لیزر در پزشکی ۱۴۰۱/ دوره ۱۹ / شماره (۲) / صفحات ۷-۱.

مقاله پژوهشی

آنالیز عملکرد نبض انسان با استفاده از دستگاه ارتعاش‌سنج مبتنی بر اثر دوپلر

پروانه نظری قاسم قشلاقی[۱]، **فاطمه رضائی**[۲]*

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، آزمایشگاه بیوفتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

۲. هیئت علمی دانشگاه، آزمایشگاه بیوفتونیک، دانشکده‌فیزیک،دانشگاه‌خواجه‌نصیرالدین طوسی.

نویسندهٔ‌مسئول: فاطمه رضائی

پست الکترونیکی: fatemehrezaei@kntu.ac.ir.

شماره تماس ۰۲۱-۲۳۰۶۴۴۵۴

خلاصه

مقدمه: از دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلر در حوزه اندازه‌گیری اپتیکی دامنه، فرکانس و سرعت اشیائ دارای ارتعاش استفاده می‌شود. مزیت مهم این دستگاه این است که بدون تماس و حتی با استفاده از چیدمان آزمایشگاهی تداخل‌سنج مایکلسون می‌تواند ارتعاشات اجسام متحرک را اندازه‌گیری کند. در این دستگاه، فرکانس و دامنه ارتعاش، از جابجایی دوپلر فرکانس نور لیزر به‌دست می‌آید. از طرفی همه سلول‌ها، ارگان‌ها و بافت‌های بدن انسان و تمام موجودات زنده دیگر و حتی میکروارگانیسم‌ها ارتعاشات معینی را دارا می‌باشند و ازآنجاکه ارتعاشات دارای فرکانس مشخصی هستند، بنابراین ارتعاشات سلول‌های بدن ما نیز دارای طول موج خاصی هستند که با این چیدمان قابل اندازه‌گیری هستند.

روش بررسی: در این تحقیق، با استفاده از دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلر[۱] به عملکرد نبض دست و پای انسان پرداخته شده است. در ابتدا، چیدمان آزمایشگاهی این دستگاه طراحی شد و بعد به‌صورت دستگاهی یک‌شده به اندازه‌گیری ارتعاشات پرداخته شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از این مطالعه نشان داده است که نبض دست و پای انسان در فرکانس مشخصی دارای ارتعاش می‌باشند که قابل اندازه‌گیری هستند.

نتیجه‌گیری: به‌منظور برآورد عملکرد نبض انسان، میزان ارتعاشات آن توسط دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان دادند که محدوده فرکانسی ارتعاش نبض انسان حدود ۲ هرتز می‌باشد که می‌توان این روش را به عنوان یکی از بهترین تکنیک‌های جایگزین نسبت به سایر روش‌های متداول توام با عوارض جانبی معرفی نمود. همچنین، از این تکنیک می‌توان به‌منظور اندازه‌گیری ضربان قلب، تنفس و سایر اعضای بدن استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: نبض انسان، ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری، بیماری

[1] Laser Doppler vibrometer (LDV)

مقـــدمه

بدن همه موجودات زنده الکتریسته تولید می‌کند و هر نوع جانوری، یک فرکانس مشخص دارد. حتی اشیاء نیز به علت جنبش ذرات اتمی‌شان دارای فرکانس معینی هستند[۱]. شایان ذکر است که اگر امروزه شاهد افزایش بیمارهایی نظیر سرطان و جنون[۲]، خرابی اعصاب[۳]، کم‌خونی[٤]، سقط جنین[٥]، سردرد [٦] و...[۷] هستیم، مربوط به برهم‌خوردن فرکانس طبیعی در بدن انسان است[۸].

به‌طورکلی ارتعاش‌سنج‌های لیزری مبتنی بر اثر دوپلر ابزارهایی هستند که برای اندازه‌گیری اپتیکی دامنه، فرکانس و سرعت اشیای مرتعش بدون تماس استفاده می‌شوند[۹]. در این دستگاه، از تکنیک جابجایی و سرعت براساس اثر دوپلر استفاده می‌شود. این پدیده در هر شکلی از انتشار موج که حرکت نسبی بین منبع و دریافت‌کننده سبب جابجایی فرکانسی وابسته به سرعت نسبی شود، اتفاق می‌افتد که با اندازه‌گیری این تغییر فرکانس می‌توان سرعت اشیای متحرک را به آسانی محاسبه کرد. نکته‌ی حائز اهمیت در ارتعاش‌سنج‌های لیزری دوپلری این است که در این دستگاه، حرکت نسبی بین منبع و دریافت‌کننده (ناظر) وجود ندارد و شیء متحرک بین دریافت‌کننده و منبع، سبب انعکاس نور می‌گردد[۱۰]. درواقع ازآنجایی‌که ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری براساس تکنیک اندازه‌گیری بدون تماس استوار است، قسمت‌های مورد آزمایش در طول اندازه‌گیری دچار تخریب نمی‌شوند. همچنین، از این تکنیک برای اندازه‌گیری در شرایطی که اجسام دمای بالایی دارند یا بسیار کوچک هستند، و یا امکان تماس فیزیکی برای آنها وجود ندارد یا نهی شده است (به عنوان مثال بیماران دچار سوختگی یا بیماری‌های پوستی شدید و یا نوزادان)، استفاده می‌شود.

شایان ذکر است که پایه و اساس دستگاه ارتعاش‌سنج‌های لیزری دوپلری، بر روش تداخل‌سنجی استوار است. بدین‌دلیل‌که سرعت‌های موجود در مقایسه با سرعت نور خیلی کوچک هستند و امکان بکارگیری سرعت اندازه‌گیری‌شده به‌طور مستقیم براساس اثر دوپلر وجود ندارد و همچنین، ازآنجاکه این سرعت‌های کوچک، جابجایی فرکانس دوپلر کوچکی را در مقایسه با فرکانس نور لیزر Hz ۱۰۱٤× ٤/۷٤ ایجاد می‌کنند که به‌طور الکترونیکی به‌راحتی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند، به‌همین‌دلیل، به‌منظور ترکیب نور پراکنده‌شده با پرتوی مرجع که هر دو از یک منبع همدوس (لیزر) منتشرمی‌شوند، از یک تداخل‌سنج اپتیکی مانند تداخل‌سنج مایکلسون استفاده می‌گردد.

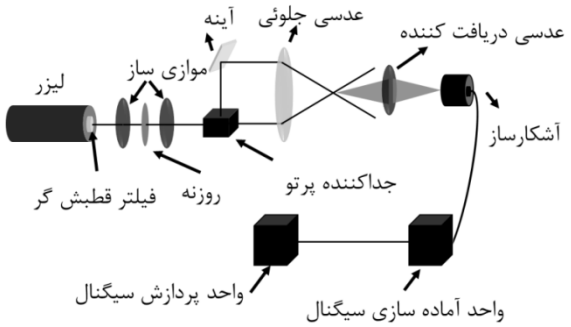
گروه‌های متعددی به استفاده از دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری به‌منظور آنالیز عملکرد اعضای بیولوژیک بدن پرداختند. به‌عنوان مثال، اولین دستگاه ارتعاش‌سنج (سرعت‌سنج) لیزری مبتنی‌بر اثر دوپلر توسط کامینز، نابل و یه در سال ۱۹٦۳ ارائه شد. در آن زمان یک پیکربندی نوری معرفی شد که با نام حالت پرتوی مرجع شناخته شده بود. سپس، پیکربندی پرتو با پراکندگی دوگانه توسط پنی (۱۹٦۹) استفاده شد. همچنین، در همین دوره و تقریباً به‌طور همزمان، حالت دو پرتویی توسط لمان (۱۹٦۸) و فون استاین و فیفر (۱۹٦۹) معرفی شد که به آنها حق ثبت اختراع اعطا شد. در این پیکربندی، از دو پرتوی لیزر ورودی که از زاویه تقاطع عبور می‌کردند، برای تشکیل یک حجم اندازه‌گیری استفاده شده بود و نور پراکنده‌شده از هر دو پرتو توسط یک آشکارساز جمع‌آوری شده بود. این موارد، نوآوری‌هایی اساسی بودند که منجربه ساخت دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری امروزی شدند. در پژوهشی که توسط دو دانشمند به نام‌های ریوا و همکارانش انجام شد، اولین اندازه‌گیری سیال خون در رگ‌های شبکیه چشم انسان در سال۱۹۷۲ صورت پذیرفت. پس از آن اشترن الین، نمونه‌ای دیگر از دستگاه سرعت‌سنج لیزری دوپلری را طراحی کرد و آن را در مراکز علمی مختلف ارائه داد که مورد توجه بسیاری از محققان و شرکت‌های ساخت دستگاه‌های پزشکی قرار گرفت[۱۱]. بعد از آن محققان زیادی از روش‌های لیزری مبتنی بر اثر دوپلر، برای اندازه‌گیری سرعت خون در بخش‌های مختلف بدن انسان و موجودات زنده دیگر استفاده کردند. این روش کاربردهای متعددی در بخش‌های بالینی و تحقیقاتی داشته است که می‌توان به مواردی نظیر تشخیص و بررسی میزان گرفتگی عروق، سنجش جریان خون در هنگام تزریق دارو، مطالعه تغییر نسبی جریان پس از تزریق و همچنین، اندازه‌گیری تغییر جریان خون در بافت عصبی با توجه به تغییر شرایط محیطی مانند محرک‌های عصبی و یا تاثیر استفاده از داروها در نواحی مختلف دستگاه عصبی و موارد دیگر اشاره کرد. همچنین، در تحقیق دیگری در سال ۱۹٦٤، دو دانشمند به نام‌های یه و کامینز بری اولین بار از نور لیزر برای اندازه‌گیری فلوی سیال‌ها استفاده کردند[۱۲]. آنها اذعان کردند که نوری که از ذرات موجود در سیال و یا ناخالصی‌های موجود در آن پراکنده می‌شد، تغییر فرکانس می‌یافت که با این تغییر با سرعت سیال متناسب است. آنها موفق شدند با استفاده از این روش، سرعت سیالی با جریان لایه‌ای را در نقاط مختلف آن اندازه بگیرند. لذا، این روش سریعاً در صنعت مورد استفاده قرار گرفت. به‌همین‌دلیل،

دستگاه‌های تجاری که با این روش کار می‌کردند به سرعت ساخته شدند. سپس، در تحقیقی دیگر از LDV برای ثبت مشخصات صوتی که از دریچه قلب ساطع می‌شود استفاده شد[۱۳]. آنها این دستگاه را بر روی ۳۰ نقطه از قفسه سینه قرار دادند و این شیوه اندازه‌گیری را بر روی ۷ نفر تکرار کردند. آنها سیگنال‌های ضبط‌شده را آنالیز و دامنه فرکانس‌هایشان را فیلتر کردند تا به S1 و S2 (که صداهای قلب هستند) رسیدند. برای محاسبه میانگین انرژی نقاط S1 و S2 برای ۳۰ نقطه CoE یا مرکز انرژی درنظر گرفته شد. آنها دریافتند که نویز سینگال‌های دریافتی برای فرکانس‌های زیر ۸۰ هرتز به مینیمم مقدار خود می‌رسد، درحالی‌که ۹۹% انرژی سیگنال زیر ۸۰ هرتز بود.

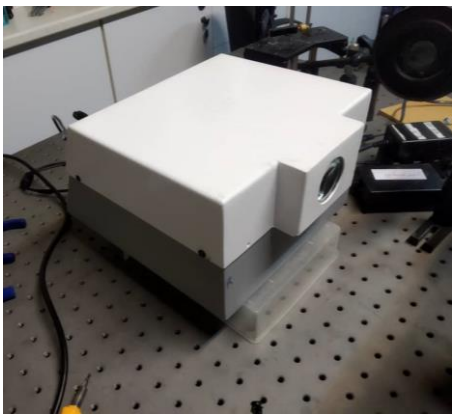
در این پژوهش، از دستگاه LDV به‌منظور اندازه‌گیری فرکانس نبض دست و پای انسان استفاده شد و عملکرد آنها مورد بررسی قرار گرفت. به‌عبارتی‌دیگر، طی آنالیز فرکانس امواج بیوالکترومغناطیس بدن می‌توان به تشخیص انواع بیماری‌ها پی برد. شایان ذکر است که با مطالعه بیشتر در حوزه پزشکی در این مورد می‌توان این دستگاه را وارد بُعد درمانی نیز کرد. به‌این‌ترتیب که علاوه‌بر آن‌که این دستگاه تشخیص بیماری را با توجه به اختلال در فرکانس امواج بیوالکترومغناطیس بدن انجام می‌دهد، می‌تواند با توجه به میزان اختلال در فرکانس ارتعاشات سلول‌ها، امواج الکترومغناطیسی لازم را جهت تصحیح فرکانس ارتعاشات سلول‌ها به بدن واردکرده و به‌این‌ترتیب سبب درمان بیماری شود. از نوآوری‌های این تحقیق، بومی‌سازی این تجهیز در داخل ایران با حداقل هزینه می‌باشد که می‌توان آن را در بیمارستان‌ها بکار برد تا به عنوان منبعی استریل و فاقد ناقل ویروس و بیماری جهت تشخیص انواع بیماری استفاده کرد.

روش بررسی

در شکل ۱ یک سیستم ارتعاش‌سنج یا سرعت‌سنج لیزری دوپلری دو پرتویی مشاهده می‌شود که شامل یک منبع نور تک‌رنگ است که با استفاده از قطعات اپتیکی به دو پرتو همدوس تقسیم می‌شود. سپس، این پرتوها از قطعات انتقال‌دهنده اپتیکی عبور می‌کنند و در فاصله‌ای ثابت نسبت به انتقال‌دهنده اپتیکی متمرکز می‌شوند. همان‌طورکه در این شکل مشخص شده است، این تقاطع، یک الگوی تداخلی دارد و شامل مجموعه‌ای از حاشیه‌های مستقیمی است که فاصله‌ی برابری از یکدیگر دارند. در بخش جمع‌کننده از یک دریافت‌کننده و یک عدسی همگرا، برای متمرکزکردن و آشکارسازی سیگنال‌ها استفاده می‌شود که خروجی آن با استفاده از کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال[1] و یک اسیلوسکوپ[2] مورد آنالیز و بررسی قرار می‌گیرد. شکل پک‌شده این دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: چیدمان دو پرتویی دستگاه ارتعاش‌سنج یا سرعت‌سنج لیزری دوپلری



شکل ۲: نمایی از دستگاه پک شده جهت اندازه‌گیری ارتعاشات بیولوژیکی انسان

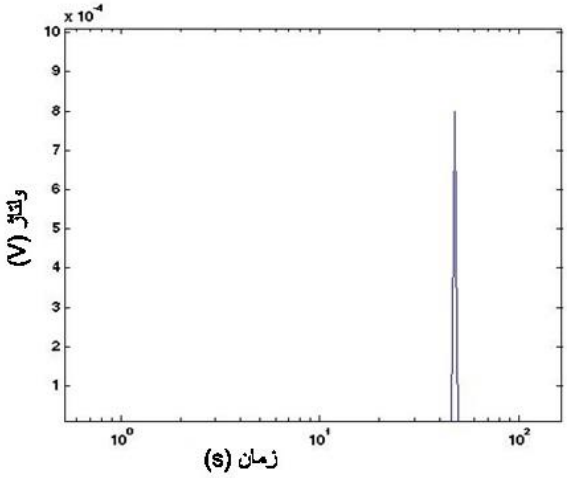
جهت شروع آزمایش، ابتدا آشکارساز به منبع تغذیه‌اش وصل می‌شود و سپس، آشکارساز با کابل مخصوص خود به فیلتر متصل می‌شود. این فیلتر، هم فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰ هرتز را به‌طورکلی فیلتر می‌کند و هم سیگنال را تقویت می‌کند. خروجی تقویت‌کننده با آردوینو ارتباط دارد و در پایان، آردوینو با یک کابل USB به سیستم کامپیوتر وصل می‌شود. داده‌هایی که به کامپیوتر می‌رسند، وارد کد برنامه‌ای که با نرم‌افزار لب‌ویو[3] نوشته شده است می‌شوند و سپس پردازش می‌شوند و

[1] Data Acquisition
[2] Oscilloscope
[3] LABVIEW

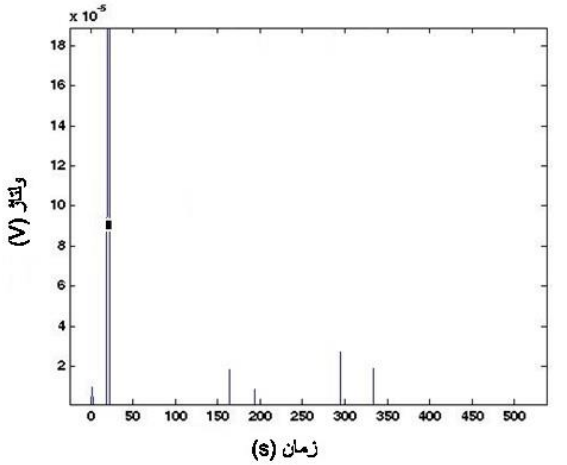
داده‌های خروجی به‌دست می‌آیند. به عبارتی دیگر، اندام‌های مورد نظر از بدن انسان (دست و پا) مقابل لیزر قرار می‌گیرند و با سیستم چیدمان توضیح داده شده، داده‌های به‌دست آمده ثبت می‌شوند.

یافتـه‌ها

اکنون نمودار ولتاژ برحسب زمان خروجی برای فرکانس نبض دست و پای راست فرد مورد آزمایش با قراردادن بازتابنده‌ای بر روی محل برخورد لیزر به پوست به ترتیب در اشکال ۳ و ٤ نشان داده شده است.

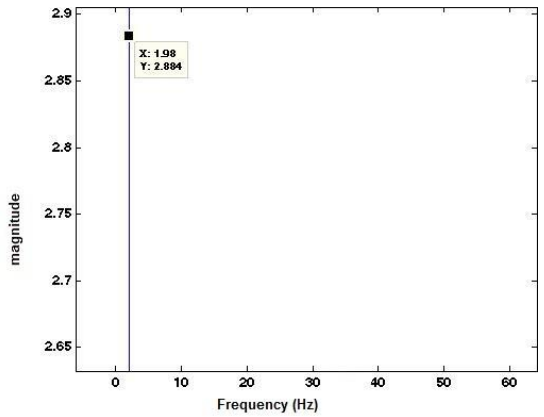


شکل ۳: نمودار ولتاژ برحسب زمان حاصل از ارتعاش نبض دست راست انسان.



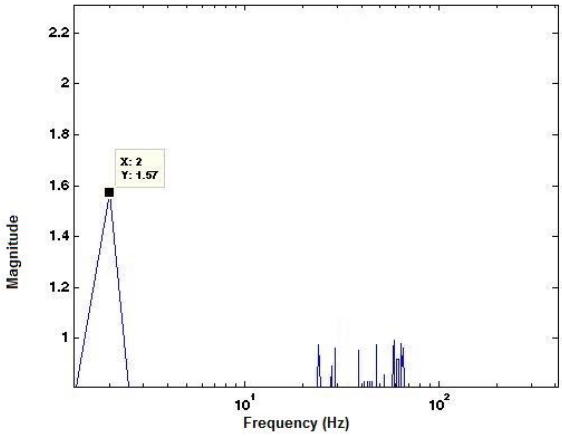
شکل ٤: نمودار ولتاژ برحسب زمان به‌دست‌آمده از ارتعاش نبض پای راست انسان.

سپس، به‌منظور مطالعه نحوه ارتعاش نبض‌های سمت راست بدن انسان از تبدیل فوریه[1] نمودارهای بالا استفاده می‌شود تا رفتار فرکانسی آنها بررسی شود. شکل‌های ۵ و ٦ به ترتیب تحولات فرکانسی نبض دست راست و پای راست انسان سالمی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در محل برخورد لیزر به بدن از بازتابنده استفاده شده است تا میزان بازتاب و پخش نور افزایش یابد و نسبت سیگنال به نویز افزایش یابد. همچنین، در کد نرم‌افزار لب‌ویو، فرکانس‌های خارج از محدوده‌ی ۳۰ تا ۵۰ هرتز فیلتر شده‌اند تا رزولشون اندازه‌گیری افزایش یابد. همان‌طورکه در این شکل ملاحظه می‌گردد، نبض دست و پای انسان دارای فرکانسی از مرتبه ۲ هرتز هست. این آزمایش بر روی چندین فرد سالم تست شده است و محدوده فرکانسی مشابهی رویت گردیده است. همان‌طورکه در این نمودارها مشاهده می‌شود پیک فرکانس نبض انسان در حدود ۲ هرتز می‌باشد که نتایج این نمودار همخوانی قابل قبولی با نتایج مرجع [١٤] دارد. شایان ذکر است که نتایج این تحقیق نیز با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط مرجع [١٥] انطباق خوبی دارد. آنها از دستگاه تشخیص‌دهنده پالس میکروپیزوالکتریک نبض انسان را در محدوده بین ۱ الی ۲ هرتز اندازه‌گیری کردند. به‌علاوه، مرجع [١٦] با بهره‌گیری از حسگر آکوستیک عملکرد قلب را با اندازه‌گیری فرکانس نبض انسان را برآورد کردند. آنها نیز فرکانسی مشابه با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در این مقاله گزارش کردند.



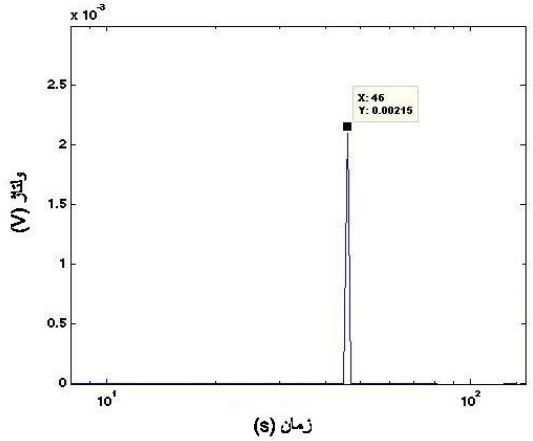
شکل ۵: نمودار FFT به‌دست‌آمده از ارتعاش نبض دست راست انسان.

[1] Fast Fourier Transform (FFT)



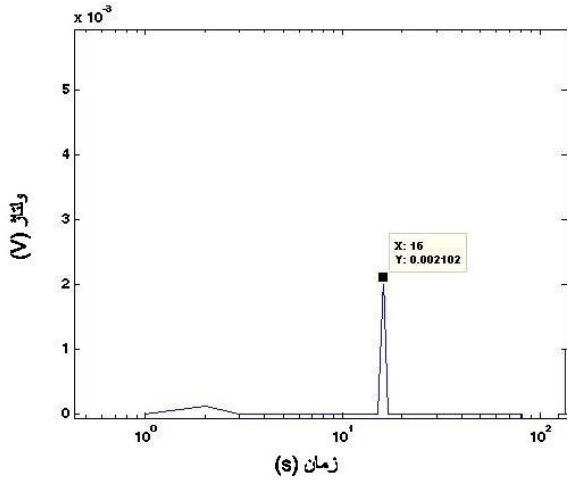
شکل ٦: نمودار FFT به‌دست‌آمده از ارتعاش نبض پای راست انسان.

سپس، دست چپ فرد در مقابل دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری قرار می‌گیرد. نمودار ولتاژ برحسب زمان برای فرکانس دست چپ در شکل ۷ مشاهده می‌شود. به‌طورکلی از نمودار ولتاژ زمان به‌منظور دریافت سیگنال خروجی از فوتودیود و گرفتن تبدیل فوریه استفاده می‌شود.



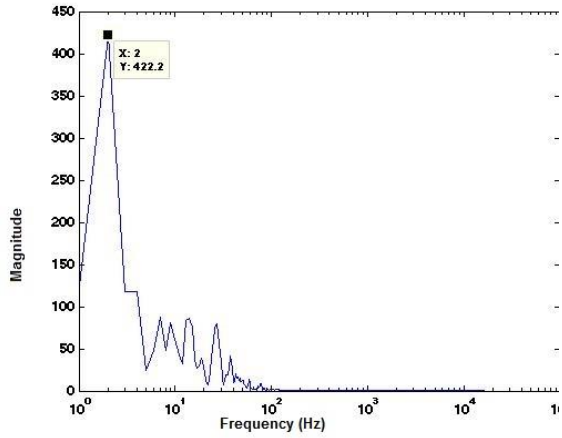
شکل ۷: نمودار ولتاژ برحسب زمان حاصل از فرکانس دست چپ انسان با بازتابنده.

در ادامه، پای چپ مقابل دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری قرار می‌گیرد و در محل برخورد لیزر به پای چپ از بازتابنده استفاده می‌شود. سپس، در کد نرم‌افزار LABVIEW، فرکانس‌های خارج از محدوده ۲ تا ۲۰ هرتز فیلتر می‌شوند تا بررسی شود آیا این دستگاه قادر به تشخیص فرکانس پای انسان که طبق منابع و مقالات موجود در محدوده ۲ تا ۲۰ هرتز قرار دارد، هست یا خیر .

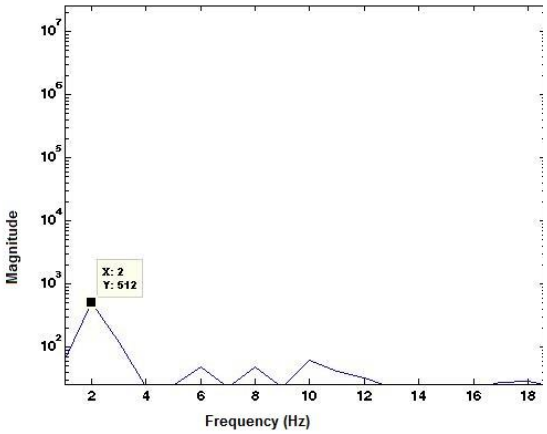


شکل۸ : نمودار ولتاژ بر حسب زمان به‌دست‌آمده از فرکانس پای چپ انسان.

در انتها نیز نمودار FFT خروجی به ترتیب برای فرکانس‌های دست چپ و پای چپ انسان در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند. در این اشکال نیز فرکانس ۲ هرتز اندازه‌گیری شده است که تاییدکننده نتایج مربوط به دست و پای ناحیه راست بدن است.



شکل ۹: نمودار FFT به‌دست‌آمده از فرکانس دست چپ انسان با بهره‌گیری از دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری.



شکل۱۰: نمودار FFT حاصل از فرکانس پای چپ انسان.

شایان ذکر است که ازجمله محدودیت‌های این دستگاه، حساس بودن به ارتعاشات محیط و نویزهای اطراف است. لذا، بایستی به‌منظور اندازه‌گیری درست، دستگاه را بر روی ناحیه بدون حرکت قرار داد و از حرکات اضافه دست و پا در حین اندازه‌گیری اجتناب شود.

نتیجه‌گیری

دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری قادر به تشخیص بیماری‌ها می‌باشد که اساس کار آن، آنالیز فرکانس ارتعاشات سلول‌ها، ارگان‌ها و بافت‌های مختلف بدن است. به عبارتی اعتقاد آلبرت انیشتین در این‌باره که "همه چیز در زندگی ارتعاش است" ثابت شده است. در این پژوهش به‌طور کمی به آنالیز فرکانس نبض انسان پرداخته شده است و تایید شده است که همه سلول‌ها، ارگان‌ها و بافت‌های بدن انسان و تمام موجودات زنده دیگر و حتی میکروارگانیسم‌ها ارتعاشات معینی را دارند. ازآنجاکه ارتعاشات دارای فرکانس هستند، بنابراین ارتعاشات سلول‌های بدن ما نیز دارای طول موج خاصی هستند. در این پژوهش، می‌توان اذعان نمود که دستگاه LDV با اندازه‌گیری و آنالیز فرکانس ارتعاشات بدن اعم از دست و پا می‌تواند به بیماری‌ها و یا پیش‌زمینه‌های ایجاد بیماری در بافت‌های بدن پی‌ببرد. همان‌طورکه در کلیه نتایج ملاحظه شد، تمامی خروجی‌های استخراج‌شده از دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری که در آزمایشگاه با استفاده از آن داده‌ها گرفته شد، با منابع و مقالات موجود مطابقت داشته و همچنین، پیشنهاد می‌شود از این دستگاه می‌توان برای تشخیص درستی فرکانس سایر اعضا و ارگان‌های بدن انسان اعم از گوش، ضربان قلب و تنفس استفاده کرد.

References

1. Cardinale M, Wakeling J, Viru A, Whole body vibration exercise: are vibrations good for you?, British Journal of Sports Medicine (BJSM), 2005; 39(9).
2. Verhulst A L J, Savelberg H H C M, Vreugdenhil G, Mischi M, Schep G, Whole-Body Vibration as a Modality for the Rehabilitation of Peripheral Neuropathies: Implications for Cancer Survivors Suffering from Chemotherapy-Induced Peripheral Neuropathy, Oncology Reviews, 2015; 9(1): 263.
3. Ando H, Noguchi R, Dependence of palmar sweating response and central nervous system activity on the frequency of whole-body vibration, Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 200; 329: 216-219 .
4. Das P P, Bachchan A A, Sahu R, Chaudhary V, Whole body vibration: Effects on human body and role of biomaterials in repairing fracture joints and tissues, Materials Today, 2021; 43, 141-147.
5. Seidel H, Selected health risks caused by long-term, whole-body vibration, American journal of industrial medicine, 1993; 23(4).
6. Palmer K T, Griffin M J, Syddall H E, Pannett B, Cooper C, Coggon D, The relative importance of whole body vibration and occupational lifting as risk factors for low-back pain, Occup Environ Med 2003; 60:715–721.
7. Marianne N. Michaels, Kenny C.S. Kwok, Peter A. Hitchcock, Human body response to low frequency narrowband random building motions, The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 2009; Taipei, Taiwan
8. Scutter S, Türker K S, Hall R, Headaches and neck pain in farmers, Australian Journal of Rural Health, 1997; 5: 2-5
9. Saneinejad V, Gourani P, Sedeh AB, Rezaei F, Study of vibration frequency of bridge structure with the help of Doppler laser vibration meter, journal of sound and vibration, 2020; 9 (17): 81-90.
10. Sedeh AB, Gourani P, Saneinejad V, Rezaei F, Helicopter main rotor angular velocity analysis by laser Doppler velocimetry: simulation and experimental results, Applied optics, 2019; 58 (18): 5009-5017.
11. Castellini P, Montanini R, Automotive components vibration measurements by tracking laser Doppler vibrometry: advances in signal processing, Measurement Science and Technology, 2002; 13: 1266.
12. Fu Y, Guo M, Phua P B, Multipoint laser Doppler vibrometry with single detector: principles, implementations, and signal analyses, Applied Optics, 2011; 50(10): 1280-8.
13. Shang J, He Y, Wang Q, Li Y, Ren L, Development of a High-Resolution All-Fiber Homodyne Laser Doppler Vibrometer, Sensors, 2020; 20(20), 5801.
14. Basilio J C C, Ribeiro J G T, Soeiro F J C P, Modeling and optimizing a vehicle suspension considering user safety and comfort in an irregular road, 25th International Congress of Mechanical Engineering, 2019.
15. Chang H, Chen J, Liu Y, Micro-piezoelectric pulse diagnoser and frequency domain analysis of human pulse signals, Journal of Traditional Chinese Medical Sciences, 2018; 5(1), 35-42.
16. Sharma P, Imtiaz S A, Rodriguez-Villegas E, Acoustic sensing as a novel wearable approach for cardiac monitoring at the wrist, Scientific Reports, 2019;9,20079.