بررسی زلزله و سونامی منطقه توهوکو (Tohoku) کشور ژاپن در سال ۲۰۱۱

علی خیرالدین، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان
عباس سیوندی‌پور، دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان، سمنان
سهراب کاشفی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده

زلزله بزرگ ژاپن در داخل اقیانوس آرام با بزرگی ۹ ریشتر و حداکثر شتابی معادل ۲/۹۳ برابر شتاب ثقل زمین در منطقه توهوکو خارج از ساحل ژاپن در ۱۱ مارس ۲۰۱۱ رخ داد. مرکز زلزله در ۱۳۰ کیلومتری ساحل شرقی این منطقه با عمق کانونی ۳۲ کیلومتر قرار داشت. این زلزله سبب ایجاد سونامی بزرگی گردید که تخریب زیادی در این منطقه را همراه داشت. سونامی پدیده‌ای شامل یک سری امواج بسیار بلند و طولانی با دوره تناوب بزرگ می‌باشد. این پدیده دارای امواج اقیانوسی بزرگی است که توسط حرکت تصادفی پوسته زمین ایجاد می‌شود. ارتفاع امواج سونامی حاصل از زلزله ژاپن بیش از ۱۰ متر بود و چند دقیقه پس از زلزله، ۱۰ کیلومتر را در داخل این کشور طی کرد. در این مقاله به بررسی زلزله و سونامی ژاپن و آثار خرابی به وجود آمده ناشی از آن و همچنین ساخت ساختمانهای مقاوم در برابر سونامی پرداخته شده است.

کلیدواژه‌ها: سونامی، زلزله ژاپن، ساختمانهای مقاوم در برابر سونامی، ژئوفیزیک، توهوکو

۱– مقدمه

سونامی یا آبتازش یک پدیده جغرافیایی است که به حرکت شدید آب دریا گفته می‌شود که در پی زمین‌لرزه-های زیر دریا پدید می‌آید. آبی که به حرکت در آمده به شکل امواج عظیم به کرانه‌ها رسیده و ویرانی به بار می‌آورد. سونامی معمولاً پس از یک زمین‌لرزه بزرگ با حرکت رو به بالا، فعالیت آتشفشانی و یا زمین‌لغزشهای بزرگ به داخل دریا پدید می‌آید. در واقع سونامی شامل یک سری امواج بسیار بلند و طولانی با دوره تناوب بزرگ می‌باشد. سونامی دارای امواج اقیانوسی بزرگی است که توسط حرکت تصادفی پوسته زمین ایجاد می‌شود. بسیاری از پدیده‌های آب‌لرزه در کرانه‌های سواحل ژاپن رخ می‌دهند. از این رو واژه ژاپنی سونامی برگرفته شده از دو واژه *Tsu* به معنای بندر و *Nami* به معنای موج می‌باشد. با تشکیل سونامی، امواج در اقیانوس شروع به حرکت کرده، سرعت آنها افزایش یافته و تبدیل به امواجی با قدرت تخریب زیاد می‌شوند که به سواحل و کرانه‌ها برخورد می‌کنند. سرعت این امواج بعضاً به بیش از ۸۰۰ کیلومتر در ساعت می‌رسد [۱]. ارتفاع امواج در سونامی سال ۲۰۰۴ که در نزدیکی سوماترای اندونزی روی داد به ۴۰ متر رسیده بود که باعث ویرانی عظیم و کشته شدن صدها هزار نفر در جنوب آسیا شد. در این مقاله اثرات زمینساختی و ژئوفیزیکی زلزله ژاپن که در سال ۲۰۱۱ رخ داد بررسی و آثار مخرب این زلزله ارزیابی شده است.

۲– چگونگی تولید سونامی

بیشتر سونامی‌ها توسط زلزله‌های ایجاد شده در ناحیه فرورانش گسل ایجاد می‌شوند. ناحیه فرورانش گسل مناطقی هستند که صفحات اقیانوسی توسط نیروی صفحات تکتونیکی به گوشته، نیرویی رو به پایین وارد می‌کنند. صفحات چسپیده ممتد رو به پایین به سمت گوشته حرکت کرده و در نتیجه انرژی زیادی در گسل انباشته می‌شود. این انرژی می‌تواند در گسل در یک مدت زمان طولانی از یک دهه تا قرنها انباشته شود. انرژی انباشته شده در صفحات گسل تا زمانی که از نیروهای گسیختگی بین دو صفحه آزاد نشود، ذخیره می‌شود. هنگامی که انرژی انباشته شده در صفحات گسل سریعاً آزاد شود، آب لایه‌های فوقانی روی

گسلهای موجود در اقیانوسها به بالا پرتاب می‌شود و سونامی اتفاق می‌افتد. امواج از مکانی که زلزله در آن رخ داده است، به سمت جلو حرکت می‌کنند و در پایان به خط ساحلی برخورد می‌کنند [۲]. سونامی در اقیانوس سریعتر حرکت می‌کند در سونامی سال ۱۹۶۰ شیلی، در حدود ۱۵ ساعت بعد از شروع سونامی امواج به هاوائی و کمتر از ۲۴ ساعت امواج به ژاپن رسید. سرعت موج سونامی از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$v \simeq \sqrt{g \times d} \qquad (۱)$$

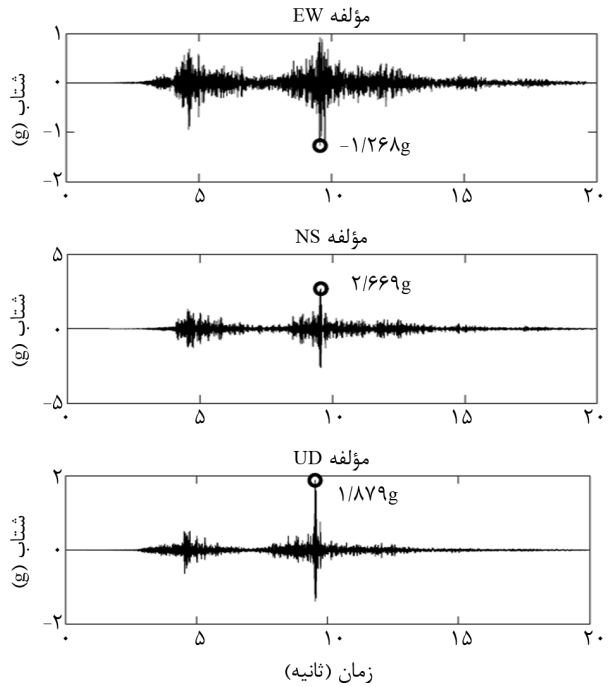
در رابطه (۱)، v سرعت موج برحسب متر بر ثانیه، d نشاندهنده عمق آب و g بیانگر شتاب ثقل زمین برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. به طور مثال، اگر عمق اقیانوس در محل تولید سونامی برابر ۶ کیلومتر باشد، سرعت حرکت امواج برابر با ۸۶۰ کیلومتر بر ساعت خواهد بود.

۳- بررسی مؤلفه‌های ژئوفیزیکی

زلزله بزرگ ژاپن در داخل اقیانوس آرام با بزرگی ۹ ریشتر و حداکثر شتابی برابر ۲/۹ شتاب ثقل زمین در منطقه توهوکو خارج از ساحل ژاپن در ۱۱ مارس ۲۰۱۱ رخ داد. مرکز زلزله در ۱۳۰ کیلومتری ساحل شرقی این منطقه با عمق کانونی ۳۲ کیلومتر قرار داشت. ارتفاع امواج سونامی حاصل از این زلزله بیش از ۱۰ متر بوده و چند دقیقه پس از زلزله ۱۰ کیلومتر را در داخل جزیره ژاپن طی کرده است. طبق آخرین گزارش آژانس امنیتی ژاپن، مرگ ۱۵ هزار و ۷۰۰ نفر، زخمی شدن ۵ هزار و ۳۰۰ نفر و مفقود شدن ۴ هزار و ۶۰۰ نفر تأیید گردید. در این زلزله بیش از ۳۳۲ هزار و ۴۰۰ ساختمان، ۵۶ پل، ۲ هزار و ۱۲۶ جاده و ۲۶ راه‌آهن آسیب دیده و یا ویران شدند. زلزله و سونامی علاوه بر ایجاد خرابی در ساختمانها باعث تخریب سازه‌های زیادی در ژاپن از جمله جاده‌ها، خطوط ریلی و شکست یک سد شد. حدود ۴/۴ میلیون خانواده در شمال شرقی ژاپن با مشکل قطع برق و آب مواجه شدند. بسیاری از ژنراتورهای الکتریکی خراب و حداقل سه راکتور هسته‌ای ناشی از نشت گاز هیدروژن منفجر شدند. چند روز بعد از انفجار، آژانس بین‌المللی انرژی هسته‌ای ژاپن [۳] بیان کرد که تا شعاع ۲۰ کیلومتری از نیروگاه هسته‌ای شماره یک فوکوشیما و تا شعاع ۱۰ کیلومتری از نیروگاه هسته‌ای شماره دو فوکوشیما تخلیه شده است.

زمین‌لرزه ۲۰۱۱ ژاپن بزرگترین زلزله در ژاپن و یکی از پنج زلزله شدید جهان می‌باشد. پس از جنگ جهانی دوم، این بزرگترین مصیبت وارده به ژاپن می‌باشد. میزان خسارات ناشی از زلزله به سازه‌ها حدود ۱۴/۵ تا ۳۵ بیلیون دلار تخمین زده شده است. قبل از وقوع این زلزله، در صد سال اخیر زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ با خسارت ۱۵۰ بیلیون دلاری به عنوان مخربترین زلزله بود. زلزله ژاپن تقریباً ۶ دقیقه به طول انجامید و مرکز آن از توکیو در حدود ۳۷۳ کیلومتر فاصله داشته است. دو روز قبل زلزله اصلی، پیش‌لرزه‌هایی با حداکثر بزرگی ۷/۲ ریشتر در فاصله ۴۰ کیلومتری از مرکز زلزله اصلی ثبت شده است. شتابنگاشت زلزله ژاپن برای مؤلفه‌های افقی و قائم در شکل (۱) نشان داده شده است.

انرژی آزاد شده ناشی از زلزله برابر با ۱/۹ میلیون گیگاژول است که نزدیک به دو برابر زلزله ۹/۱ ریشتری سال ۲۰۰۴ اقیانوس هند است. این انرژی می‌تواند انرژی مصرفی شهری به بزرگی لس‌آنجلس را برای یک سال تأمین کند. این انرژی معادل با ۹/۳۲ تراتن و تقریباً ۶۰۰ میلیون برابر انرژی آزاد شده ناشی از بمب هسته‌ای هیروشیما است.



شکل (۱): *شتابنگاشت زلزله ژاپن برای مؤلفه‌های افقی و قائم.*

۴- بررسی مؤلفه‌های زمین شناختی

زلزله بخشی از شمال ژاپن را به اندازه ۲/۴ متر حرکت داده و آن را به آمریکای شمالی نزدیکتر کرده است. بخشهایی از ژاپن که به کانون زلزله نزدیکتر بوده‌اند، بیشتر حرکت کرده‌اند. صفحه اقیانوس آرام ممکن است به سمت بالا و غرب در حدود ۲۰ متر حرکت کرده باشد. با این وجود مقدار واقعی جابه‌جایی با دور شدن از گسل کمتر خواهد شد. مقدار لغزش دو صفحه گسل حدود ۴۰ متر تخمین زده شده است که سطحی به طول ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر و عرض ۱۰۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد.

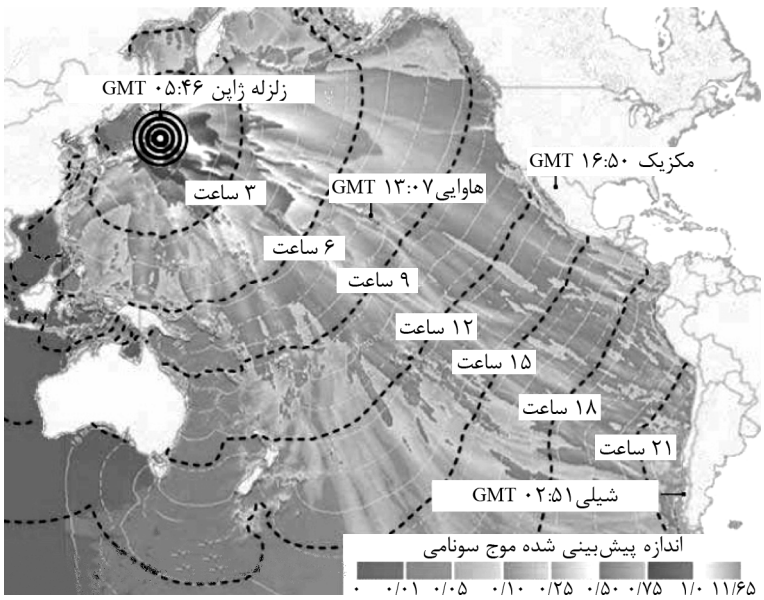
طبق گزارش سازمان بین‌المللی زمین‌شناسی ایتالیا [۴]، زمین‌لرزه محور زمین را ۲۵ سانتیمتر جابه‌جا کرده است. این انحراف تعدادی تغییرات سیاره‌ای کوچک ایجاد می‌کند. از جمله این تغییرات می‌توان به کج شدن زمین و افزایش سرعت چرخش زمین اشاره کرد. زلزله باعث یک سونامی عظیم شد که موجب خرابیهای عظیم و گسترده در خط ساحلی اقیانوس آرام در شمال جزیره هونشوی ژاپن گردید. سونامی در طول اقیانوس آرام پخش شد و هشدارها موجب تخلیه بنادر اقیانوسی در بسیاری از کشورها از جمله شیلی گردید. با این وجود سونامی در خیلی از نقاط احساس شد که باعث ایجاد تأثیرات اندکی در آن مناطق شد. بخشی از ساحل اقیانوس آرام در کشور شیلی که از ژاپن در حدود ۱۷ هزار کیلومتر دورتر است به علت امواجی به ارتفاع ۲ متر آسیب دیده است، جدول (۱). در شکل (۲)، میزان تأثیر این زلزله بر سواحل اقیانوس آرام نشان داده شده است.

جدول (۱): *ارتفاع موج آب ثبت شده.*

ارتفاع موج (متر)	ایستگاه ثبت شده	زمان ثبت
۶/۸	*Iwate Kamaishi-Oki*	۱۵:۱۲
۳/۲	*Ōfunato*	۱۵:۱۵
۳/۳	*Ishinomaki-Shi Ayukawa*	۱۵:۲۰
۴	*Miyako*	۱۵:۲۱
۳/۵	*Erimo-Cho Shoya*	۱۵:۴۴
۷/۳	*Sōma*	۱۵:۵۰
۴/۲	*Ōarai*	۱۶:۵۲

۵- آثار مخرب زلزله و سونامی

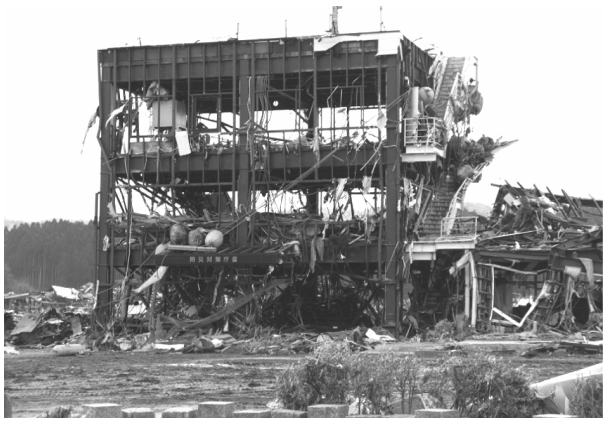
اندازه و مقدار تخریب ناشی از این زلزله و سونامی ناشی از آن بسیار زیاد و بیشتر خسارات وارده به علت سونامی است. برآورد تخریبهای ساحل ژاپن در حدود ۱۰ بیلیون دلار است. هر چند که ژاپن حداقل ۴۰ درصد معادل ۳۴ هزار و ۷۵۱ کیلومتر از طول خط ساحلی خود را توسط میلیاردها دلار دیوارهای ضد سونامی به ارتفاع ۱۲ متر محافظت کرده بود ولی سونامی به سادگی بعضی از آنها را تخریب و از آنها عبور کرد. در تصویرهای (۱) تا (۳)، بعد خرابی شهرهای مختلف ژاپن نشان داده شده است.



شکل (۲): *تخمین زمان رسیدن و ارتفاع موج سونامی به سواحل اقیانوس آرام.*

تصویر (۱): *خرابی ایجاد شده در شهر ایشینوماکی (Ishinomaki).*

تصویر (۲): *خرابی ایجاد شده در شهر اوناگاوا (Onagawa).*



تصویر (۳): *خرابی ایجاد شده در شهر مینامی (Minami-Sanriku).*

۵–۱– نیروگاه‌های هسته‌ای

در نیروگاه‌های هسته‌ای فوکوشیما و مرکز هسته‌ای توکای بیش از ۱۱ راکتور وجود داشت که پس از زلزله به صورت خودکار متوقف شدند. روند خنک کردن راکتورها به صورت حذف تدریجی گرما است که چندین روز پس از خاموش شدن نیروگاه طول می‌کشد [۵]. خنک کردن نیروگاه توسط ژنراتورهای دیزلی اضطراری انجام می‌شود. در نیروگاه‌های فوکوشیمای شماره یک و دو امواج سونامی باعث نابودی این ژنراتورها شد. دو انفجار بزرگ در نیروگاه فوکوشیمای شماره یک به همین علت اتفاق افتاد که موجب نشت مواد رادیواکتیو گردید. بیش از ۲۰۰ هزار نفر از منطقه موجود در فوکوشیما تخلیه شدند. باد موافق، ذرات رادیواکتیو را منتشر کرده است که این واقع اثرات منفی بسیار بزرگی دارد. با وجود این بحران، با استفاده از هلیکوپتر، آب بر روی فوکوشیمای شماره یک ریخته می‌شد و سعی شد تا راکتورها را خنک کنند. در صد نشت مواد رادیواکتیو در داخل نیروگاه‌ها هزار برابر بیشتر از حد مجاز و در خارج از نیروگاه هشت برابر حد مجاز است [۶]. نیروگاه فوکوشیمای شماره دو در ۱۱ کیلومتری جنوب آن وضعیت اضطراری یافت و تمامی شش راکتور آن مشکل پیدا کرد. یک انفجار به علت نشت گاز هیدروژن اتفاق افتاد، ولی به خود راکتور آسیبی نرسید. یک آتش‌سوزی پس از زلزله در توربین نیروگاه اتمی اوناگاوا اتفاق افتاد، سپس به راکتور نیروگاه انتشار یافت ولی سریعاً خاموش شد. چندین نیروگاه دیگر به علت زمین‌لرزه دچار نقصهای کوچک و بزرگ شدند به صورتی که به یکی از چالشهای بزرگ دولت ژاپن تبدیل گردید. سازمان انرژی اتمی آمریکا [۷] اعلام کرد که اتفاقات هسته‌ای ناشی از زلزله اخیر در ژاپن به رزونانس هسته‌ای موسوم است، که این گفته عمق فاجعه را نشان می‌دهد.

۵–۲– سدها

در اثر این زلزله سد کشاورزی فوجیناما شکسته شد و موجب ایجاد سیل در مناطق مسکونی گردید. تمامی افراد محلی سعی می‌کردند تا قبل از تخریب کامل سد روزنه‌های ایجاد شده را تعمیر کنند. ۲۵۲ سد دیگر مورد بازرسی قرار گرفت و در شش سد خاکی ترکهایی در تاج آنها مشاهده شد، اما مخازن سدهای وزنی هیچ‌گونه تخریبی نداشت.

۵–۳– اثرات اقتصادی

برآورد خسارات مالی ناشی از زلزله حدود ۳۰۰

بیلیون دلار پیش‌بینی شده است. منطقه شمال توهوکو بیشترین خسارات را از زلزله متحمل شده است. زلزله و سونامی خسارات جبران‌ناپذیری بر روی کارخانه‌های خودروسازی، شرکتهای فولاد و نورد میلگرد، صنایع الکتریکی، صنایع خانگی و ... وارد کرده است. پس از بررسیهای انجام شده، بانک ژاپن برای ثبات بازار حدود ۱۵ تریلیون ین وارد بازار کرد. این زلزله موجب شد که بازار سهام ژاپن دچار چالش شدید شود. ارزش سهام برخی از بانکها تا هزار واحد معادل ۱۰/۶٪ سقوط کرده است. ارزش سهام دیگر کارخانجات و صنایع با افت شدید همراه بوده است. ارزش سهام برخی از آنها چند دقیقه پس از وقوع زلزله در بازار جهانی بین ۰/۵تا ۱/۸٪ کاهش یافت.

۶- طراحی ساختمانهای مقاوم در برابر سونامی

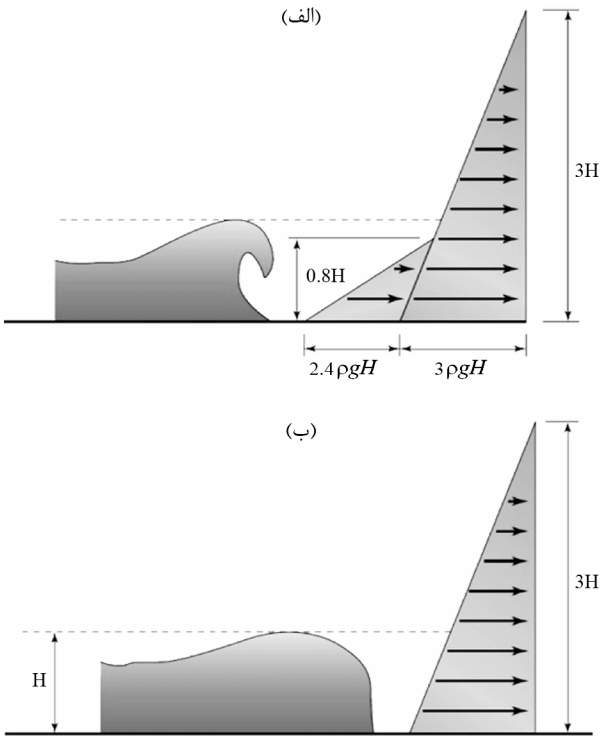
در زلزله ژاپن سازه‌های چوبی بیشترین آسیب را دیده‌اند. ساخت این ساختمانها به علت سبک بودن و نداشتن مقاومت کافی، در مناطق با احتمال رخ دادن سونامی توصیه نمی‌شود. در تصویر (۴)، تخریب یک ساختمان چوبی در این زلزله نشان داده شده است.

ساختمانهای بتنی نسبت به ساختمانهای فولادی دارای عملکرد بهتری در سونامی بودند. استفاده از دیوار برشی به عنوان سیستم مقاوم لرزه‌ای در ساختمانها باید در جهت عمود بر حرکت موج سونامی باشد. در واقع قرارگیری دیوار برشی باید به گونه‌ای باشد که موج سونامی به سطح دیوار برشی برخورد نکند. ضربه‌ای که ناشی از برخورد موج با سطح دیوار برشی است، موجب تخریب دیوار برشی و ساختمان می‌شود. اگر در جهت حرکت موج از سیستم دیوار برشی استفاده شود، باید برای ضربه ناشی از موج نیز بارگذاری و طراحی شود. پی‌های ساختمانهای مقاوم در برابر سونامی باید گسترده باشد. شمعهای زیر پی باید برای نیروی کشش حاصل از ضربه موج سونامی طراحی شوند. اگر فونداسیون مقاومت کافی نداشته باشد، ساختمان ممکن است هنگام سونامی از جا کنده و یا واژگون شود [۸].

فلسفله اصلی طراحی ساختمانهای مقاوم در برابر سونامی، بارگذاری ناشی از برخورد موج آب به ساختمان می‌باشد. این بارگذاری دارای دو مؤلفه هیدرودینامیکی و ضربه‌ای می‌باشد. در مدل کردن موج سونامی باید مؤلفه‌های استاتیکی و دینامیکی لحاظ شود. در شکل (۳- الف)، مدلسازی هیدرودینامیکی بارگذاری موج تفکیک شده سونامی و در شکل (۳- ب)، بارگذاری هیدرودینامیکی موج تفکیک نشده نشان داده شده است.

در شکل (۳)، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل زمین و H ارتفاع دیوار می‌باشد. برای لحاظ کردن ضربه، نیروی ضربه‌ای ناشی از موج ۱۰ تا ۱۲ برابر نیروی هیدرودینامیکی در نظر گرفته می‌شود [۹].

تصویر (۴): *تخریب ساختمان چوبی در زلزله ژاپن.*



شکل (۳): *بارگذاری ناشی از موج سونامی.*

۷- نتیجه‌گیری

زمین‌لرزه ۱۱ مارس ۲۰۱۱ ژاپن بزرگترین زلزله در این کشور و یکی از پنج زلزله شدید جهان می‌باشد. این زلزله در داخل اقیانوس آرام با بزرگی ۹ ریشتر و حداکثر شتابی معادل ۲/۹۳ برابر شتاب ثقل زمین در منطقه توهوکو خارج از ساحل ژاپن رخ داد. مرکز زلزله در ۱۳۰ کیلومتری ساحل شرقی این منطقه با عمق کانونی ۳۲ کیلومتر قرار داشت. ارتفاع امواج سونامی حاصل از این زلزله بیش از ۱۰ متر بوده و چند دقیقه پس از زلزله ۱۰ کیلومتر را در داخل جزیره ژاپن طی کرده است. برآورد خسارات مالی ناشی از زلزله حدود ۳۰۰ بیلیون دلار پیش‌بینی شده است. مقدار لغزش دو صفحه گسل تولیدکننده زلزله حدود ۴۰ متر تخمین زده شده است. زلزله بخشی از شمال ژاپن را به اندازه ۲/۴ متر حرکت داده و آن را به آمریکای شمالی نزدیکتر کرده است. در سونامی ژاپن ساختمانهای چوبی نسبت به سایر ساختمانها بیشترین آسیب را دیده‌اند و به همین دلیل ساخت سازه‌های چوبی در مناطق مستعد به سونامی توصیه نمی‌شود.

۸- منابع

1. Mishra, O.P. (2010). Role of crustal heterogeneity beneath Andaman-Nicobar Islands and its implications for coastal hazard, *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-010-9678-3.
2. Mishra, O.P. and Zhao, D. (2004). Seismic evidence for dehydration embitterment of the subducting Pacific slab, Geophysical Research Letters.
3. Japan Atomic Energy Agency, http://www.jaea.go.jp.
4. Societa Geological Italiana, http://www.Socgeol.it.
5. Army Geospatial Centre, http://www.agc.army.mil.
6. International Nuclear Safety Center, http://www.insc.anl.gov.
7. Nuclear Energy Institute, http://www.nei.org.
8. Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis, FEMA P646 (2008).
9. Thusyanthan, N.I. and Gopal Madabhushi, S.P. (2008). Tsunami wave loading on coastal houses: a model approach, *Proceedings of ICE, Civil Engineering*, **161**.