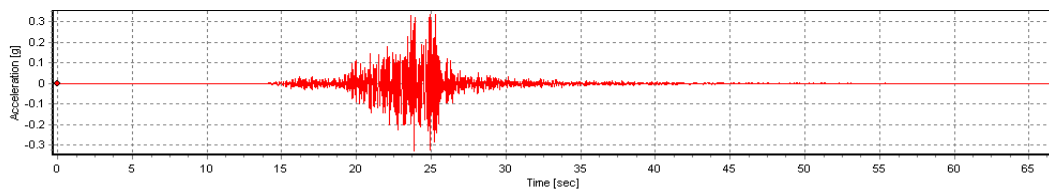
شکل ۳. نگاهت‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی مولفه افقی موازی با گسل درود، ثبت شده در ایستگاه دورود.

و بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل 3.1 cm/s^2 را نشان می‌دهد (شکل‌های ۲ و ۳)، در صورتی که ایستگاه توشک آبسرد که در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال غرب

برای مثال، ایستگاه دورود که در فاصله حدود ۳۱ کیلومتری جنوب شرق رو مرکز زلزله واقع شده است با بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل حدود 3.2 cm/s^2

راستگرد)، جهت شکستگی رو به شمال غرب است و اثر راستاگرایی گسل مسبب زمین لرزه باعث ثبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل بالاتر در ایستگاه های واقع در شمال غرب کانون زمین لرزه شده است.

رومرکز زمین لرزه قرار دارد با بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل برابر با 8 cm/s^2 و بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل 2.6 cm/s^2 را مشخص می سازد (شکل های ۵ و ۴). با توجه به سازوکار گسل (امتداد لغز



شکل ۵. نگاشت های شتاب، سرعت و جابه جایی مولفه افقی موازی با گسل، ثبت شده در ایستگاه توشک آیسرد.

۳ تصحیح داده‌های شتابنگاری

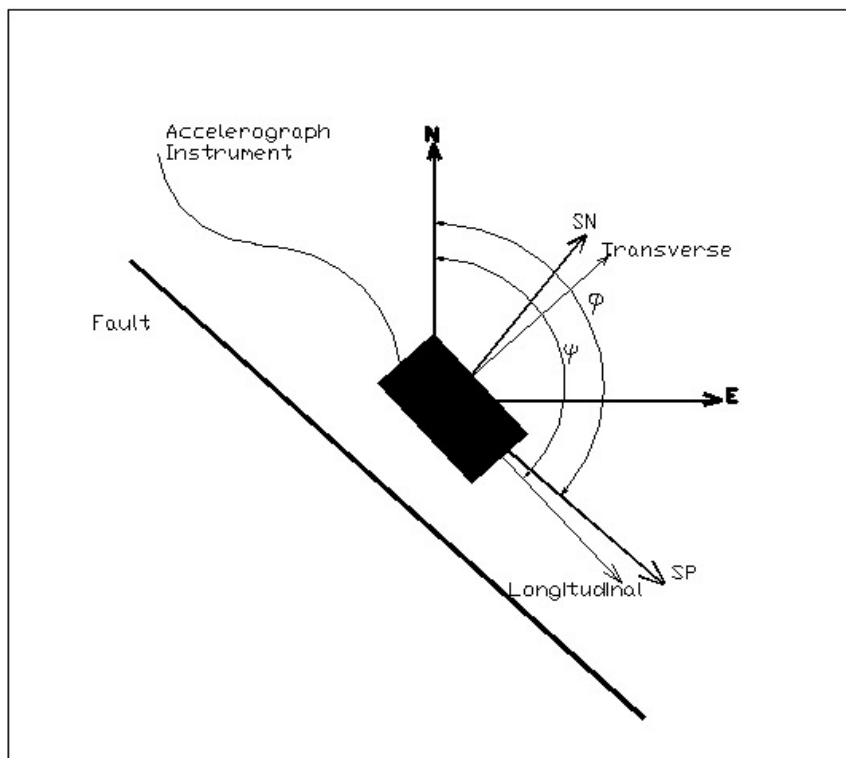
برای بررسی داده‌های شتابنگاری زمین‌لرزه درب آستانه-سیلاخور، تصحیح خط مبنا به صورت خطی (Linear) و فیلتر کردن داده‌ها با استفاده از فیلتر باترورت مرتبه چهار با نرم‌افزار Seismosignal صورت گرفته است. با توجه به تأثیر راستاگرایی بر مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (هاسکل، ۱۹۶۹) نیاز است داده‌های شتاب‌نگاری در دو راستای عمود بر گسل و موازی با گسل دورود تصویر شوند. معادله ۱ برای تصویر کردن مولفه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (کنت و ساود، ۲۰۰۲):

$$\begin{aligned} S_p &= N \cos(\varphi - \psi) + E \sin(\varphi - \psi) \\ S_N &= -N \sin(\varphi - \psi) + E \cos(\varphi - \psi) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن S_p مولفه افقی موازی با گسل، S_N مولفه افقی عمود بر گسل، φ راستای گسل و ψ آزیموت محورهای دستگاه ثبت است (شکل ۶).

۴ پردازش داده‌های زمین‌لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور

با فرض همگن بودن زمین‌شناسی ساختمانی در جهت‌های متفاوت، تأثیر اثر ساختمانی روی دو مولفه افقی عمود بر گسل و موازی با گسل تقریباً یکسان خواهد بود، بنابراین، نسبت مولفه‌های افقی باعث کمینه شدن اثر ساختمانی در منطقه می‌شود. بدین ترتیب برای بررسی اثر راستاگرایی بر سرعت جنبش نیرومند زمین در زمین‌لرزه درب آستانه-سیلاخور، نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت



شکل ۶. چرخش مولفه‌ها در دو جهت عمود بر گسل (S_N) و موازی با گسل (S_p) (کنت و ساود، ۲۰۰۲).

شکل ۸ نسبت بیشینه سرعت مولفه افقی عمود بر گسل دورود به بیشینه سرعت افقی میانگین (V_n/V) را برحسب زاویه راستاگرایی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مورد داده‌های زمین‌لرزه درب آستانه-سیلاخور این نسبت هم در جهت پیشرو و هم در جهت پسرو افزایش دارد و بیشترین مقدار در جهت پیشرو (زوایای راستاگرایی کم) قابل مشاهده است. رابطه ۳ نسبت بیشینه سرعت مولفه افقی عمود بر گسل به بیشینه سرعت افقی میانگین برای داده‌های حاصل از زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور، برحسب زاویه راستاگرایی (θ) را نشان می‌دهد.

$$\frac{V_n}{V} = 2 \times 10^{-5} \theta^2 - 0.0045 \theta + 0.8797$$

$$(R^2 = 0.45)$$

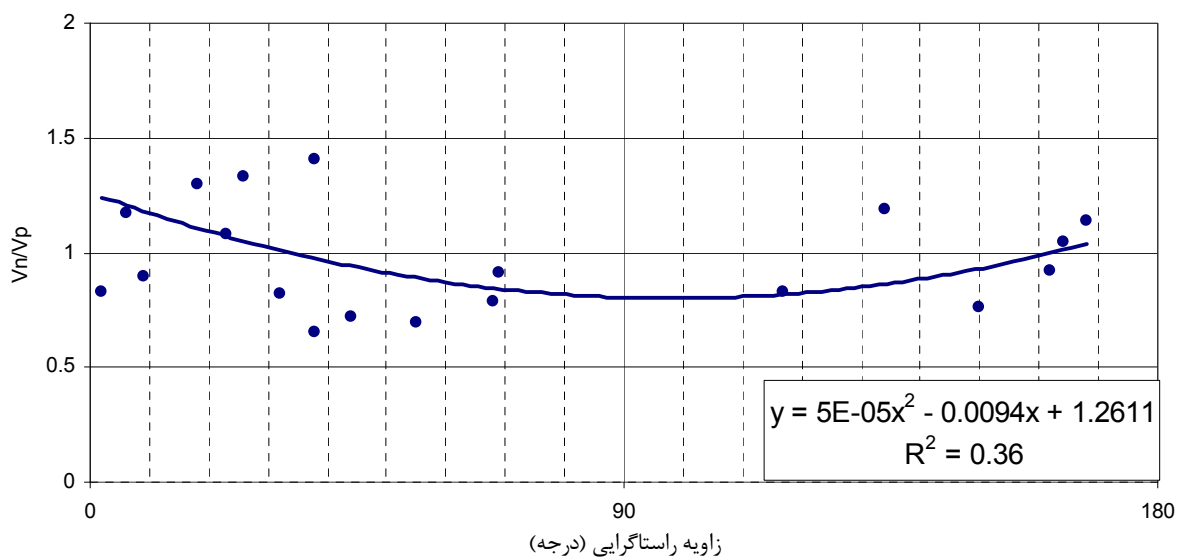
(۳)

عمود بر گسل (V_n) به بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل (V_p) و بیشینه سرعت افقی میانگین (V) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۷ نمودار نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل دورود به بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل در ایستگاه‌های ثبت را برحسب زاویه راستاگرایی (θ) نشان می‌دهد. نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل، تابع الگوی تابش زمین‌لرزه است. همان‌طور که در نمودار نیز مشخص می‌شود، این نسبت در جهت پیشرو و پسرو افزایش دارد، اما این افزایش در جهت پیشرو بیشتر است. رابطه ۲ نشان‌دهنده معادله منحنی درجه ۲ برازش یافته به داده‌های حاصل از زمین‌لرزه یاد شده و بیانگر نسبت V_n/V_p برحسب زاویه راستاگرایی است.

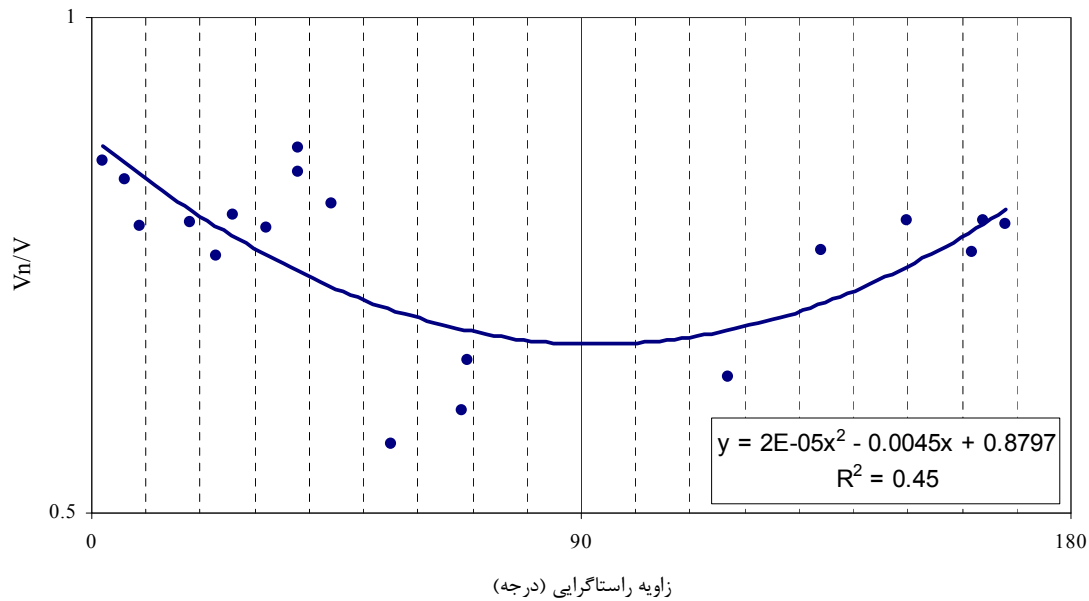
$$\frac{V_n}{V_p} = 5 \times 10^{-5} \theta^2 - 0.0094 \theta + 1.2611$$

$$(R^2 = 0.36)$$

(۲)



شکل ۷. نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل دورود (V_n) به بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل (V_p) در ایستگاه‌های ثبت برحسب زاویه راستاگرایی برای زمین‌لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور



شکل ۸. نسبت پیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل دورود به پیشینه مولفه افقی سرعت میانگین در ایستگاه‌های ثبت برحسب زاویه راستاگرایی برای زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه- سیلاخور.

مدلسازی از جزء 42 Plane در نرم افزار ANSYS (جزء دوبعدی با ساختار جامد) که دارای خواص خمیرسانی، خزش، تورم، انحراف و کجی در اثر تنش و مقادیر بزرگ کرنش است، استفاده شد. خصوصیات اجزای استفاده شده در مدل، در سه قسمت؛ گسل (محیط کشسان غیرخطی با ضریب کشسانی $(E) 71 \times 10^4 t/m^2$ ، ضریب پواسون $(\nu) 0.25$ ، تنش تسلیم $(\delta_y) 5000 N/M^2$ و جرم حجمی $(\rho) 0.28 t/m^3$ ، محیط انتشار امواج (محیط همگن و با رفتار کشسان خطی و چگالی حجمی محیط، ضریب کشسانی و ضریب پواسون به ترتیب $0.28 t/m$ ، $71 \times 10^4 t/m^2$ و 0.25 و ضریب میرایی ۵٪) مطابق مدل سازی آگارد و همکاران (۲۰۰۴) و مرزهای جذب با ضریب کشسانی متغیر، برای جذب امواج لرزه‌ای تعیین شدند. با استفاده از اطلاعات ارائه شده با پاکزاد و میرزائی (۱۳۸۶) برای تعیین تابع لغزش، پیشینه جابه‌جایی $2/2$ متر و سرعت انتشار گسیختگی

۵ مدل سازی اثر راستاگرایی با روش اجزای محدود پس از تعیین چگونگی اثر راستاگرایی بر سرعت جنبش نیرومند زمین در زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه- سیلاخور، به منظور تعیین ضریب راستاگرایی جهت بکارگیری در روابط تضعیف مربوط به سرعت، از مدل سازی گسلش با روش اجزای محدود استفاده شد. با توجه به شکل ماتریسی اجزای محدود یعنی $[m]\{\ddot{U}(t)\} + [c]\{\dot{U}(t)\} + k\{U(t)\} = \{F(t)\}$ که در آن [m] ماتریس جرم، [c] ماتریس میرایی، [k] ماتریس سفتی، [F] بردار نیرو و \dot{U} و \ddot{U} به ترتیب سرعت و شتاب رانشان می‌دهند و ضریب راستاگرایی تعیین خواهد شد. برای این کار در ابتدا مدل گسل دورود با نرم افزار اجزای محدود ANSYS طراحی شد. این گسل با سازوکار کانونی امتداد لغز راستگرد غالب و طول شکستگی ۴۴ کیلومتر، به گونه‌ای در محیط مدل سازی شده مستطیل شکل، با ابعاد ۲۰۰ Km در ۱۵۰ Km برای انتشار امواج لرزه‌ای قرار گرفت که هندسه محیط کاملاً متقارن باشد. در این

گرفتند. مطابق شکل ۹ ضریب $X \cdot \cos\theta$ را می توان بصورت رابطه ۴ تعریف کرد.

$$X \cdot \cos\theta = \frac{s}{L} \cdot \cos\theta = \left(\frac{R}{L}\right) \cos^2\theta \quad (4)$$

که در آن R فاصله ایستگاه تا رومرکز زمین لرزه است. بدین ترتیب در صورت نامعلوم بودن طول گسیختگی، فقط با استفاده از طول گسل و فاصله ایستگاه تا رومرکز زمین لرزه می توان پارامتر X را تعیین کرد.

۲-۵ نتایج مدل سازی

شکل ۱۰ نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به مولفه افقی سرعت موازی با گسل حاصل از مدل سازی زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه- سیلاخور را نشان می دهد. با توجه به الگوی تابش و پدیده راستاگرایی، در زاویه راستاگرایی صفر درجه (جهت پیشرو) افزایش مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (V_n) و کاهش مولفه افقی سرعت موازی با گسل (V_p) قابل مشاهده است؛ بنابراین، مطابق شکل ۱۰ نسبت V_n/V_p در این زاویه بیشینه $V_n/V_p = 1/76$ است. در زاویه راستاگرایی 90° کاهش مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (V_n) و افزایش مولفه افقی سرعت موازی با گسل (V_p) باعث کاهش V_n/V_p تا $0/75$ شده است.

گرفته شد و سپس تاریخچه های زمانی سرعت جنبش نیرومند زمین در فاصله یکسان از منبع زمین لرزه با زوایای راستاگرایی متفاوت مطابق روش آگارد و همکاران (۲۰۰۴) تعیین شد. روش آگارد و همکاران (۲۰۰۴) برای بررسی اثر راستاگرایی شامل مراحل زیر است:

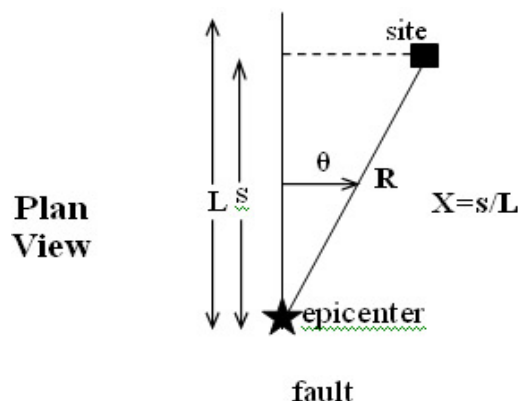
۱- تعیین مدل مناسب برای ناحیه گسلش و اطراف آن برای استفاده نرم افزار اجزای محدود ANSYS؛

۲- اعمال شکست در گسل مدل سازی شده و استخراج پارامترهای جنبش زمین در مکان هایی با فواصل یکسان از منبع زمین لرزه و در راستاهای متفاوت نسبت به گسل مسبب زمین لرزه؛

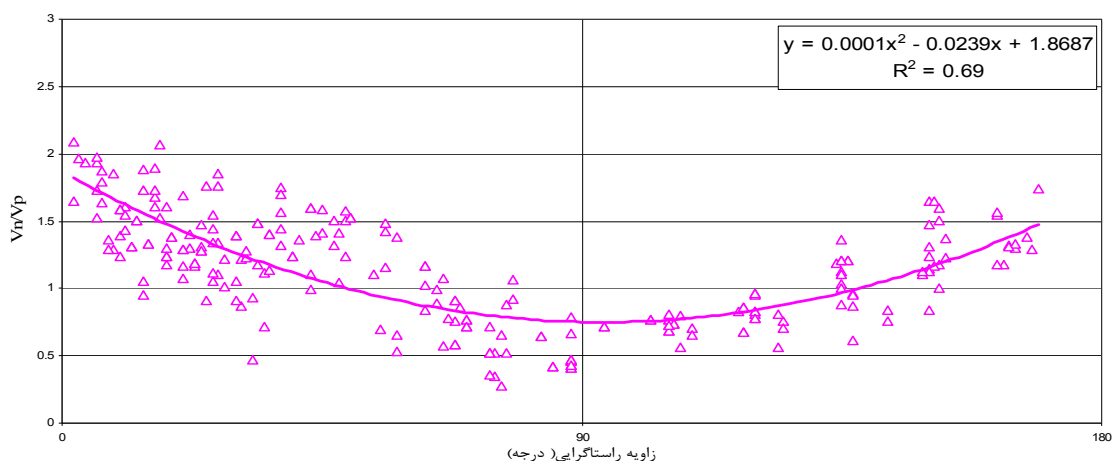
۳- ارائه رابطه ریاضی مناسب برای اثر راستاگرایی مشاهده شده.

۱-۵ پارامترهای موثر در راستاگرایی

سامرویل و همکاران (۱۹۹۷) در بررسی اثر راستاگرایی در گسل های امتداد لغز از پارامترهای θ (زاویه راستاگرایی)، X (نسبت بین s (طول گسیختگی) به L (طول گسل)) استفاده کردند. آنها بر این اساس ضریب $X \cdot \cos\theta$ را در نقش معیاری برای دخالت دادن اثر راستاگرایی در نظر



شکل ۹. پارامترهای راستاگرایی X و θ برای گسلش امتداد لغز (سامرویل و همکاران، ۱۹۹۷).



شکل ۱۰. نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل مدل سازی شده (V_n) به بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل مدل سازی شده (V_p) بر حسب زاویه راستاگرایی.

صفر درجه تا 180° مشخص شده است. در مورد نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (V_n) به سرعت افقی میانگین (V) نیز روندی شبیه به نمودار شکل ۱۰ مشاهده می شود. افزایش مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (V_n) باعث افزایش نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به بیشینه مولفه افقی سرعت میانگین (V_n/V) (نزدیک به یک) می شود. این افزایش در زاویه راستاگرایی 180° نیز مشهود است که به دلیل قرار گرفتن در جهت پسر و مقدار آن از نسبت V_n/V در جهت پیشرو کمتر است ($V_n/V = 0/186$). کمترین مقدار V_n/V در زاویه راستاگرایی 90° درجه ($V_n/V = 0/6$) مشاهده می شود که با الگوی تابش در گسلش امتداد لغز (شکل ۱۲) همخوانی دارد. در رابطه ۶ تغییرات V_n/V نسبت به زاویه راستاگرایی برای داده های حاصل از مدل سازی زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه - سیلاخور مشخص شده است.

$$\frac{V_n}{V} = 4 \times 10^{-5} \theta^2 - 0.00730 \theta + 0.9388 \quad (6)$$

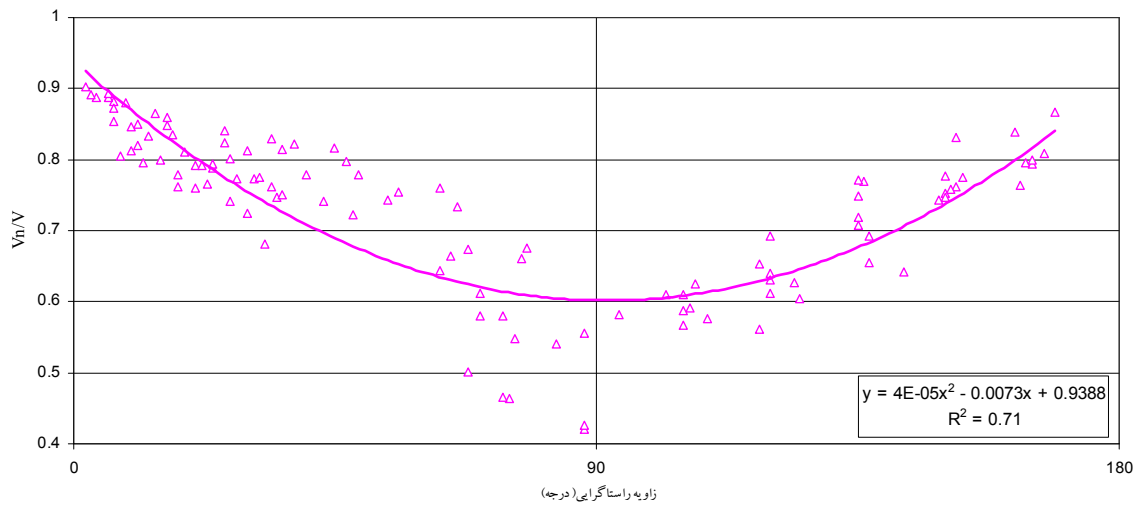
$(R^2 = 0.71)$

با افزایش زاویه راستاگرایی از 90° تا 180° ، با توجه به الگوی تابش، مولفه افقی سرعت عمود بر گسل افزایش می یابد، در حالی که مولفه افقی سرعت موازی با گسل دچار کاهش می شود که در نتیجه، افزایش V_n/V_p ناشی از تغییر زاویه راستاگرایی از 90° تا 180° قابل مشاهده است، به طوریکه در زاویه راستاگرایی 180° ، نسبت V_n به V_p برابر $1/58$ است. تأثیر راستاگرایی باعث نامتقارن شدن الگوی تابش می شود (لی و والاس، ۱۹۹۵) که اثر آن در زوایای راستاگرایی صفر درجه و 180° مشهود است، به طوریکه مقدار V_n/V_p در زاویه راستاگرایی 180° (جهت پسر و) کمتر از V_n/V_p در زاویه راستاگرایی صفر درجه (جهت پیشرو) است (شکل ۸). رابطه ۵ نسبت V_n/V_p بر حسب زاویه راستاگرایی (θ)، با استفاده از مدل سازی زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه - سیلاخور را نشان می دهد:

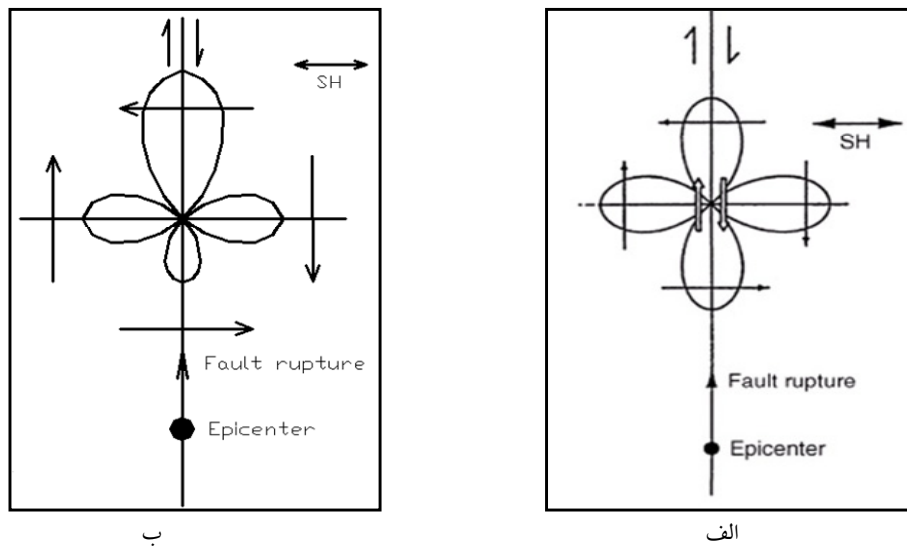
$$\frac{V_n}{V_p} = 0.0001 \theta^2 - 0.0239 \theta + 1.8687 \quad (5)$$

$(R^2 = 0.69)$

در شکل ۱۱ نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به مولفه افقی سرعت میانگین برای زوایای راستاگرایی



شکل ۱۱. نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل (V_h) به بیشینه مولفه افقی سرعت میانگین (V) زمین لرزه مدل سازی شده برحسب زاویه راستاگرایی.



شکل ۱۲. الگوی تابش برای گسلش امتداد لغز قائم. الف- در حالت منبع زمین لرزه نقطه‌ای (شکستگی متقارن) (لی و والاس، ۱۹۹۵)

ب- در حالت شکستگی یک طرفه (جنوب به شمال) (سامرویل و همکاران، ۱۹۹۷)

کمتر از طول گسیختگی است نیز مشخص شده‌اند، که همخوانی خوبی با نمودار رسم شده در شکل ۱۳ دارند. مقدار $(R/L)\cos^2\theta$ در زمانی که ایستگاه کاملاً در جهت پیشرو قرار دارد (θ برابر صفر درجه) بیشینه است؛ بنابراین، زمانی که ایستگاه کاملاً در جهت پیشرو و دقیقاً در انتهای گسل قرار داشته باشد ($R/L=1$) این مقدار برابر

شکل ۱۳ تغییرات بیشینه سرعت مولفه افقی عمود بر گسل به بیشینه سرعت افقی میانگین را برحسب $(R/L)\cos^2\theta$ نشان می‌دهد که در معادله γ رابطه مربوط به این تغییرات آورده شده است. در نمودار پیش گفته نسبت V_h به V نگاشت‌های ثبت شده در زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه- سیلاخور که فاصله آنها تا گسل مسبب زمین لرزه

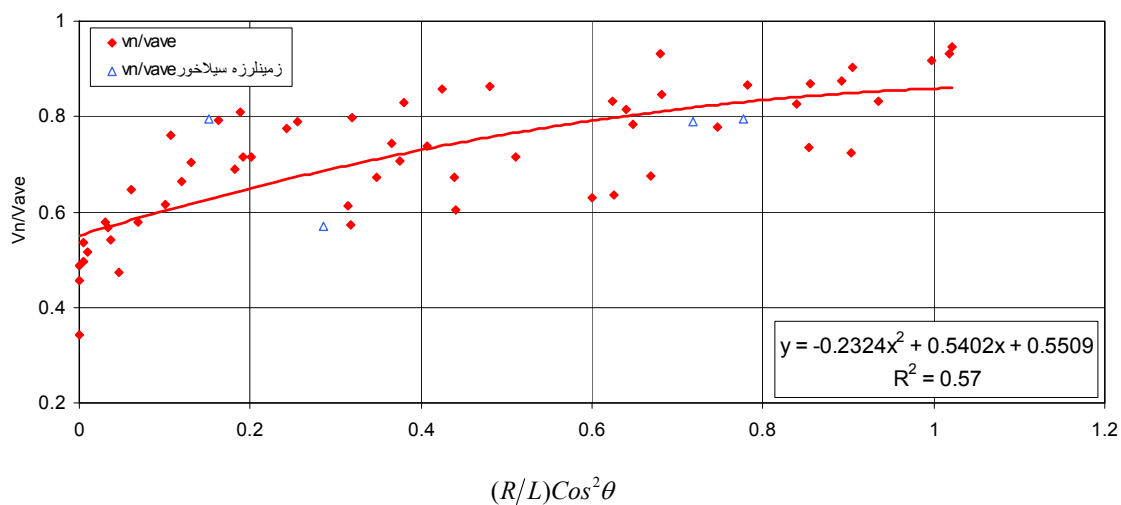
با هم دارند. مدل ریاضی و الگوی تابش نشان دهنده برابری مولفه افقی عمود بر گسل و موازی با گسل در زاویه 45° است، در نتایج مدل سازی و داده های واقعی، مولفه عمود بر گسل و موازی با گسل در زاویه راستاگرایی 50° با هم برابر هستند که این امر نشان دهنده دقت مناسب داده های حاصل از زمین لرزه واقعی و نیز داده های حاصل از مدل سازی است. همان طور که انتظار می رود این نسبت در دو انتهای گسل، چه در جهت پیشرو که سرعت بیشتر است و چه در جهت پسرو که سرعت کمتر است، افزایش می یابد. کمترین مقدار در زاویه راستاگرایی 90° است که نشان دهنده افزایش V_p در این زاویه است به طوری که V_p بزرگ تر از V_n است. بنابراین؛ می توان چنین نتیجه گرفت که نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به مولفه افقی سرعت موازی با گسل وابسته به زاویه راستاگرایی است.

عدد ۱ می شود. با توجه به معادله ۷ در فاصله $R \leq L$ با افزایش فاصله ایستگاه تا رومرکز زمین لرزه، اثر راستاگرایی در حال افزایش است و بیشترین اثر را در انتهای گسل (جایی که R برابر L است) دارد. در فاصله $R > L$ با افزایش فاصله ایستگاه تا رومرکز زمین لرزه (R) ، کاهش اثر راستاگرایی مورد انتظار است، بنابراین؛ رابطه ۷ برای ایستگاه هایی که فاصله آنها تا رومرکز زمین لرزه بیشتر از طول گسیختگی است، صادق نیست.

$$\frac{V_n}{V} = -0.2324 \left(\frac{R}{L} \cdot \cos^2 \theta \right)^2 + 0.5402 \left(\frac{R}{L} \cdot \cos^2 \theta \right) + 0.5509 \quad (V)$$

$(R^2 = 0.57) \quad \text{For } R \leq L$

۶ مقایسه نتایج حاصل از داده های واقعی و مدل سازی در شکل ۱۴ نمودار بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل بر پایه



شکل ۱۳. نسبت مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به سرعت افقی میانگین زمین لرزه مدل سازی شده بر حسب $(R/L) \cos^2 \theta$.

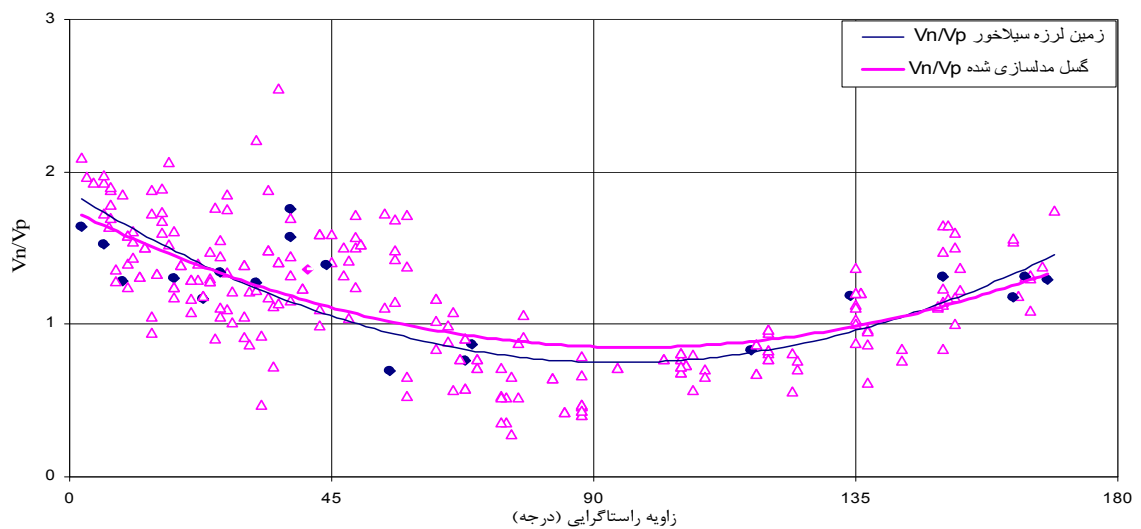
شکل ۱۵ نمودارهای بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به بیشینه مولفه افقی سرعت میانگین در زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور و گسل مدل سازی شده را نشان می دهد. دو نمودار انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. در هر دو نمودار، کاهش V_n/V در زاویه

داده های ایستگاه های ثبت کننده زمین لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور و همچنین منحنی بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل حاصل از مدل سازی زمین لرزه درب آستانه-سیلاخور مشخص شده است. این دو منحنی تطابق مناسبی

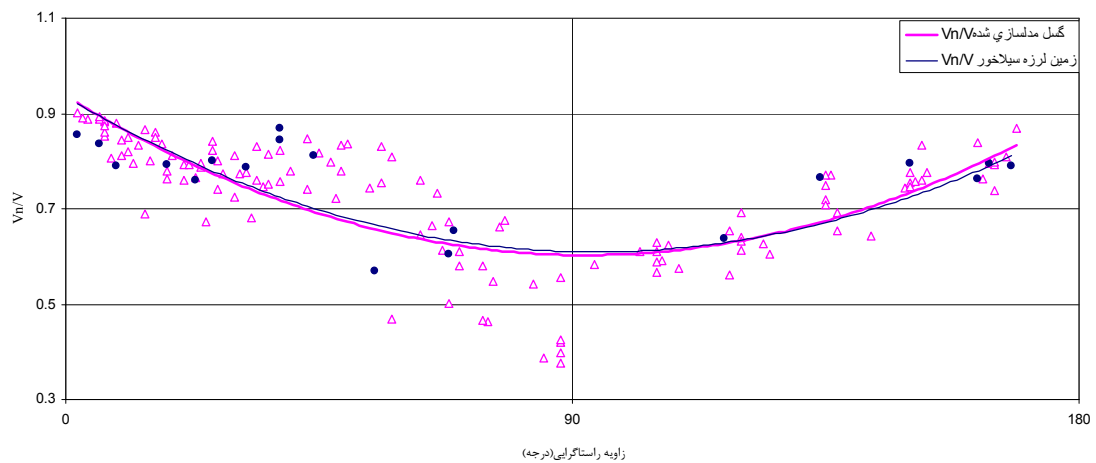
از بین بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیق کمپیل (۱۹۸۷) اشاره کرد. وی عنوان کرد راستاگرایی باعث افزایش شتاب تا $1/71$ برابر و سرعت تا $2/6$ برابر در جهت پیشرو می‌شود که در این مقاله این نسبت برای سرعت $1/87$ تعیین شد. در بررسی صدیق و همکاران (۱۹۹۳) با به کارگیری روش‌های آماری و

راستاگرایی 90° و افزایش V_n/V در دو انتهای گسل نشان‌دهنده اثر راستاگرایی بر مولفه افقی سرعت عمود بر گسل است.

۷ مقایسه بررسی‌های صورت گرفته مربوط به این مقاله با بررسی‌های مشابه



شکل ۱۴. مقایسه $\frac{V_n}{V_p}$ در زمین‌لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور و گسل مدل‌سازی شده.



شکل ۱۵. مقایسه $\frac{V_n}{V}$ در زمین‌لرزه ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور و گسل مدل‌سازی شده.

زمین لرزه ۱۹۹۹ چی-چی تایوان با روش اجزای محدود و با به کارگیری نرم افزار ANSYS، از سوی آگارد و همکاران (۲۰۰۴) اشاره کرد. در مدل سازی پیش گفته این نتیجه به دست آمد که که اثر راستاگرایی باعث می شود که در مناطق نزدیک گسل های شیب لغز، بیشینه دامنه جابه جایی و سرعت در روی فرادایواره مشاهده می شود. در این تحقیق حاضر با مدل سازی گسلش امتداد لغز در زمین لرزه ۱۳۸۵ در آستانه-سیلاخور مشخص شد که در گسلش امتداد لغز بیشینه دامنه سرعت در انتهای گسل و در جهت پیشرو مشاهده می شود.

۸ نتیجه گیری

با توجه به تأثیر راستاگرایی بر مولفه افقی سرعت عمود بر گسل، نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به بیشینه مولفه افقی سرعت موازی با گسل، در جهت پیشرو (θ برابر صفر درجه) و در جهت پسرو ($\theta = 180^\circ$) بیشینه است که با الگوی تابش گسلش امتداد لغز کاملاً همخوانی دارد. تأثیر راستاگرایی بر مولفه افقی سرعت عمود بر گسل باعث می شود نسبت V_n/V در زاویه راستاگرایی 90° درجه کمترین مقدار را داشته باشد. همچنین، راستاگرایی باعث افزایش نسبت بیشینه مولفه افقی سرعت عمود بر گسل به بیشینه مولفه افقی سرعت میانگین در دو جهت پیشرو و پسرو و کاهش این نسبت در زاویه راستاگرایی 90° می شود که در زمین لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ در آستانه-سیلاخور و مدل سازی صورت گرفته قابل مشاهده است. به منظور دخالت دادن پارامترهای فاصله، طول گسیختگی و زاویه راستاگرایی در بررسی اثر راستاگرایی با استفاده از پارامتر $(R/L)\cos^2\theta$ به مثابه پارامتر مستقل، این نتیجه حاصل شد که نسبت V_n/V در فواصل $R \leq L$ با افزایش R افزایش می یابد و در فواصل $R > L$ با افزایش R کاهش پیدا می کند. این امر نشان دهنده افزایش تأثیر

عددی این نتیجه حاصل شد که نسبت دامنه مولفه افقی عمود بر گسل به مولفه افقی میانگین در تناوب های ۲ تا ۵ ثانیه و در فواصل کمتر از ۱۰ کیلومتر، در جهت پیشرو برابر $1/2$ است، در صورتی که در تحقیق حاضر این نسبت (V_n/V) برابر $0/94$ و کمتر از مقدار تعیین شده صدیق و همکاران (۱۹۹۳) است. علت این امر را می توان افزایش فاصله مورد بررسی در این تحقیق (تا ۶۰ کیلومتر) و بررسی در تناوب های کم تر (تناوب صفر) دانست. سامرویل و همکاران (۱۹۹۷) با بررسی اثر راستاگرایی بر طیف شتاب افقی میانگین، مدت دوام تاریخچه زمانی شتاب و نسبت طیف شتاب عمود بر گسل به طیف شتاب موازی با گسل، برای هر دو نوع سازوکار کانونی امتداد لغز و شیب لغز، ۲۱ زمین لرزه را مورد بررسی قرار دادند و اشاره کردند که اثر راستاگرایی در گسلش امتداد لغز بهتر قابل تشخیص است. در این مقاله به جای استفاده از اطلاعات مربوط به تعداد زیادی زمین لرزه، از روش مدل سازی استفاده شده است و فقط گسلش امتداد لغز مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق سامرویل و همکاران (۱۹۹۷) و در مقاله حاضر این نتیجه حاصل شد که نسبت مولفه افقی عمود بر گسل به مولفه افقی موازی با گسل، چه در جهت پیشرو که دامنه بلندتر است و چه در جهت پسرو که دامنه کوتاه تر است افزایش می یابد (بخش ۶). در بررسی سامرویل و همکاران (۱۹۹۷)، ضربی برای تغییرات تأثیر تناوب در راستاگرایی مطرح شد ولی در این مقاله بررسی ها فقط در تناوب صفر به انجام رسیده است، و بنابراین، چنین ضربی در نظر گرفته نشده است. در این مقاله بر پایه تحقیقات سامرویل و همکاران (۱۹۹۷) که پارامتر $X = S/L \cdot X \cdot \cos\theta$ و $S =$ طول گسیختگی و $L =$ طول گسل) را به مثابه پارامتر مستقل در نظر گرفتند، $(R/L)\cos^2\theta$ (بخش ۵-۱) در نقش پارامتر مستقل مورد استفاده قرار گرفت. از بین روش های مشابه مدل سازی، می توان به مدل سازی راستاگرایی در

- Indicated by the Aftershock, Sequence, *Calif., Div. Mines Bull.*, 171, 199-202.
- Boatwright, J., 1982. A Dynamic Model for Far-Field Acceleration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1049-1069.
- Bullen, K. E. and Bolt, B. A., 1985, An Introduction to the Theory of Seismology, 4th ed., *Cambridge University Press, Cambridge, England.*
- Douglas, A., Hudson, J. A. and Pearce, R. G., 1988, Directivity and Doppler Effect, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 1367 – 1372.
- Campbell, K. W., 1987, Prediction Strong Ground Motion in Utah, *Evaluation of Regional and Urban Earthquake Hazards and Risks in Utah, USGS.*, 2, 87-585.
- Haskell, N. A., 1969, Elastic Displacements in the Near-Field of a Propagating Fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 865-908.
- Kenneth, E. C., South, A. A., 2002, Characterization of Large Velocity Pulse for Laboratory Testing, *PEER Report 2002/22, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Collage of Engineering, University of California, Berkeley.*
- Lay, T. and Wallace, T. C., 1995. Modern Global Seismology, *Academic Press. California.*
- Sadigh, K., Chang, C. Y., Abrahamson, N. A. and Power, M. S., 1993, Specification of Long-Period Ground Motions: Updated Attenuation Relationships for Rock Site Conditions and Adjustment Factors for Near Fault Effects, *ATC*, 17-1.
- Somervill, P., Smith, N., Graves, R. and Abrahamson, N., 1997, Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relation to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, *Seism. Res. Let.*, 68, 199-222.

راستاگرایی در فواصل $R \leq L$ با افزایش فاصله است، به طوری که بیشینه تأثیر راستاگرایی در انتهای گسیختگی ($R = L$) مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور و مدل‌سازی صورت گرفته، هنگام استفاده از روابط تضعیف سرعت جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک، به منظور دستیابی به جواب‌هایی دقیق‌تر برای سرعت افقی جنبش زمین، در چنین ناحیه‌ای، رابطه ۷ الزاماً باید مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- پاکزاد، م. و میرزائی، ن.، ۱۳۸۶، بررسی سازوکار کانونی زلزله ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه-سیلاخور. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۳، ۳، ۷۳-۸۶.
- میرزائی علویجه، ح.، فرزندگان، ا.، ماجدی اردکانی، م. ح. و سینائیان، ف.، ۱۳۸۵، گزارش زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ سیلاخور، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- Aagaard, B.T., 2000, Finite Element Simulation of Earthquakes, *Ph.D. Thesis. California Institute of Technology, Pasadena, California.*
- Aagaard, B.T., Hall, J. and Heaton, T., 2004, Effect of Fault Dip and Slip Angles at Near-Source Ground Motions: Why Rupture Directivity Was Minimal in the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 155-170.
- Benioff, M., 1955, Mechanism and Strain Characteristics of the White Wolf Fault as