

# طراحی و ساخت سیستم تشخیص فرکانسهای انتشار امواج سطحی

مرتضی قاضی سعیدی<sup>۱</sup>، محمد مشیری<sup>۲</sup>، سینا هاشمی<sup>۳</sup>  
mghazi@semnan.ac.ir

## خلاصه

استفاده از سیستم های الکترونیکی جهت دریافت اطلاعات محیطی مختلف، علاوه بر سهولت در جمع آوری اطلاعات، دقت زیادی را برای کاربران فراهم می نماید. امروزه سیستم های مختلف جهت تشخیص امواج سطحی حاصل از زلزله و یا لرزش ها و یا حرکت های سطح زمین ساخته شده است. امواج زلزله و یا فعالیت های فیزیکی روی سطح زمین از قبیل تردد و رفت و آمدها را می توان توسط دستگاه های مختلفی حس نمود و تشخیص داد. سنسورهای زلزله نگاری و یا Geophone بدلیل حساسیت های مختلف از اهمیت و قیمت های متفاوتی برخوردار می باشند. این سنسورها از فرکانس های مختلف از حدود 0.5 هرتز تا 20 هرتز بدلیل کاربردهای مختلف در زلزله نگاری، اکتشاف معادن و یا اکتشاف نفت و گاز استفاده می شود. در این مقاله روش طراحی و ساخت یک نوع سنسور با کاربرد خاص آن تشریح گردیده که یک حسگر با فرکانس معین 4.5 هرتز بوده که کاربرد خاص آن در زمینه شناسایی ترددهای مختلف در یک محیط فیزیکی بوده و نوع تردد را مشخص می کند. این سیستم قادر است تا فاصله ی 5 متری از سنسور امواج سطحی ناشی از حرکت آهسته و یا تند را ثبت و تشخیص دهد.

**کلمات کلیدی:** Geophone ، امواج سطحی، امواج زلزله، زلزله نگار

## مقدمه

استفاده از سیستم های الکترونیکی جهت دریافت اطلاعات محیطی مختلف علاوه بر سهولت در جمع آوری اطلاعات، دقت زیادی را برای تصمیم گیری کاربران فراهم می نماید. به دلیل گستردگی فعالیت های مختلف تجاری ، صنعتی و مسکونی ، نیاز به محافظت از آن ها از ضروریات می باشد. در گذشته و حال برای محافظت و جلوگیری از سرقت و یا استفاده ی غیر مجاز از اماکن مسکونی و تجاری و صنعتی از حفاظت فیزیکی و یا نگرانی و کنترل به وسیله پرسنل انجام می پذیرد. به دلیل فعالیت ها و نیاز به حفاظت های گوناگون و گسترده در تمام سطوح و انجام کنترل های دقیق ، باید سوابق را به طور دقیق نگاهداری کرد. استقرار دوربین های مختلف در مکان ها و مراکز مختلف و انتقال اطلاعات به مراکز کنترل نیز نتوانسته است مشکل را کامل حل نماید. به همین دلیل از تجهیزات الکترونیکی گوناگون و سنسورهای مختلف جهت حل این مشکل استفاده شده است به نحوی که استفاده از سنسورهای حرارتی مادون قرمز ، اولتراسونیک و غیره نیز به دلیل محدودیت های آن از قبیل در معرض دید بودن و نیاز به انرژی الکتریکی و با طری جهت کار نتوانسه است مشکل را به طور کامل حل کند. در مراکز و سازمان ها و اماکنی که در خارج از شهر واقع شده اند و از نظر کنترل با مشکل روبرومی باشند این تجهیزات نمی تواند بهترین راه حل حفاظتی باشد. لذا اگر بتوان دستگاه و تجهیزاتی را طراحی و آماده کرد که در معرض دید نبوده و یا حتی در زیر خاک و زمین مدفون شده و نیاز به انرژی الکتریکی نباشد می تواند تردد و رفت و آمدهای مختلف را شناسایی کند. به همین دلیل دستگاهی طراحی شده است که به نام "میکروفون خاکی" نام گرفته و فعالیت های فیزیکی روی سطح زمین از قبیل تردد و رفت و آمدها را حس کرده و پس از پردازش های لازم نوع فعالیت از قبیل راه رفتن ، دویدن، عبور اتومبیل و غیره را مشخص می کند بدون این که هیچ نشانی از نصب این دستگاه بر روی سطح زمین مشاهده شود. این دستگاه شبیه سنسورهای زلزله نگاری است با این

<sup>1</sup> - عضو هیئت علمی دانشکده برق و کامپیوتر

<sup>2</sup> - دانشجوی کارشناسی مکانیک دانشگاه سمنان

<sup>3</sup> - دانشجوی کارشناسی الکترونیک دانشگاه سمنان

تفاوت که نوع فرکانس و حوزه ی عمل آن ها متفاوت می باشد. برای شناخت بهتر و عملکرد این دستگاه که در زلزله نگاری از آن به نام geophone نام برده می شود، ابتدا لازم است که اطلاعاتی راجع به مشخصه ی انتشار امواج حاصل از تردد افراد بر روی سطح زمین به دست آورد.

## بررسی انتشار امواج در عمق و سطح زمین

زیر سطح زمینی که ما بر آن گام می گذاریم بر خلاف سطح سخت و جامد آن ویژگیهای خاص خود را دارد. با افزایش عمق هم جنس و هم حالت مواد سازنده زمین تغییر می کند زلزله ها در جاهایی که صفحه ها با هم اصطکاک دارند یا جاهایی صفحه ها در مقابل هم واقعند و یا جاهایی که صفحه ها بدون زمین فرو می روند مشاهده می شوند. زلزله از یک طرف موجب شکسته شدن و جابجایی بین توده های سنگی پوسته زمین می شود و از طرف دیگر همین جابجایی و شکسته شدن منجر به ایجاد امواج و انتشار در درون زمین می شود. موج زلزله موجی است که از طریق زمین حرکت می کند، که اغلب سبب ایجاد زمین لرزه یا انفجار می شود. امواج زمین لرزه با توجه به حرکتشان در داخل یا سطح زمین به دو دسته تقسیم می شوند:

**1-** امواج داخلی یا پیکری : دسته ای از امواج لرزه ای هستند که در درون زمین حرکت کرده و در تمامی جهات منتشر می شوند و با سرعتی بیش از موج های سطحی حرکت می نمایند. امواج داخلی نیز به دو گروه **امواج طولی** یا اولیه و **امواج عرضی** یا ثانویه قابل تقسیم هستند.

**2--** امواج سطحی : سرعت امواج سطحی از امواج عرضی کمتر است و شدت آن نسبت به عمق و نسبت به فاصله از مرکز به سرعت کاهش می یابد. این امواج در تحت شرایط خاص و در فصل مشترک دو محیط گازی و مایع، در اثر ارتعاشات ناشی از زلزله به وجود می آید. این گروه از امواج پس از تداخل موج های داخلی در امتداد حد فاصلها، شروع به ارتعاش کرده و عمق نفوذ محدودی دارند، از این رو همواره در نزدیکی سطح های ناپیوستگی متمرکز می شوند. این امواج که به نام موج های محدود شده و یا موج های هدایت شده نیز معروفند، خود به گروه های مختلفی چون **موج لَو**<sup>1</sup> و **امواج رایلی**<sup>2</sup> تفکیک می گردند.

**1-2-** امواج لَو : حرکت زمین توسط موج لَو، تقریباً شبیه موج S فقط از جامدات می گذرد است با این تفاوت که ذرات ماده به موازات سطح زمین و در جهت عمود بر انتشار موج حرکت کرده و ذرات در صفحه قائم حرکت ندارند. انتشار این امواج مانند تکانهایی است که بر اثر حرکت طناب به سمت چپ یا راست ایجاد می شود. موج های لَو قدری سریعتر از امواج رایلی حرکت کرده و زودتر بر روی لرزه نگاشت.

**2-2-** امواج در سطح زمین حرکت می کنند و همان گونه که در حال حرکت است، یک جز در روی سطح بصورت دایره و یا بیضی به جلو اتصال می یابد. به حداکثر فاصله ای که این امواج اجزا خاک را به جلو حرکت می دهد در عمق کاهش می یابد. امواج سطحی با شدت کمتری نسبت به امواج  $P - S$  کاهش می یابند. این امواج بوسیله ی تلاقی در موج  $P - S$  در سطح زمین تولید می شوند و با سرعتی کمتر از امواج  $P - S$  منتشر می شود و سرعت انتشار این امواج در روی سطح زمین **10** برابر سرعت صوت در هوا می باشند. امواج "رایلی" با فرکانس های بالاتر با سرعت کمتری منتشر می شوند زیرا موج رایلی با فرکانس پایین دارای طول موج بیشتری است. بنابراین سرعت انتشار امواج در زمین با افزایش عمق زمین نیز افزایش می یابد، و بنابراین امواج با فرکانس کمتر سرعت بیشتری می یابند. فاصله هر موج از منبع متناسب با سرعت آن موج برای محیطی ب اضرایب پواسن  $u = 0.25$  انتشار می یابد. امواج حجمی  $P - S$  بصورت شعاعی به سمت خارج از منبع در طول یک جبهه موج نیم کره ای منتشر می شوند و انتشار موج R بصورت شعاعی و به سمت خارج در طول یک جبهه موج استوانه ای انجام می گیرد. هر سه موج همچنانکه به سمت خارج حرکت می کنند حجم بیشتری از مصالح را متاثر می سازند و بنابراین شدت انرژی هر موج با فاصله گرفتن از منبع تحریک کاهش می یابد و این کاهش شدت انرژی یا کاهش دامنه ارتعاشات "زایل کنندگی هندسی" نامیده می شود. امنه ارتعاش امواج حجمی به نسبت  $1/r^2$ ، که  $r$  فاصله از منبع می باشد، کاهش می یابد، این در حالی است که دامنه ارتعاشات در امتداد سطح محیط نیمه فضا به نسبت  $1/r^2$  بوقوع می پیوندد. کاهش دامنه ارتعاشات امواج رالی به نسبت  $1/\sqrt{r}$  اتفاق می افتد. [1]

**کاربرد عملی اصلی انتشار امواج در دینامیک خاک به شرح زیر است:**

اول آنکه خواص ارتجاعی خاک ها را می توان تعیین نمود، این عمل بوسیله اندازه گیری سرعت انتشار موج در یک نمونه منشوری خاک یا در محل از طریق تعیین حالت تشدید نمونه ها در دستگاه ستون تشدید قابل انجام می باشد.

ثانیا مفهوم " زایل کنندگی هندسی " کاربرد زیادی در طراحی دینامیکی پی ماشین آلات از قبیل کمپرسورها و ماشین های پیستونی خواهد داشت.

### سیگنال ها و اطلاعات تردد بر روی پل ها

گزارش تحقیقی که در مورد عبور شخصی پیاده از روی پل تهیه شده است تا حدودی می تواند به فرکانس ها و مشخصه ی حرکت یک شخص بر روی زمین نیز شبیه باشد. گرچه پل ها و جاده ها دارای پارامترها و عوامل گوناگونی می باشند و نمی توان یک نتیجه ی یکسان بین آزمایش های عملی و تئوری و محاسبات به دست آورد. در یک مطالعه ای که بر روی فشار و حرکت راه رفتن انسان انجام گرفته [2] و در این بررسی جزئیات بین فرکانس راه رفتن و شتاب بسیار واضح نمی باشد و در این مقاله سعی شده است که یک مدل از راه رفتن و نیروهای آن برای تجزیه و تحلیل پاسخ های فرکانس بر روی پل به دست آید .

### فرکانس های راه رفتن

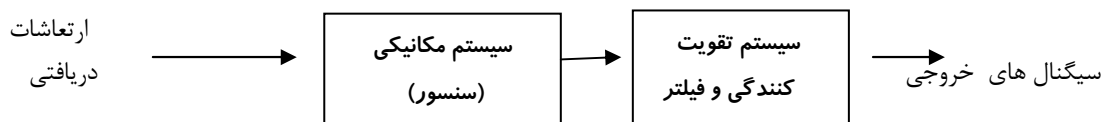
در این طرح با توجه به این که امواجی که در سطح زمین و توسط راه رفتن و یا دویدن و غیره حاصل می شود با سرعت کمی ( حدود چند Hz ) در طول و عمق زمین انتشار می یابد. طبق تحقیقات انجام شده فرکانس راه رفتن عادی 2 هرتز و با شتاب 1.4 m/s می باشد ولی در محیط های عمومی فرکانس 1.8 هرتز و شتاب 1.3 m/s می باشد . اگر سنسورها بتوانند این امواج را دریافت و با فیلترهای مناسبی آن ها را انتخاب کرد به راحتی می توان نوع حرکت ، شدت حرکت، تعداد افراد و غیره را تشخیص داد. سنسورهای زلزله نگاری ( Geophone ) با این نوع کاربردها شباهت زیادی دارد



در شکل 1 فرکانس های مربوط به راه رفتن در حالات مختلف نشان داده شده است.

### مشخصات کلی طرح :

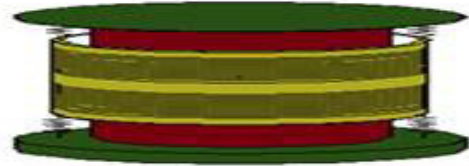
سیستم طراحی شده دارای دو بخش عمده می باشد.



ارتعاشات دریافتی از سطح زمین ناشی از حرکت افراد و یا اجسام که به صورت سیگنال های بسیار ضعیف که برای انسان قابل درک نمی باشد دریافت می گردد و سپس سیستم مکانیکی (سنسور) در محدوده ی فرکانسی 10-2 Hz کار خواهد کرد و ارتعاشات ناشی از راه رفتن عادی تا دویدن را حس خواهد نمود. سپس سیگنال دریافت شده توسط سنسور به یک سیستم تقویت کننده و فیلتر ارسال می گردد تا ضمن تقویت و حذف پارازیت های زاید سیگنال اصلی دریافت گردد سیستم دارای دو بخش سخت افزاری و نرم افزاری است که مشخصات هر کدام به قرار زیر می باشد:

سخت افزار: شامل قطعات و اجزا مختلف که شامل حلقه مغناطیسی، آهنربای مغناطیسی، فنر های ضد مغناطیسی و بدنه نگاهدارنده و پوشش آلومینیومی ضد مغناطیس، تقویت کننده تفاضلی و میکروکنترلر جهت پردازش اطلاعات نرم افزار سیستم: شامل چند مرحله می باشد که عبارتند از: طراحی، شبیه سازی، مدل سازی، طراحی نرم افزار سیستم شامل دریافت اطلاعات ورودی از سنسور و حذف پارازیت ها و سپس پردازش اطلاعات اصلی توسط میکروکنترلر مورد پردازش قرار میگیرد.

**مدل سنسور :** سنسور شامل آهنربای ثابت و حلقه ی مغناطیسی متحرک میباشد در شکل 2 نشان داده شده است. [3]



شکل 2: مدل سنسور طراحی شده

این سنسور که در محدوده ی فرکانسی 2-10 هرتز کار خواهد کرد محدوده ی حرکتی راه رفتن تا دویدن را تشخیص خواهد داد. مشخصه ی فرکانسی راه رفتن افراد در محیط های گوناگون دارای فرکانسهای مختلفی میباشد و در صورت تند رفتن فرکانس نیز تا حدود 5 هرتز تغییر خواهد کرد [4]

### مراحل طراحی سیستم

با توجه به مطالعات انجام شده مدلی مطابق با مشخصات زیر برای سنسور :

- طول حلقه مغناطیسی 50 mm و قطر حلقه 30 mm و دارای دو حلقه سیم پیچ که هر حلقه 1000 دور و مقاومت هر حلقه  $190 \Omega$  بوده که اگر با هم موازی شوند  $95 \Omega$  خواهد شد.

- فنر های کششی که از جنس فسفریک بوده و بطول 25 mm و قطر خارجی فنر ها 4 mm می باشد.

- آهنربای مغناطیسی به طول 50 mm و قطر 20 mm می باشند.

در این مدل با توجه به حرکت سیم پیچ در میدان آهنربائی و قطع خطوط میدان طراحی گردیده و مدل سیم پیچ و فنرها به شرح زیر خواهد بود. با توجه به قانون دوم نیوتن برآیند نیرو ها در جهت عمودی مختصات دکارتی در دستگاه مذکور صفر است بنابراین این با داشتن پارامتر های مختلف در معادله ی استاتیکی می توان ضریب سختی فنر را به دست آورد.

در این معادله  $m$  وزن حلقه ی سیم پیچیده شده،  $g$  شتاب گرانش،  $k$  ضریب سختی فنر و  $\Delta x$  تغییر طول فنر نسبت به حالت آزاد فنر می باشد. وزن حلقه ی سیم پیچ برابر 30 gr می باشد که در این صورت سختی فنر از رابطه ی زیر محاسبه میشود

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \rightarrow \\ k \cdot \Delta x - mg &= 0 \rightarrow \\ k \times 10^{-2} - 30 \times 10^{-3} \times 9.81 &= 0 \rightarrow \\ k &= 3 \times 9.81 \end{aligned}$$

در معادله ی بالا که معادله ی استاتیکی جرم مذکور می باشد  $\Delta x$  برابر است با اختلاف طول آزاد فنر و

طول کشیده شده ی فنر وقتی جسم در حال سکون است (10 mm)، که این اختلاف طول موسوم به دلتای استاتیکی می باشد.

$\Delta x$  با توجه به اندازه گیری های بدست آمده در آزمایشگاه و شرایط مختلف برابر 10 mm بدست آمده است .

در این دستگاه از فنر های کششی استفاده شده است و کمترین طول فنر همان طول آزاد فنر بوده (25 mm) و بیشترین طول

آن (55 mm) می باشد که اگر فنر بیشتر از این کشیده شود از حالت الاستیسیته خارج شده و کارایی خود را از دست می دهد،

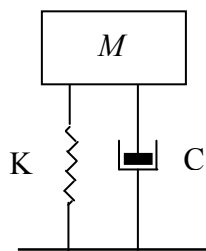
با این توضیحات حداکثر کورس فنر 30 mm خواهد بود، ولی با توجه به تحریک پایه (جابه جایی اولیه و یا نیروی اعمالی اولیه

که در معادلات به صورت جابه جایی اولیه و با نماد  $y$  ظاهر شده است) کورس بسیار کمتر از این مقدار بوده و حدود 0.1 m تا

10 mm می باشد. از نظر بهینه سازی هرچه ارتفاع دستگاه کوچکتر باشد شرایط آزمایش مطلوب تر است ، و با توجه به اینکه

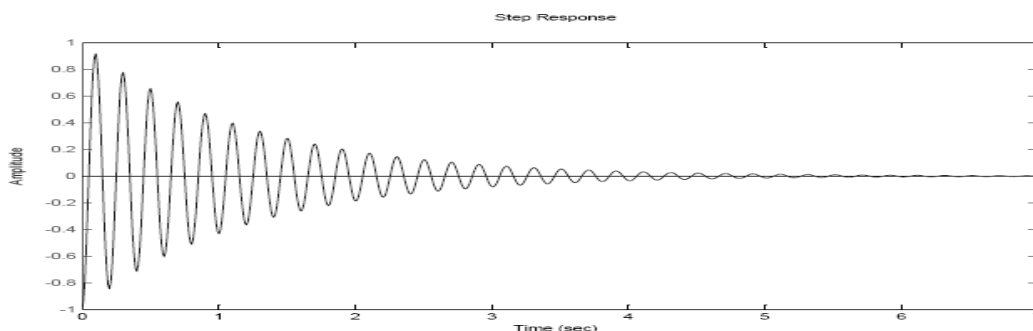
ارتفاع دستگاه به طول فنر و همچنین کورس آن و ارتفاع حلقه ی سیم پیچیده شده بستگی دارد ارتفاع دستگاه به دست می آید

که برابر است با 200 mm.



شکل 3: مدل فنر با توجه به جرم حلقه

پس از مدل سازی توسط Matlab و دریافت پاسخ فرکانسی مدل فوق که توسط فرمول فوق الذکر بیان گردید، پاسخ پله سنسور قبل از فیلتر و تقویت مطابق شکل 4 نشان داده شده است



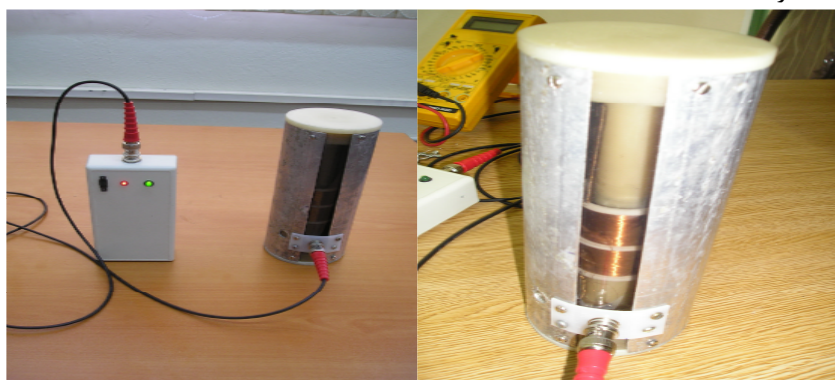
شکل 4: نمودار پاسخ پله سنسور

### تقویت کننده و میکروکنترلر:

در این سیستم از یک میکروکنترلر Atmega8 [5] که دارای مبدل های A/D و ورودی های دیجیتال میباشد جهت پردازش اطلاعات و جهت حذف پارازیت های محیطی و تقویت سیگنال دریافتی از دو عدد تقویت کننده تفاضلی متوالی با بهره ی خروجی حدود 500 استفاده شده است.

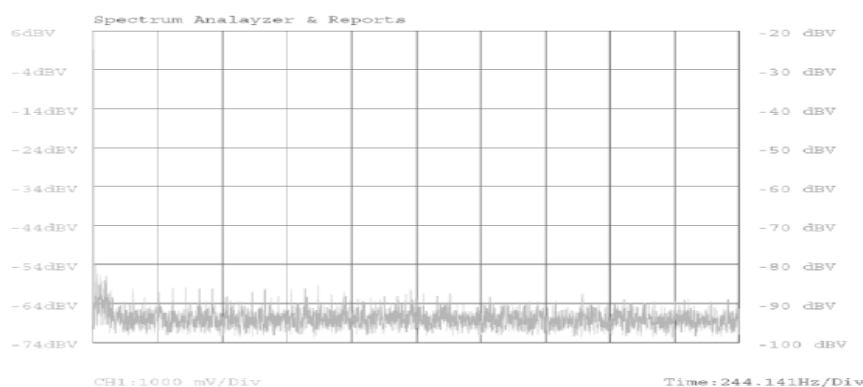
### مشخصات سیستم:

این سیستم دارای یک سنسور که در جعبه ای آلومینیومی استوانه ای به شعاع 8 سانتی متر و ارتفاع 18 سانتی متر به و جعبه ب کنترلر که شامل یک LED سبز رنگ جهت نمایش قدرت و توان سیگنال دریافتی و یک LED قرمز رنگ جهت نمایش روشن / خاموش بودن دستگاه و یک کلید جهت روشن / خاموش کردن دستگاه و یک بازر که صدای آن متناسب با توان سیگنال دریافتی تغییر خواهد کرد.



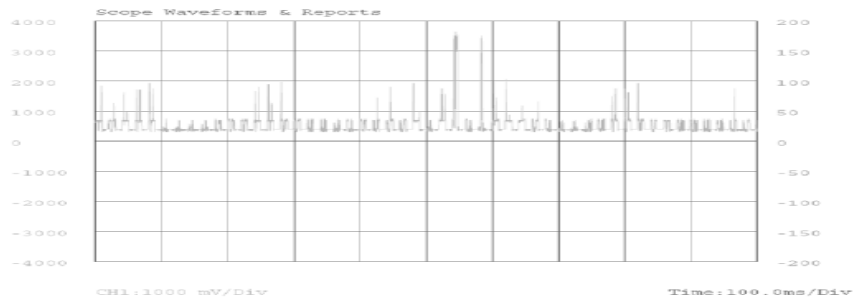
شکل 5 : تصاویر واقعی از سنسور و کنترل کننده ی آن

خروجی های سیستم در هنگام راه رفتن عادی و تند نشان داده شده است. شکل موجهای بدست آمده از نمونه ساخته شده هنگام راه رفتن متناوب و راه رفتن غیر یکنواخت در حوزه فرکانس و زمان به صورت شکلهای زیر می باشد.

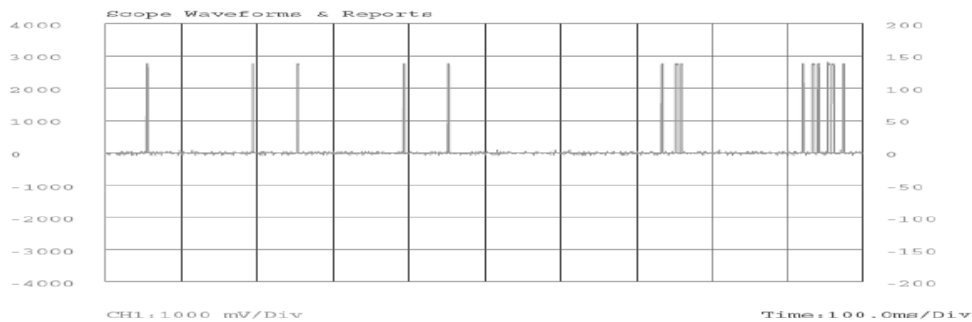


شکل 5: خروجی سیستم در حالت سکون

در شکل 5 هیچ گونه سیگنالی که نشان دهنده ی ضربه و یا ارتعاشی باشد مشاهده نمیشود.



شکل 6 : خروجی سیستم در حالت راه رفتن یکنواخت در حوزه فرکانس



شکل 7 : خروجی سیستم در حالت راه رفتن تند و یکنواخت در حوزه فرکانس

در این اشکال فرکانس راه رفتن حدود 1 هرتز نشان داده شده است. این اندازه گیری ها بر روی زمین سخت و با ضریب انتشار امواج بسیار کم بدست آمده است. در محیط هایی که سطح آنها سرامیک و یا آهنی و چوبی باشند قدرت انتشار بیشتر و سنسور حساستر خواهد بود.

### نتیجه گیری :

با این روش ساخت انواع سنسور ها در فرکانس های مختلف امکان پذیر بوده و با استفاده از تعدادی از آنها بصورت شبکه ای از سنسور ها میتوان سرعت حرکت انتشار امواج را نیز بدست آورد. از این سیستم به عنوان حفاظت از محیطهای فیزیکی و دریافت اطلاعات تردد نیز استفاده نمود. هزینه هر دستگاه بسیار کم و قابل استفاده در تمام محیط ها بوده و قابلیت نصب در زیر زمین جهت پنهان سازی و قابلیت اتصال مجموعه ای از آن ها به یکدیگر به صورت شبکه جهت پوشش قرار دادن محوطه های بزرگتر را دارا خواهد بود.

### مراجع :

- 1 - دینامیک خاک - ترجمه و تالیف دکتر سید مجدالدین میر حسینی - موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله چاپ اول 1372
- 2- Takashi obata, Yasunori Miyamori, " identification of a human force model based on dynamic monitoring data from pedestrian bridges", **Science Direct** , computers and structures, Volume 84, issues 8-9, March 2006, P 541-548
- 3- Aaron Barzilai, s , Ph.D Deffence, Mechanical Engineering "Improving a geophone to produce an affordable, broad band seismometer", January 2000, Stanford university
- 4- <http://www.freepatentsonline.com/7099235.html>
- 5- <http://www.atmel.com/products/avr> **Atmel microcontroller data sheet.**