

## توسعه‌ی سیستم اندازه‌گیری ارتعاش دوبعدی به‌روش تصویربرداری با رویکرد خاص به ارتعاشات واداشته‌ی بدن انسان در راستای قائم

علیرضا میرباقری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

رویا نریمانی (مربی)

مریم هویت‌طلب (مربی)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، آزمایشگاه بیومکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

از آنجا که اندازه‌گیری ارتعاشات ابزاری کلیدی در بسیاری از زمینه‌های پژوهشی است، روش‌های مختلفی برای ثبت و تحلیل ارتعاشات یک سیستم ابداع و پیاده‌سازی شده‌اند. روش‌های مرسوم مثل شتاب‌سنجی، که اندازه‌گیری را با روش‌های تماسی انجام می‌دهند در اندازه‌گیری ارتعاشات بدن انسان دارای محدودیت‌هایی بوده و در نحوه‌ی نصب روی بدن انسان خطای ساختاری دارند. در این نوشتار، مراحل عملی اندازه‌گیری ارتعاشات و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش تصویربرداری، و با رویکرد خاص به اندازه‌گیری ارتعاشات واداشته بدن انسان در راستای قائم بیان شده‌است. در مقایسه‌ی روش تصویربرداری با روش شتاب‌سنجی در اندازه‌گیری ارتعاشات باید گفت، حساسیت روش تصویربرداری به نویز بسیار کمتر از روش شتاب‌سنجی بوده و در این روش اندازه‌گیری‌ها به‌صورت نامحسوس و بدون تماس با موضوع آزمایش انجام می‌شود و با توجه به کاربرد روش‌های مبتنی بر تصویربرداری در آزمایشگاه بیومکانیک، استفاده از این روش در اندازه‌گیری ارتعاشات هزینه‌های سخت‌افزاری را به میزان قابل توجهی کاهش داده‌است.

### مقدمه

با حضور فن‌آوری در زندگی امروزی، بدن انسان متحمل تنش‌های ناشی از انواع گوناگون نیروهای ارتعاشی است. این ارتعاشات اثرات محسوسی بر سلامت جسم و روان انسان می‌گذارد. [۱، ۲] همچنین ادامه‌ی این تنش‌ها محدودیت‌هایی در فعالیت‌های روزانه و عادی شخص به‌وجود خواهد آورد که به خواص دینامیکی بدن شخص بستگی دارد. [۳-۵] از آنجا که بدن انسان به‌صورت سیستمی متشکل از جرم و فنرهای جفت شده است و علاوه بر آن سیستم دینامیکی فعالی است، مطالعه و تحلیل پاسخ بدن در مقابل ارتعاشات با استفاده از روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی بسیار پیچیده است. از این رو روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری تجربی ارتعاشات در بسیاری از زمینه‌های صنعتی و تحقیقاتی، از جمله بیومکانیک شغلی و اندازه‌گیری ارتعاشات بدن انسان، کاربردهای وسیعی پیدا کرده است. به این ترتیب یک سیستم اندازه‌گیری ارتعاشات که با هزینه‌ی کمی قابل تهیه بوده و با دقت قابل قبولی ارتعاشات را ثبت کند، ابزار بسیار مناسبی برای بسیاری از پروژه‌های تحقیقاتی خواهد بود.

در روش معمول سنجش ارتعاش با استفاده از روش شتاب‌سنجی، بایستی حسگرهای شتاب با استفاده از چسب یا باندکشی بر روی پوست بدن انسان نصب شوند، این کار اگرچه عملی است، روشی

غیرمستقیم به حساب می‌آید [۶] و دارای خطای ساختاری است، زیرا از یک سو وزن و اینرسی خود حسگر بر ارتعاشات اندازه‌گیری شده تأثیر می‌گذارد و از سوی دیگر احساس یک جسم خارجی در غیر طبیعی کردن پاسخ فرد به ارتعاشات واداشته موثر است. علاوه بر این استفاده از شتاب‌سنج نیازمند تهیه‌ی تجهیزات گران قیمتی است که تنها در این روش کاربرد دارند.

روش‌های اندازه‌گیری مبتنی بر تصویربرداری مزایای عمده‌ی نسبت به روش‌های دیگر دارند. از مهم‌ترین این مزایا، اندازه‌گیری نامحسوس و بدون تماس با موضوع آزمایش است که به فرد امکان انجام آزادانه‌ی هر نوع حرکتی را می‌دهد و محدودیتی برای او ایجاد نمی‌کند. یکی دیگر از این مزایا تکیه‌ی عمده‌ی روش تصویربرداری بر نرم‌افزار است. به این ترتیب پروژه‌های تصویربرداری مختلفی با هسته‌ی سخت‌افزاری مشترک قابل اجرا هستند و این امر می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های یک مرکز تحقیقاتی شود. از جمله مزایای دیگر این روش نصب و راه‌اندازی سریع و انجام آزمایش‌ها در حداقل زمان ممکن است.

در این پژوهش با انجام آزمایشات مکرر به توسعه و بهینه‌سازی روش تصویربرداری در اندازه‌گیری ارتعاشات واداشته‌ی بدن انسان پرداخته شده و نتایج حاصله مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

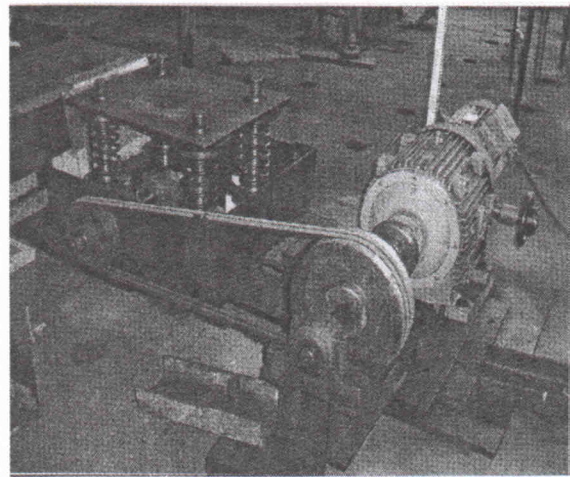
## روش انجام آزمایش

فیلم‌ها ابتدا روی نوار ضبط شده و از طریق پورت IEEE ۱۳۹۴ و پروتکل DV به کمک نرم‌افزار Pinnacle Studio DV و با فرمت MPEG به رایانه منتقل شده‌اند. سپس دو فایل تولید شده از هر مورد آزمایش که یکی مربوط به اندازه‌گیری ارتعاش پیشانی شخص آزمایش دهنده و دیگری مربوط به صفحه‌ی مرتعش است به نرم‌افزار Motion Logger که در آزمایشگاه بیومکانیک دانشگاه صنعتی شریف طراحی و کد نویسی شده است، منتقل شده و مورد عملیات پردازش تصویر قرار گرفته‌اند. مبانی پردازش تصویر در این نرم‌افزار در جای خود توضیح داده خواهند شد.

## طراحی مارکرها و کالیبراسیون روش

در روش تصویربرداری بایستی بر روی نقاطی که اندازه‌گیری ارتعاش آنها مد نظر است مارکرهایی نصب شوند. این مارکرها باید به گونه‌ی طراحی شوند که تشخیص آنها در نرم‌افزار پردازش تصویر به راحتی امکان پذیر باشد. علاوه بر این در روش تصویربرداری برای کالیبراسیون روش و مشخص کردن این نکته که هر میلی‌متر معادل چند پیکسل از تصویر است (این کار در نرم‌افزار پردازش تصویر انجام می‌شود)، بایستی از یک قاب کالیبراسیون استفاده کرد و برای ساده‌سازی و عدم استفاده از ضرایب تصحیحی که گاهی خطاهایی را وارد سیستم می‌کنند، بهتر است این قاب در همان صفحه‌ی قرارگیرد که مارکر در آن نوسان می‌کند. به همین دلیل در این پژوهش مارکرهایی به ابعاد  $30 \times 40$  mm برای پیشانی و  $15 \times 20$  mm برای صفحه‌ی نوسان کننده طراحی شده‌اند که خود دارای قاب کالیبراسیون هستند، (شکل ۲ب). این مارکرها در واقع از یک زمینه‌ی سیاه با یک نقطه‌ی سفید به قطر  $0.5$  mm در مرکز آنها تشکیل شده‌اند و در حاشیه‌ی کناری آنها با زمینه‌ی سفید دو خط عمود بر هم با اندازه مشخص قرار گرفته‌اند که به‌عنوان قاب کالیبراسیون استفاده می‌شوند. به منظور حفظ دقت، مارکرها در نرم‌افزار اتوکد طراحی شده و با استفاده از یک چاپگر کالیبره شده با دقت  $120$  dpi بر روی کاغذهای برچسب به قطع A4 چاپ شده‌اند. با توجه به طراحی ویژه‌ی این مارکرها، تشخیص نقطه‌ی سفید از زمینه‌ی سیاه برای نرم‌افزار پردازش تصویر بسیار ساده است و امکان اشتباه کاهش می‌یابد و از همه مهم‌تر حساسیت روش به شرایط فضایی و نوری تا حد زیادی از بین رفته و نیازی به نورپردازی خاص نیست به طوری که تمامی آزمایش‌ها در نور طبیعی آزمایشگاه و در شرایط کاملاً عمومی انجام شده‌اند. از دیگر مزایای این مارکرها تهیه‌ی آسان و نصب سریع بر روی فرد آزمایش دهنده و عدم ایجاد مزاحمت در هنگام جداشدن است.

برای ایجاد نوسانات اجباری از یک نوسان‌ساز مکانیکی استفاده شده است (شکل ۱). این نوسان‌ساز یک صفحه‌ی فولادی افقی دارد که قابلیت تولید ارتعاشات هارمونیک یک بعدی در راستای قائم، با دامنه‌ی ثابت و با فرکانس متغیر را دارد به این ترتیب که با تغییر دور موتور نوسان‌ساز می‌توان فرکانس ارتعاش واداشته را تغییر داد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری ارتعاشات به روش تصویربرداری از دو دوربین دیجیتال سونی مدل EE۱۵-۳۳-DCR-TRU با فرکانس ۲۵fps استفاده شده است. یکی از این دوربین‌ها برای تصویربرداری از مارکر نصب شده روی پیشانی شخص آزمایش دهنده (شکل ۲الف) و دیگری برای تصویربرداری از مارکر نصب شده روی صفحه‌ی مرتعش به‌کار گرفته شده است. هر یک از دوربین‌ها در فاصله‌ی یک متری از مارکر قرار گرفته و با بزرگ‌نمایی  $350 \times$  از پنجره‌ی حدود دو برابر اندازه‌ی مارکر تصویربرداری می‌کنند. برای همزمان‌سازی دوربین‌ها از یک پروژکتور قوی استفاده شده است که با ایجاد نور زیادی در یک قاب، قاب شروع را در هنگام تحلیل قابل تشخیص می‌سازد. بعد از نصب دوربین‌ها و مارکرها در محل‌های مورد نظر، بدون هیچ واسطه‌ی (حتی کفش)، شخص روی صفحه مرتعش قرار می‌گیرد، ابتدا دوربین‌ها و سپس نوسانگر روشن شده و سپس عملیات تصویربرداری انجام شده است.



شکل ۱. دستگاه نوسان‌ساز.



شکل ۲. الف) دوربین در حال تصویربرداری از مارکر نصب شده بر روی پیشانی، ب) مارکر نصب شده بر روی پیشانی.

## روش پردازش تصویر

نرم افزار پردازش تصویر مورد استفاده در این پژوهش به کمک هسته پردازش تصویری +MPVI-NT-9,23 فایل های فیلم را به قاب های متوالی تقسیم کرده و سپس به کمک روش های پردازش تصویر، مارکر مورد نظر را شناسایی و ردیابی می کند.

نخستین مرحله در تشخیص مارکر تبدیل تصویر ۲۴bpp گرفته شده به یک تصویر دودویی (۱ bpp) است. این پردازش به کمک عملیات آستانه بندی دوکرانه ای انجام می شود که در رابطه ۱ بیان شده است.

$$f_{\theta, \rho}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \theta - \rho \\ 1 & \theta - \rho < x < \theta + \rho \\ 0 & x \geq \theta + \rho \end{cases} \quad \begin{matrix} \theta : \text{Center} \\ \rho : \text{Threshold} \end{matrix} \quad (1)$$

الگوریتم مورد استفاده، مارکر را بر مبنای ریخت شناسی آماری تشخیص می دهد. طرح اولیه الگوریتم به این ترتیب است که در مرور تصویر، با رسیدن به یک نقطه سفید رنگ، به کمک یک الگوریتم Fill Flood [۷] تمام ناحیه ای که این نقطه در آن قرار دارد، تعیین شده و پس از محاسبات آماری از تصویر حذف می شود. این محاسبه آماری که به صورت بازگشتی رشد می کند، حاوی سلسله عملیات بیان شده در رابطه ۲ با مقدار اولیه صفر در پارامترها  $(S_x = S_y = S_{x^2} = S_{y^2} = S = 0)$  است.

$$\begin{aligned} & \text{void Fff}(I, p, S_x, S_y, S_{x^2}, S_{y^2}, S) \\ & \text{if } P \notin \{\text{Whites}\} \text{ then exit;} \\ & S_x + = p.x.S_y + = p.y.S_{x^2} + = (p.x)^2; \\ & S_{y^2} + = (p.y)^2; S + +; \\ & \{\text{Black}\} = \{\text{Black}\} \cup \{P\}; \\ & \text{Fff}(I, P + i, S_x, S_y, S_{x^2}, S_{y^2}, S); \\ & \text{Fff}(I, P - i, S_x, S_y, S_{x^2}, S_{y^2}, S); \\ & \text{Fff}(I, P + \vec{j}, S_x, S_y, S_{x^2}, S_{y^2}, S); \\ & \text{Fff}(I, P - \vec{j}, S_x, S_y, S_{x^2}, S_{y^2}, S); \end{aligned} \quad (2)$$

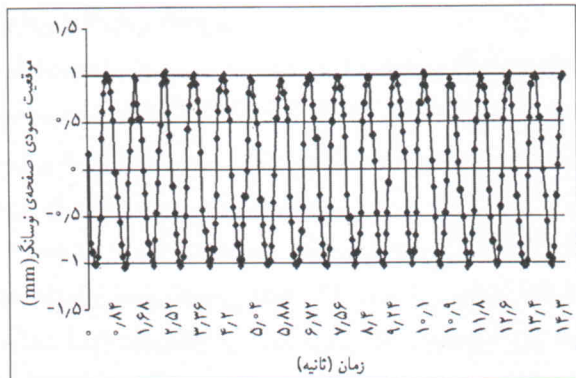
با پایان سلسله روال بازگشتی Fff، ناحیه ای مورد جست و جو به وسیله پارامترهای  $S_{y^2}, S_{x^2}, S_y, S_x, S$  به صورت آماری تعریف می شود. سپس با استفاده از رابطه ۳ پارامترهای  $A, \mu_x, \mu_y, \gamma_x, \gamma_y$  محاسبه شده و ریخت و مکان ناحیه ای مورد نظر را نشان می دهند، به این ترتیب که  $(\mu_x, \mu_y)$  مرکز مارکر و  $\lambda$  میزان مدور بودن آن را نشان

می دهد (حداقل مقدار  $\lambda$  برابر با ۱ برای دایره ای کامل است و میزان بزرگی  $\lambda$  عدم تقارن مرکزی شکل را نشان می دهد). به این ترتیب میزان مدور بودن مارکر را با اعمال شرط روی  $\lambda$   $(\lambda \leq 1 + \epsilon)$ ، و اندازه ی مارکر را با اعمال شرط روی یکی از دو پارامتر  $\sqrt{\frac{A}{\pi}}$  یا  $\gamma_x + \gamma_y$  می توان تعیین کرد، که به کمک آن نقاط ریز موجود در تصویر (نویز) و اشیاء بزرگ (محیط) حذف می شوند. برای حذف اشیاء محیط، می توان یک محدوده ای کاری نیز برای عملیات مرور تعیین کرد. به این ترتیب در صورت ارضاء شدن شرایط، الگوریتم وجود یک مارکر را در نقطه ای  $(\mu_x, \mu_y)$  گزارش می کند.

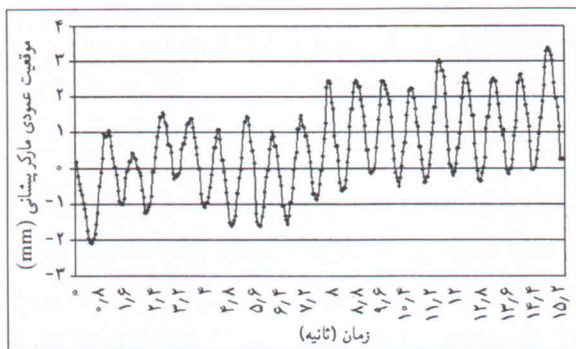
$$\begin{cases} A = S \\ \gamma_x = \sqrt{\frac{S_{x^2}}{S} - \frac{(S_x)^2}{S^2}}, \gamma_y = \sqrt{\frac{S_{y^2}}{S} - \frac{(S_y)^2}{S^2}} \\ \mu_x = \frac{S_x}{S}, \mu_y = \frac{S_y}{S} \\ \lambda = \frac{\pi(\gamma_x + \gamma_y)^2}{A} \\ 1 \leq \lambda < \infty \end{cases} \quad (3)$$

سرعت اجرا مسئله ای بسیار کلیدی در الگوریتم های پردازش تصویر است. با توجه به اینکه هر تصویر از حیث ورودی و خروجی، یک آرایه ای دوبعدی است، بنابراین، اولاً مرتبه ای اجرای یک الگوریتم روی تصویر، نسبت به ابعاد آن با توان دو افزایش می یابد، ثانیاً به دلیل نوع ذخیره ای اطلاعات، در پردازش هر نقطه یک ضرب و یک جمع اضافی به پردازنده تحمیل می شود، زیرا اطلاعات در حافظه در یک آرایه ای تک بعدی ذخیره می شوند (رابطه ۴). با توجه به این که بسیاری از الگوریتم های پردازش تصویر، از نوع نقطه ای بوده و یا با تعدادی الگوریتم نقطه ای می توان آنها را تخمین زد، [۸] ذخیره ای تصویر در یک آرایه ای تک بعدی امکانات خوبی برای انجام عملیات به صورت شار داده فراهم می کند. گذشته از بحث پردازش تصویر، ذخیره و بازیابی اطلاعات در این روش ساده تر بوده و با استانداردهای سیستم عامل ویندوز سازگارتر است.

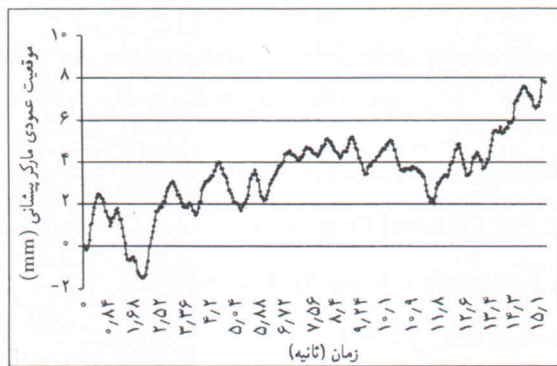
بنابراین با استفاده از خانواده ای توابع BitBlt یک تصویر (I) و یک شار داده (S) به کمک تابعی به نام Long به هم نقش می شوند (رابطه ۵). در عمل به کمک شیئی Tbitmap تصویر بار شده و اطلاعات به کمک روال Get Bitmap Bits از Tbitmap.Handle به یک اشاره گر (به عنوان پیاده سازی عملی شار داده) منتقل می شود، سپس پردازش مناسب روی تصویر انجام شده و فرایند معکوس به کمک روال Set Bitmap Bits با بازگرداندن اطلاعات از شار داده به Tbitmap اجرا می شود. سپس در این مرحله به کمک BitBlt تصویر پردازش شده (که نسخه ای از آن در Tbitmap.Handle وجود



شکل ۳. موقعیت عمودی صفحه‌ی نوسانگر بر حسب زمان.



شکل ۴. موقعیت عمودی مارکر پیشانی بر حسب زمان.



شکل ۵. موقعیت افقی مارکر پیشانی بر حسب زمان.

### ارزیابی روش

به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش تصویربرداری در ثبت ارتعاشات، این نتایج با نتایج حاصل از روش شتابسنجی مقایسه شده است، به این ترتیب که روی صفحه‌ی نوسانگر، علاوه بر مارکر، یک شتابسنج پیزوالکتریک نیز نصب شده است و نوسان تولید شده توسط نوسانگر، همزمان توسط هر دو روش تصویربرداری و شتابسنجی اندازه‌گیری شده است. اختلاف این دو روش در اندازه‌گیری فرکانس از مرتبه‌ی صدم هرتز و در اندازه‌گیری دامنه از مرتبه‌ی صدم میلی‌متر به‌دست آمده است.

داشته روی صفحه‌ی نمایش نشان داده می‌شود. انجام این عملیات به صورت شیء‌گرا موضوع اصلی کد نوشته شده است.

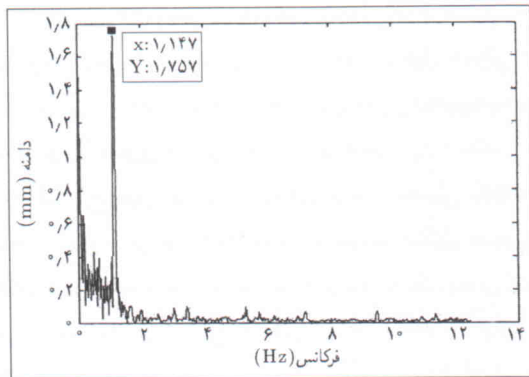
$$I[x, y] = ((y - 1)width + x - 1 + I[0, 0]) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{Long} : N^2 \rightarrow N \\ S \xleftrightarrow{\text{Long}} \backslash \\ \text{Long}(x, y) = (y - 1)width + x - 1 \end{cases} \quad (5)$$

نکته‌ی بسیار مهم در اجرای الگوریتم‌های پردازش تصویر، نیاز به دو نسخه‌ی موازی از تصویر برای جلوگیری از تداخل بازگشتی است. این امر در مدل پیاده‌سازی تصویر، به کمک کانال‌های دوگانه‌ی اطلاعات پیاده شده است.

با توجه به دو بعدی بودن تحلیل، و هم صفحه بودن قاب کالیبراسیون و صفحه‌ی که مارکر در آن حرکت می‌کند، و نیز با توجه به ثابت بودن فاصله‌ی این صفحه تا لنز دوربین و عدم تغییر بزرگ‌نمایی دوربین در هنگام تصویربرداری، رابطه‌ی کالیبراسیون تنها شامل یک تغییر مقیاس بود. در واقع کالیبراسیون روش به این ترتیب انجام شده است که در تصویر ضبط شده سه‌گوشه‌ی قاب کالیبراسیون چاپ شده بر روی مارکر انتخاب شده و مقادیر  $(0, 0, 0)$  و  $(7, 0, 0)$  و  $(0, 26, 0)$  که در واقع مقادیر واقعی اندازه‌ی قاب کالیبراسیون چاپ شده بر روی مارکر پیشانی‌اند، به آنها نسبت داده شده است و به این ترتیب طول هر پیکسل در راستاهای افقی و عمودی به‌دست آمده است. برای مارکر نصب شده روی صفحه‌ی نوسانگر نیز به همین ترتیب عمل شده است. این روش عملاً ساده‌سازی روش تبدیل خطی مستقیم (DLT) است.<sup>[۹]</sup>

پس از تشخیص و ردیابی مارکر توسط نرم‌افزار نوشته شده و بعد از عملیات کالیبراسیون، موقعیت مکانی مارکر در دو راستای  $x$  و  $y$  به صورت دوتایی‌های  $(t, x)$  و  $(t, y)$  برای هر مارکر استخراج می‌شود، به این ترتیب نمودار موقعیت مارکر پیشانی در دو راستای  $x$  و  $y$ ، و موقعیت مکانی صفحه‌ی نوسانگر در امتداد قائم بر حسب زمان قابل دسترسی است (شکل‌های ۳ تا ۵) بعد از دسترسی به موقعیت مکانی مارکرها بر حسب زمان عملیات تحلیل فرکانسی داده‌ها با استفاده از روش تبدیل فوری سریعی (FFT)<sup>[۱۰]</sup> در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته و فرکانس و دامنه‌ی نوسان اصلی از داده‌های هر مارکر استخراج شده است. از آنجا که در این پژوهش ارتعاشات واداشته در راستای قائم بوده، ارتعاشات فرد نیز در راستای قائم مورد تحلیل قرار گرفته است. مقادیر دامنه برحسب فرکانس برای داده‌های حاصل از مارکر صفحه‌ی نوسانگر و مارکر نصب شده بر روی پیشانی شخص را در شکل‌های ۶ و ۷ ملاحظه می‌کنید. در هر مورد قله‌ی نمودار نشان‌دهنده‌ی دامنه و فرکانس اصلی نوسان است.



شکل ۷. مقادیر دامنه بر حسب فرکانس‌های اندازه‌گیری شده از نوسان واداشته‌ی فرد (مارکر روی پیشانی).

واداشته‌ی فرد ایستاده روی صفحه‌ی نوسان‌گر نیز در راستای قائم و از روی مارکر نصب شده روی پیشانی وی اندازه‌گیری شده و در شکل ۴ ارائه شده است. دامنه‌ی این ارتعاش  $1.7\text{mm}$  و فرکانس آن  $1.7\text{Hz}$  به دست آمده است (شکل ۷).

### بحث

فرکانس ارتعاش صفحه‌ی نوسان‌گر و فرکانس اندازه‌گیری شده از پیشانی شخص هر دو برابر  $1.7\text{Hz}$  به دست آمده‌اند و این حاکی از صحت روش است. ضریب انتقال بدن فرد از کف پا تا پیشانی با تعریف نسبت دامنه‌ی ارتعاش پیشانی به دامنه‌ی ارتعاش صفحه‌ی لرزاننده نیز با تقسیم دامنه‌های استخراج شده قابل محاسبه است و در فرکانس  $1.7\text{Hz}$  معادل  $1.9$  استخراج شده است.

در ارتباط با فرایندهای پردازش تصویر الگوریتم‌های مختلفی برای تشخیص مارکر در ادبیات علمی وجود دارند [۱۱ و ۱۲]، این الگوریتم‌ها از حیث حساسیت به نویز، محدودیت‌های ایجاد کننده برای محیط آزمایش و سرعت با یکدیگر متفاوت‌اند. تعدادی از این الگوریتم‌ها که از روش‌هایی چون افکنش در راستاهای مختلف، مرکز ثقل‌یابی و جست‌وجوی سطح استفاده می‌کنند، پیاده‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفتند. این الگوریتم‌ها ضعف‌هایی در تشخیص مارکر تغییر شکل یافته داشتند. بنابراین الگوریتم جدیدی بر مبنای ریخت‌شناسی تدوین شد.

نکته‌ی قوت الگوریتم تشخیص مارکر استفاده شده، عدم نیاز آن به نسخه‌ی دوم تصویر و لیست نقاط ناحیه است، زیرا پارامترها در حین رشد ناحیه محاسبه می‌شوند. این الگوریتم تشخیص مارکر، نیازمند دو پارامتر  $\rho, \theta$  بوده و به این ترتیب الگوریتم در گستره‌ی بازی از شرایط فیزیکی قابل استفاده است. چنین الگوریتمی برای دوربین‌های حرفه‌ی کافی است. اما با توجه به هزینه‌ی بالای این دوربین‌ها و تمایل کاربران به

### دقت روش

دقت روش در اندازه‌گیری دامنه بستگی به بزرگ‌نمایی، و نیز فاصله‌ی دوربین تا مارکر دارد. با توجه به اینکه در نهایت مختصات پیکسل مرکزی محدوده‌ی که به‌عنوان مارکر تشخیص داده شده به‌عنوان مختصات مارکر استخراج شده است، دقت روش وابسته به آن است که هر پیکسل از تصویر معادل چه مقدار از طول است (این موضوع در هنگام کالیبراسیون مشخص شده است). در این پژوهش با توجه به بزرگ‌نمایی دوربین  $(\times 35)$ ،  $50^\circ$  پیکسل از تصویر در راستای عمودی، معادل  $26\text{mm}$  طول قاب کالیبراسیون بوده است و بنابراین دقت روش در راستای عمودی  $0.5\text{mm}$  است.

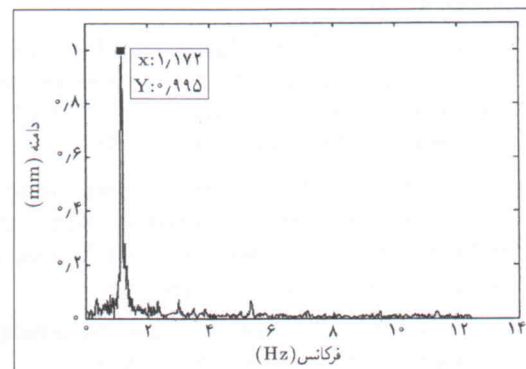
دقت این روش در اندازه‌گیری فرکانس به دو عامل اصلی بستگی دارد، یکی فرکانس داده‌برداری دوربین و دیگری فرکانس نوسان جسم مرتعش. به طوری که با افزایش فرکانس داده‌برداری دوربین و کاهش فرکانس نوسان جسم مرتعش (مورد اندازه‌گیری) دقت روش در اندازه‌گیری فرکانس افزایش می‌یابد. در این پژوهش با توجه به استفاده از دوربین با فرکانس داده‌برداری  $25\text{Hz}$ ، دقت روش در تشخیص دوره‌ی تناوب  $0.4^\circ$  ثانیه است، به این ترتیب دقت روش در اندازه‌گیری فرکانس  $f$  از رابطه‌ی ۶ قابل محاسبه است:

$$a = \pm \frac{0.4f^2}{1 + 0.4f} \quad (6)$$

به طور مثال، دقت روش در اندازه‌گیری فرکانس  $1.7\text{Hz}$  با استفاده از دوربین  $25\text{Hz}$ ، حدود  $\pm 0.5\text{Hz}$  است.

### نتایج

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ارتعاشات صفحه نوسان‌گر در یک دور ثابت در شکل ۳ ملاحظه می‌شود. دامنه‌ی این ارتعاش  $0.9\text{mm}$  و فرکانس آن  $1.7\text{Hz}$  استخراج شده است (شکل ۶). به طور همزمان ارتعاشات



شکل ۶. مقادیر دامنه بر حسب فرکانس‌های اندازه‌گیری شده از صفحه‌ی نوسان‌گر در دور ثابت (مارکر روی صفحه‌ی نوسان‌گر).

است. به این ترتیب سرعت بالای این الگوریتم آن را برای استفاده‌های زمان حقیقی نیز مفید ساخته است.

در مقایسه‌ی این سیستم با روش شتاب‌سنجی باید گفت حساسیت این سیستم به نویز بسیار کم‌تر از روش شتاب‌سنجی بوده و در مراکز تحقیقاتی که از دوربین‌هایی با فرکانس داده‌برداری بالا برای تحلیل حرکت انسان استفاده می‌کنند، استفاده از روش تصویربرداری برای اندازه‌گیری ارتعاشات بسیار مقرون به صرفه است. علاوه بر این از آنجا که در این روش اندازه‌گیری بدون هیچ اتصال و ارتباطی با شیء مورد نظر انجام می‌شود و هیچ جرم اضافی به سیستم تحمیل نمی‌شود، خطای ساختاری بسیار کمتر است و در بسیاری از کاربردهایی که در آنها ارتباط با شیء مورد نظر امکان پذیر نیست قابل استفاده است. به‌طور مثال در اندازه‌گیری ارتعاشات مدل نصب شده بر روی میز زلزله، در لحظه‌ی تخریب چنانچه از حسگرهای شتاب‌سنجی استفاده شود، حسگرها تخریب شده و غیر قابل استفاده می‌شوند، این در حالی است که با نصب مارکر در محل‌های مورد نظر می‌توان با استفاده از روش تصویربرداری ارتعاشات را تا آخرین لحظه ثبت کرد. سیستم طراحی شده تقریباً هیچ سخت‌افزار تخصصی‌یی را طلب نمی‌کند ولی بر نرم‌افزار قوی‌تری متکی است.

برنامه‌ی آینده‌ی پروژه‌ی توسعه‌ی کاربردهای روش تصویربرداری در اندازه‌گیری ارتعاشات و تلاش برای تبدیل سیستم به یک سیستم با قابلیت‌های تجاری است.

استفاده از دوربین‌های معمولی، برای حل مشکلاتی که در تصویربرداری با این نوع دوربین‌ها به وجود می‌آید، در الگوریتم فوق تغییراتی داده شده است. این مشکلات شامل سرعت پایین شاتر و درهم‌پیچیده بودن (مشبک بودن) تصویر خروجی دوربین‌های فیلم‌برداری است.

به دلیل نرخ پایین تصویربرداری دوربین‌های معمولی (۲۵ fps) و سرعت پایین شاتر آنها، عملاً تصویر به صورت انتگرال تصاویر در بازه‌های زمانی است و مارکر در فرکانس‌های بالا، به یک بیضی کشیده تبدیل می‌شود که این موضوع غیرقابل اجتناب است<sup>[۱۳]</sup>. برای حل مشکل ناشی از درهم‌پیچیده بودن تصاویر<sup>[۱۴]</sup>، دو راه حل گزارش شده است نخست استفاده از سخت‌افزار واسطه‌ی مناسب<sup>[۱۵]</sup> و دوم تغییر در الگوریتم<sup>[۱۶]</sup>. برای ساده‌سازی و امکان استفاده‌ی عام از سیستم، در این پژوهش راه حل دوم انتخاب شد که بر پیچیدگی نرم‌افزاری تکیه دارد. الگوریتم به‌گونه‌ی تغییر داده شده که تصویر را پیش از جست‌وجو برای مارکرها در فضای فرکانسی فیلتر کند. راه حل دیگر رفع درهم‌پیچیدگی تصویر بود که از ابعاد تصویر کاسته و تعداد تصویر در زمان را افزایش می‌دهد. این راه حل در این نوشتار مورد استفاده قرار نگرفته است.

روش پیاده‌سازی سیستم پردازش تصویر، با توجه به ساختار رویدادگری سیستم عامل ویندوز، به دلیل دور زدن صف پیام و ایجاد حداقل رویدادها بسیار با اهمیت است و بهینه‌سازی انجام شده در مدل تصویر و مدل الگوریتم منجر به افزایش قابل توجه سرعت شده

## منابع

- Mingjun Xie, and Zhiyu Hong, et al., "Vibration analysis of escalators in the view of human comfort", *Survey of Vibration 1-15 (1984)*. and *Noise*, 4, pp.
- Donati, P. M. and Bonthoux, C., "Biodynamic response of the human body in the seated posture when subjected to vertical vibration", *J. of Soune and Vibration*, 90 (3) (1983).
- Amirouche, F. M. L., "Biodynamic analysis of the human body subjected to vibration", *IEEE Engineering in Medicine and Biology 22-26 (Sept. 1987)*. Magazine, pp.
- Newland, D.E. *Mechanical Vibration Analysis and Computation*, Wiley. NI. (1989).
- ISO 2631-1978 (E) Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration.
- Hoviat Talab, M., Narimani, R., and Amiri, F., "General purpose human body vibration measurement system" *Proceedings of 5th int. Mech. Eng. Conf., ISME* (2001).
- Wu, A., Bidlack, C., Katkere, A., Fegue, R., and Weymouth, T., "Vision based object pose estimation for mobile robots," 59-67 (2002). *Proceedings of Darpa Image Understanding Workshop*, pp.
- Feyrer, S., Zell, A., "Detection tracking and pursuit of humans with an autonomous mobile robot", *6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-6)*, Venice, 710-715 (2002). Italy, pp.
- Abdel-Aziz, Y.I., Karara, H. M., "Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry", *Proceedings of the Sympto*

- sium on Closed-Range Photogrammetry, 1-18 (1971). American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA., pp.*
10. Kubo, M., Terauchi, F., Aoki, H., Matsuoka, Y., "An investigation into a synthetic vibration model for humans: An investigation into a mechanical vibration human model constructed according to the relations between the physical, psychological and physiological reactions of humans exposed to vibration", *International Journal of Industrial Ergonomics* **27** pp. 219-232 (2001).
  11. Fischolz, R. W., Spinnler, K.P., "Class of algorithms for real-time sub pixel registration," *IEEE Trans. Computers*, **21**, pp. 179-186 (2002).
  12. Kato, H., Billinghurst, M., "Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system", *IEEE Virtual Reality Conference* **12**, Issue 1, pp. 18-26 (2002).
  13. Wang, Y. F., Liang, P., "3D Shape and motion analysis from image blur and smear: unified approach", *Proceedings of The Eleventh ACM International Conference on Multimedia*, pp. 528-538 (2003).
  14. Guillotel, P., Pigeon, S., "Progressive versus interlaced coding," Technical Report, Y2/M6, Universite Catholique de Louvain (2001).
  15. Skarabot, A., Ramponi, G., Buriola, L., "FPGA architecture for a video wall image processor", *Symposium of Electronic Imaging, San Jose, California* (2001).
  16. Kovacevic, J., Safranek, R. J., Yeh, E. M., "Deinterlacing by successive approximation", *IEEE Transaction on Image Processing*, **6**, Issue 2, pp. 339-344 (1997).

