بررسی اثر سقوط و ضربه، بر بسته‌بندی دستگاه‌های الکترونیکی در هنگام حمل و نقل

محسن شعبانیان [۱*]، فاطمه بهشتی [۲]

تاریخ دریافت مقاله: اسفند ماه ۱۳۹۵

تاریخ پذیرش مقاله: مرداد ماه ۱۳۹۵

چکیده

دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل همواره در معرض ضربات ناشی از سقوط قرار دارند. به همین دلیل، بسته‌بندی محصول و در نتیجه میزان مقاومت در مقابل ضربه یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در طراحی قطعات و دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل و همچنین بسته‌بندی آن‌ها می‌باشد. بنابراین سازندگان قطعات، آزمون های آزمایشگاهی و مدل‌های شبیه‌سازی مختلفی را جهت انتخاب بهترین روش مونتاژ و بسته‌بندی قطعات و دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل و همچنین بررسی اثرات سقوط و ضربه بر روی آن‌ها انجام می‌دهند. به علت اندازه‌های کوچک این نوع از محصولات الکترونیکی، انجام آزمون‌های آزمایشگاهی سقوط، جهت بررسی فرآیندهای شکست و رفتار این نوع محصولات در مقابل ضربات به تنهایی مشکل و زمان‌بر بوده و هزینه‌های زیادی را تحمیل می‌کنند. بنابراین محققان از هر دو روش آزمون‌های تجربی و مدل‌های شبیه‌سازی برای بررسی اثرات ضربه و سقوط بر روی آن‌ها استفاده می‌کنند. تحقیق حاضر، مروری بر روش‌های آزمایش تجربی، مدل‌های شبیه‌سازی و تأثیرات آن‌ها بر بسته‌بندی و طراحی و جانمایی قطعات الکترونیکی است. همچنین استانداردهای موجود در این زمینه و روش‌های استاندارد برای آزمون سقوط معرفی شده و مختصراً شرح داده شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

دستگاه‌های الکترونیکی، سقوط، ضربه، بسته‌بندی

۱- مقدمه

امروزه دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل مانند گوشی‌های تلفن همراه، رایانه‌های جیبی، دستگاه‌های PDA[3]، دوربین‌های دیجیتال، رایانه‌های کیفی و ... کاربردهای گسترده‌ای در زندگی روزمره ما داشته و سهم قابل توجّهی را در بازار دنیا به خود اختصاص داده‌اند. از طرفی نیز کوچک‌سازی اجزاء و قطعات دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل یکی از عناصر کلیدی در فن‌آوری امروز در دنیای الکترونیک می‌باشد. امروزه کاربری‌های پیچده‌تر به همراه محدودیت در حجم و وزن کمتر و

۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه سلمان فارسی کازرون.

(* نویسنده مسئول: shabanian@kazerunsfu.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک، بخش مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه سلمان فارسی کازرون (f.beheshti70@gmail.com).

3- Personal Digital Assistant

بسته‌بندی کوچک‌تر، مقاوم‌تر و مؤثرتر، عوامل محرک برای کوچک‌سازی اجزاء در محصولات الکترونیکی می‌باشند؛ اما این عوامل، مشکلاتی را در طراحی و فرآیند تولید به وجود می‌آورند. طراحان محصولات الکترونیکی دائماً با چالش کوچک‌تر کردن حجم بسته‌بندی قطعات مواجه هستند تا قابلیت تحرک بیشتری به آن‌ها بدهند که این خود موجب بیشتر شدن خطر سقوط‌های ناگهانی برای دستگاه‌ها می‌شود.

امروزه دستگاه‌های الکترونیکی مدرن، چگال‌تر شده و فضاهای بسیار کمتری بین اجزای داخلی آن‌ها وجود دارد. قیمت تمام شده محصول معمولاً بسیار بالا و در نتیجه اثرات معیوب شدن محصول در اثر بسته‌بندی نامناسب و شکست‌های ناشی از سقوط به عنوان یکی از عوامل غالب در آسیب و بروز نقص فنی در دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل بسیار زیان بار خواهد بود [۱، ۲، ۳ و ٤]. این خود چالشی بزرگ بر سر راه بی‌نقص بودن محصولات است در حالی که توقعات مشتریان برای قابلیت اطمینان محصولات هنگام وارد شدن ضربه یا سقوط، در حال افزایش است.

امروزه مسآله بسته‌بندی و طراحی و مونتاژ محصولات الکترونیکی دو موضوع در هم تنیده می‌باشند و سازندگان تجهیزات جانمایی و طراحی فیزیکی محصول را با در نظر گرفتن موضوع بسته‌بندی نهایی، زیبایی ظاهری و حفاظت مؤثر در هنگام ضربه و سقوط انجام می‌دهند.

علاوه بر دستگاه‌های قابل حمل، حتّی قطعات مجتمع میکروالکترونیک نیز در معرض فشار ناشی از ضربه قرار دارند. فشار ناشی از ضربه به وسیله شدّت بالا و زمان کوتاه ضربه که توسط برخورد ایجاد می‌شود، مشخص می‌شود. این عوامل موجب تنش شدید در اتصالات داخلی و بردهای مداری می‌شوند، که این امر موجب خرابی قطعات میکروالکترونیکی می‌شود. کوچک‌سازی‌ها نیز موجب آسیب‌پذیری بیشتر قطعات میکروالکترونیکی نسبت به اثرات ضربه شده است. برای مثال فشار ضربه ناشی از سقوط قطعات، یکی از مهم‌ترین عوامل شکست و خرابی قطعات قابل حمل می‌باشد [٥ ، ٦ و ٧] از این رو، نقش جانمایی قطعات و بسته‌بندی آن‌ها نقش اساسی خواهد داشت.

در کنار رفتار خود قطعات، بسته‌بندی قطعات نیز نقش بسیار مهمی در جلوگیری از آسیب دیدن در حین انتقال و جابه‌جایی دارند. جهت اطمینان از کیفیت محصولات، روش رایج، انجام آزمایشات فیزیکی بر روی یک نمونه از محصول می‌باشد. همچنین درک نمودن اثرات ضربه وارد شده در هنگام سقوط مشکل است، خصوصاً پاسخ درونی دستگاه‌های الکترونیکی به ضربه وارد شده، چون این پدیده در زمان بسیار کوتاهی اثر می‌گذارد. زمانی که شکست یا تخریب اتفاق افتاد، مهندسان تنها می‌توانند بر اساس میزان تخریب نهایی تحلیل کنند و سپس طراحی خود را بهتر نمایند. روش‌های معمول برای اصلاح و بهینه کردن طراحی شامل افزایش استحکام محصولات و یا بهتر کردن قابلیت جذب ضربه در بسته‌بندی محصولات می‌باشد. بعضی محققان اثر نوع بسته‌بندی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱ و۸ و ۹].

همزمان با پیشرفت سریع سخت افزارها و نرم افزارهای رایانه‌ای، آزمون‌های مجازی بر پایه شبیه‌سازی می‌توانند به عنوان جایگزینی برای آزمون‌های فیزیکی که معمولاً زمان‌بر و پرهزینه هستند، باشند. همچنین می‌توان همزمان با مراحل طراحی، جهت درک بهتر از مکانیسم‌های شکست این آزمون‌های مجازی را انجام داد. محققان روش المان محدود (FEM) را برای شبیه‌سازی آزمون سقوط برای دستگاه‌ها و قطعات الکترونیکی مختلف مانند تلویزیون، تخته مدارها و قسمت اصلی دستگاه پخش‌کننده سی دی به کار گرفته‌اند [۳، ۱۰، ۱۱ و ۱۲]. تعدادی از محققان حتّی اثر نوع مواد مورد استفاده در بسته‌بندی قطعات را نیز در شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۳ و ١٤].

در تحقیق حاضر، استانداردهای موجود و روش‌های فیزیکی رایج برای ارزیابی میزان مقاومت دستگاه‌های الکترونیکی و بسته‌بندی آن‌ها در مقابل اثرات ضربه و سقوط بررسی و به طور اجمالی شرح داده شده‌اند. سپس تعدادی از تحقیقات انجام گرفته در خصوص بررسی

1- Finite Element Method

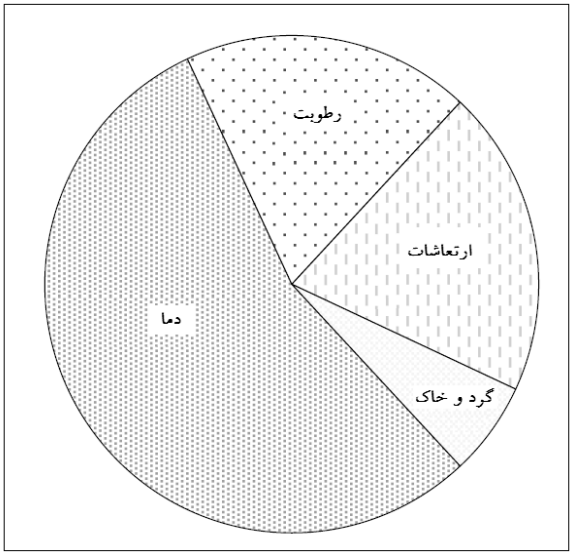
اثرات ضربه و سقوط بر روی نمونه‌های مختلف دستگاه‌های الکترونیکی و شرایط بسته‌بندی آن‌ها بررسی شده‌اند. در قسمت آخر نیز مدل‌های شبیه‌سازی مورد استفاده در طراحی قطعات، دستگاه‌ها و انتخاب بسته‌بندی آن‌ها و همچنین بررسی اثرات ضربه بر آن‌ها، بررسی شده و با روش‌های آزمون فیزیکی مقایسه و مزایا و کاربردهای هر کدام شرح داده شده‌اند.

۲- استانداردها و آزمایش‌ها

ضربات و تنش‌های دینامیکی موجب ایجاد سوء عملکرد در دستگاه‌ها و قطعات الکترونیکی می شوند. تحقیقات نشان می‌دهند که از بین عوامل مؤثر بر خرابی دستگاه‌های الکترونیکی مانند، ارتعاشات، دما، گرد و خاک و رطوبت، عامل ارتعاش و ضربه تقریبا یک چهارم از کل خرابی‌ها را شامل می‌شوند(شکل ۱) [۱۲].

در اوایل دهه ۹۰ میلادی که دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل در جوامع رواج پیدا کردند، قابلیت اطمینان در مقابل سقوط و ضربات وارد شده به عنوان یکی از سرفصل‌های مهم تحقیقات و توسعه مطرح شد. در آن زمان، تعدادی از شرکت‌ها و گروه‌های صنعتی، روش‌های مختلفی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان در مقابل سقوط برای اجزاء و بسته‌بندی‌های مختلف، توسعه دادند که بعدها برخی از آنان تبدیل به استاندارد شدند [۱۵].

به منظور ارزیابی کارایی محصولات الکترونیکی، محققان روش‌های آزمایشگاهی متنوعی را ارائه نموده‌اند. روش‌های مطالعه و ارزیابی اثر ضربه و نوع بسته‌بندی بر قطعات الکترونیکی را می‌توان در دو سطح بررسی نمود: (۱) سطح تخته مدار[1] و (۲) سطح محصول.[2] محققان در این زمینه روش‌ها و فنون مختلفی را برای ارزیابی میزان مقاومت قطعات الکترونیکی در مقابل سقوط ارائه نموده‌اند. در صنعت، آزمون سقوط یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی قابلیت اطمینان دستگاه‌های الکترونیکی قابل می‌گیرد تا مسآله جانمایی، مونتاژ و بسته‌بندی بررسی گردد. در این آزمون‌ها قطعه مورد نظر معمولاً از یک ارتفاع حمل در مقابل سقوط و همچنین میزان خسارت وارده به دستگاه در شرایط واقعی سقوط، می‌باشد.



شکل ۱- مکانیسم‌های خرابی رایج برای دستگاه‌های الکترونیکی [۱۲].

1- Board Level
2- Product Level

آزمون‌های سقوط در هر دو سطح تخته مدار و محصول انجام مشخص بر روی سطوحی با زوایای مختلف سقوط می‌کند. امروزه، استاندارد یا پروتکل مشخصی که نیازمندی‌های آزمون سقوط را برای دستگاه‌های الکترونیکی در سطح محصول ارائه کند، موجود نمی‌باشد. تولیدکنندگان محصولات الکترونیکی آزمون‌های مختلفی را ارزیابی محصولات تولیدی خودشان به کار می‌گیرند. به طور خلاصه، مزایای تحلیل آزمون سقوط در مسیر توسعه محصول را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- برای تعیین میزان شکنندگی مکانیکی و مقاومت محصول در مقابل ضربه.
- اطّلاعات به دست آمده از آزمون سقوط جهت بهبود بخشیدن به ماندگاری یک محصول و اطمینان از عملکرد آن در زمان استفاده به کار گرفته می‌شود.
- بالا بردن قدرت طراحی از طریق تحقیق و بررسی آثار و نتایج تغییرات انجام شده در طراحی بر کیفیت محصول.
- به عنوان روشی برای بالا بردن کیفیت محصول و اطمینان از اینکه محصول تولید شده از نظر ایمنی، کارایی و تعهدات ضمانت پس از فروش، رضایت مشتریان را جلب کند.
- جهت اطمینان از عملکرد صحیح بسته‌بندی جهت جلوگیری از خسارات ناشی از ضربه بر عملکرد دستگاه و افزایش آمار تجهیزات معیوب.

اولین روش استاندارد برای ارزیابی قابلیت اطمینان در مقابل سقوط بر پایه صفحه توسط شرکت JEDEC[1] در سال ۲۰۰۳ میلادی ارائه شد [۱۶و۱۵] و در زمان کمی مورد قبول مجامع صنعتی و علمی واقع شد. آزمون‌های سطح محصول برای قابلیت اطمینان در مقابل سقوط و ضربه بستگی زیادی به روش‌های آزمون آزمایشگاهی دارند. آزمون‌های سطح محصول عموماً دربرگیرنده محاسبه تعداد سقوط منجر به شکست و همچنین ارزیابی نوع شکست برای محصول می‌باشد. عواملی مانند ارتفاع سقوط، جرم محصول، زاویه ضربه و خواص سطحی که برخورد صورت می‌گیرد بر روی نیروها و شتابی که محصول در طول برخورد تجربه می‌کند، اثر می‌گذارند. تغییرات در طراحی شامل یک فرآیند تکرار پذیر برای بهبود مقاومت محصول در مقابل ضربه می‌شود [۱۷]. روش‌های آزمون برای قابلیت اطمینان در مقابل سقوط را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: ۱- سقوط محدود شده و۲- سقوط آزاد. روش آزمون JEDEC نمونه‌ای از آزمون محدود شده می‌باشد. استاندارد آزمون JEDEC اغلب برای ارزیابی و مقایسه اجزاء الکترونیکی اتصال سطحی برای محصولات الکترونیکی قابل حمل استفاده می‌شود [۱۶]. این یک آزمون در سطح-پایه می‌باشد.

آزمون‌های سطح- پایه با استفاده از تجهیزات گفته شده در استاندارد آزمون JEDEC بسیار راحت قابل انجام هستند. از طرف دیگر، آزمون سقوط سطح- پایه به علت زاویه ثابت ضربه قابلیت تکرارپذیری زیادی دارند؛اما آزمون افتان سطح- پایه، که آزمون محدود شده نیز هست، ممکن است نتواند رفتار دینامیکی طبیعی محصولات الکترونیکی را در حالت سقوط واقعی نشان دهد. به علت مزیت تکرارپذیر بودن آزمون سقوط سطح-پایه نسبت به آزمون محصول-پایه، تعداد زیادی از محققان و تحلیل گران آزمون‌های سطح- پایه را مورد بررسی قرار داده‌اند حال آنکه کارهای نسبتاً کمی در خصوص آزمون محصول- پایه صورت گرفته است [۱۸]. اگرچه آزمون سقوط محصول- پایه به علت وابستگی آزمایش به عوامل زیادی مانند ارتفاع سقوط، طراحی محصول و زاویه ضربه، آزمون پیچیده‌ای است؛ اما چون در این آزمون تخته مدار چاپی (PCB[2]) در معرض شرایط واقعی‌تری نسبت به آزمون صفحه- پایه قرار می‌گیرد. در طول آزمون سقوط آزاد امکان نصب سنسورها در هر نقطه دلخواه بر روی PCB به علت ابعاد فشرده آن امکان‌پذیر نیست. همچنین وزن سنسورها نیز به میزان چشمگیری بر پاسخ دینامیکی PCB اثر می‌گذارد، خصوصاً برای محصولات الکترونیکی

1- Joint Electron Device Engineering Council

2- Printed Circuit Board

سبک وزن مثل گوشی‌های تلفن همراه. کابل‌های کشش‌سنج و شتاب‌سنج‌ها نیز بدون شک بر روی جهت ضربه وارده اثرگذار خواهند بود که این امر منجر به بروز ناهماهنگی در نتایج آزمایش خواهد شد.

اما با گذشت زمان گوشی‌های تلفن همراه، تقویم‌های الکترونیکی و سایر دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل به رایانه‌های قابل حمل با ساختار و فن آوری‌های مدرن‌تر ارتقا پیدا کرده‌اند که شباهت کمتری به دستگاه‌های الکترونیکی رایج در سال‌های قبل دارند. برای مثال، به علت سطوح بالای مجتمع‌سازی، تعداد زیادی از اجزای الکتریکی مجزا از چیدمان صفحات الکترونیکی حذف شده‌اند و با بسته‌های کوچک‌تر؛ اما با یکپارچه‌سازی بیشتر جایگزین شده‌اند. علاوه بر این، سطوح بالای کوچک‌سازی و مجتمع‌سازی به همراه توسعه در فن‌آوری‌های صفحه نمایش، منجر به افزایش چشم‌گیری در نسبت سطح به ضخامت محصولات شده است و این روندی است که در آینده نیز ادامه خواهد یافت.

اولین گام‌ها برای به روز کردن استاندارد آزمون سقوط JESD22-B111 در سال ۲۰۱۱ میلادی جهت بهبودی بخشیدن به همبستگی بین شرایط صفحه-پایه و محصول-پایه صورت گرفت [۱۵]. برای به دست آوردن مقادیر عددی برای کار بازبینی شده، یک ارزیابی جدید از پاسخ مکانیکی دستگاه‌های قابل حمل مدرن مورد نیاز بود. برای این منظور، هشت گوشی تلفن همراه هوشمند تجاری از پنج برند متفاوت توسط دانشگاه آلتو برای ارزیابی پاسخ آن‌ها به ضربه انتخاب شدند. برای یافتن درک جامعی از پیچیدگی ضربه ناشی از سقوط و فهم بهتری از پاسخ اندازه‌گیری شده، شرکت نوکیا یک شبیه‌سازی چند سطحی برای یکی از دستگاه‌های مورد آزمایش انجام داد. این مدل محدوده‌ای از شرایط محصول-پایه تا توزیع تنش در شرایط سطح-پایه را شامل می‌شد. نتایج حاصل اهداف عددی را برای توسعه بیشتر روش‌های آزمون سقوط سطح- پایه فراهم نمود.

در کاربردهای مهندسی، به علت نبود راهبردهای طراحی، ضدضربه نمودن بسته‌بندی و محصولات از طریق فرآیندهای طراحی- شکست- طراحی دوباره به دست می‌آید. این بدین معنی است که آزمون‌های اطمینان تنها زمانی قابل انجام است که یک نمونه تولید شده باشد و آزمون بر روی آن انجام و اشکالات در سطح طراحی، مونتاژ و بسته‌بندی مشخص شود. سپس طراحی‌ها باید اصلاح شده و نقاط ضعف برطرف شوند. متعاقباً نمونه‌های جدید تولید شده و آزمون‌ها دوباره انجام می‌شوند تا در نهایت تمامی آزمون‌ها با موفقیت انجام شوند. بدیهی است که این چرخه اتلاف قابل توجّهی را برای زمان توسعه محصول و بسته‌بندی آن و هزینه محصولات مدرن به همراه خواهد داشت. به منظور اصلاح طراحی برای قابلیت اطمینان در مقابل سقوط، بجای طراحی بر پایه آزمون و خطا، طراحان باید در همان مراحل اولیه طراحی به قابلیت اطمینان در مقابل ضربه اهمیت دهند. بنابراین یک نیاز اساسی برای درک اینکه قطعات و اجزاء الکترونیکی چه پاسخی در مقابل تکان‌ها و فشار از خود نشان می‌دهند و اینکه قاب بسته‌بندی فیزیکی تجهیز و بسته‌بندی نهایی آن چگونه میزان و اثر ضربه را دفع می‌کند و همچنین اینکه کدام عوامل نقش تعیین‌کننده در کارایی محصول در مقابل تکان‌ها و ضربات را دارند، وجود دارد.

به طور کلی، سه روش شناخته شده برای آزمون سقوط در صنایع الکترونیک وجود دارد که عبارتند از: آزمون سقوط آزاد (سطح تخته مدار)، آزمون ضربان کنترل شده (سطح تخته مدار)، و آزمون سقوط آزاد (سطح محصول). رایج‌ترین آزمون برای دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل آزمون سقوط آزاد در سطح محصول می‌باشد. روش آزمون سقوط ضربانی کنترل شده عمدتاً برای تحلیل سقوط قطعات در سطح تخته مدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون‌ها به علت وابستگی به عوامل مختلف مانند ارتفاع سقوط، طراحی مداری محصول و طراحی

فیزیکی قاب بسته‌بندی محصول، و طراحی نهایی بسته‌بندی محصول و زاویه برخورد، آزمون‌های پیچیده‌ای بشمار می‌روند و همچنین می‌توانند در هر یک از مراحل طراحی گفته شده با تحلیل نتایج آزمون سبب ارتقا شرایط محصول و رفع ایرادات احتمالی آن گردند.

۲-۱- آزمون سقوط بر پایه سقوط آزاد

آزمون سقوط آزاد (سطح محصول)، بدترین حالتی را که کاربران می‌توانند تصادفاً وسیله الکترونیکی خود را بیاندازند را شبیه سازی می‌کند. نمونه مورد آزمایش در شرایطی که فقط نیروی جاذبه بر آن اثرگذار است سقوط می‌کند. در این روش ارتفاع سقوط نمونه براساس نیازهای طراحی می‌تواند تغییر کند. این فرآیند شامل تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی است زمانی که نمونه مورد آزمایش در آستانه برخورد با سطح قرار می‌گیرد؛ اما در عین حال به علت اینکه PCB در این آزمون در معرض شرایط واقعی‌تری نسبت به آزمون سقوط در سطح تخته مدار قرار می‌گیرد، دارای اهمیت زیادی است. یو[1]و همکاران در سال (۲۰۱۰) [۱۸] پاسخ دینامیکی PCB را در شرایط آزمون سقوط محصول پایه بررسی نموده و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج آمون فیزیکی مقایسه نموده‌اند.

۲-۲- آزمون سقوط بر پایه روش ضربان کنترل شده

همانطور که از نام این روش پیداست، در این روش، ضربان شتاب نمونه سقوط کرده کنترل می‌شود. جزئیات این روش آزمون در اسناد JEDEC برای روش آزمون سقوط سطح تخته مدار برای محصولات الکترونی قابل حمل موجود می‌باشد [۱۶]. یک صفحه فولادی که تخته مدار چاپی بر روی آن نصب شده و خود صفحه نیز بر روی صفحه افت[2]نصب می‌گردد. سپس کل این ساختار از ارتفاعی معین رها شده و بر روی یک سطح هدف سقوط می‌کند که منجر به وارد آمدن یک پالس ضربه با مدّت زمان معین به تخته مدار می‌شود. ارتفاع سقوط و سطح هدف می‌توانند برای وارد آمدن یک پالس مشخص تنظیم شوند. این روش آزمون توسط JEDEC برای تخته مدار چاپی پیشنهاد شده است. لوان و تی[3]در سال(۲۰۰۶) [۱۹]، و لین یه و همکاران در سال(۲۰۰۶) [۲۰] مطالعات جامعی را در بررسی نظری اثرات ضربه و سقوط بر روی دستگاه‌های الکترونیکی با روش ضربان کنترل شده انجام داده و این روش را به تفصیل تشریح نموده‌اند. روش پیشنهادی آزمون می‌تواند در سطوح مختلفی از محصول مدار چاپی تا بسته‌بندی فیزیکی قاب و همچنین بسته‌بندی نهایی آن انجام داد و نتایج آن را تحلیل نمود.

۲-۳- استانداردهای آزمون سقوط برای دستگاه‌های الکترونیکی

یکی از روش‌های تعیین مقاومت دستگاه‌های الکترونیکی انجام آزمون سقوط می‌باشد که در آن محصول باید بتواند در میزان شکستی که از قبل برای آن تعریف شده کارایی خود را حفظ کند. میزان انتظار از ماندگاری هر دستگاه الکترونیکی می‌تواند بسته به زمینه عملکرد و کاربرد دستگاه متفاوت باشد. برای مثال میزان انتظار از مقاوت دستگاه‌های الکترونیکی در کاربردهای نظامی و فضایی بالاتر از گوشی‌های تلفن همراه است؛ اما علی‌رغم مواردی که گفته شد، استاندارد مشخصی برای آزمون سقوط در سطح محصول موجود نمی‌باشد. این موضوع معمولاً به صلاحدید و نظر تولیدکنندگان واگذار شده و در برخی موارد حتّی می‌تواند محرمانه باشد. برای مثال ارتفاع سقوط برای گوشی‌های تلفن همراه می‌تواند بین سه تا چهار فوت باشد، یا سطحی را که دستگاه بر روی آن سقوط می‌کند می‌توان بتن، فرش و یا موارد دیگر انتخاب نمود [۲۱].

آزمون سقوط در سطح تخته مدار به علت طبیعت این نوع آزمون با قابلیت جهت‌دهی سقوط نمونه، تکرار

1- Yu
2- Drop Table
3- Luan and Tee

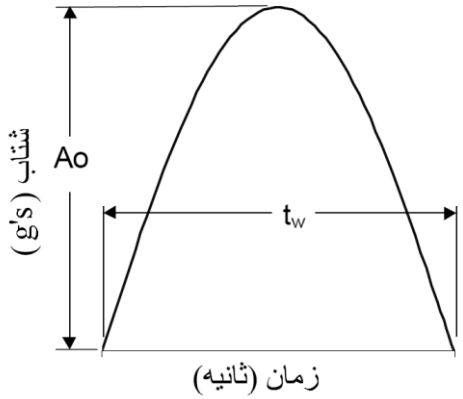
پذیری بالایی دارد؛ اما این آزمون نمی‌تواند دقیقاً متناظر با رفتار واقعی دستگاه در هنگام سقوط واقعی باشد، بنابراین آزمون‌های سطح محصول، به علت ارتباط ضعیف میان آزمون‌های سطح تخته مدار و سطح محصول، اجتناب ناپذیرند. JEDEC تلاش‌های گسترده‌ای به منظور ارائه روشی استاندارد برای آزمون سقوط در سطح تخته مدار برای دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل انجام داده است. نمونه مورد آزمایش در داخل چهارچوب پیش ساخته‌ای که دو میله در طول آن قرار دارند و به عنوان راهنمای مسیر سقوط عمل می‌کنند، سقوط کرده و به سطح سفت و محکمی برخورد می‌کند. این برخورد بین نمونه و سطح سفت، منجر به وارد آمدن یک پالس ضربه به نمونه می‌شود. جزئیات این روش آزمایش در استاندارد JEDEC به تفصیل آمده است [۲۲].

نمودار پالس ضربه پیشنهادی توسط JEDEC[1] در (شکل۲) نشان داده شده است [۱۶]. همانطور که مشاهده می‌کنیم نمودار پالس ضربه به شکل یک نیم- سینوس است که معادله آن به صورت معادله شماره ۱ می‌باشد. پالس ضربه‌ای که توسط شتاب سنج در آزمون سقوط به دست می‌آید باید مشابه شکل نیم- سینوس باشد.

$$A(t) = A_0 \sin\left(\frac{\pi t}{t_w}\right) \qquad \text{معادله } \mathbf{1}$$

در طول برخورد با سطح، قطعه مورد نظر ابتدا سرعت خود در جهت پایین را به صفر رسانده و سپس در جهت عکس، یعنی رو به بالا سرعت می‌گیرد (پرتاب شدن به سمت بالا پس از برخورد با سطح). در طول این فرآیند (که در مدّت زمان t_w اتفاق می‌افتد)، شتاب مورد نظر شکل می‌گیرد. چرا که طبق تعریف، شتاب همان تغییرات سرعت نسبت به زمان می‌باشد. نمودار پیشنهادی JEDEC با نتایج ارائه شده توسط محققان مطابقت دارد، برای مثال، لوان و همکاران [۲] اثرات تغییر ارتفاع سقوط را بر شتاب برخورد بررسی نموده که نتایج ارائه شده توسط آن‌ها با نمودار پیشنهادی JEDEC مطابقت دارد(شکل ۳).

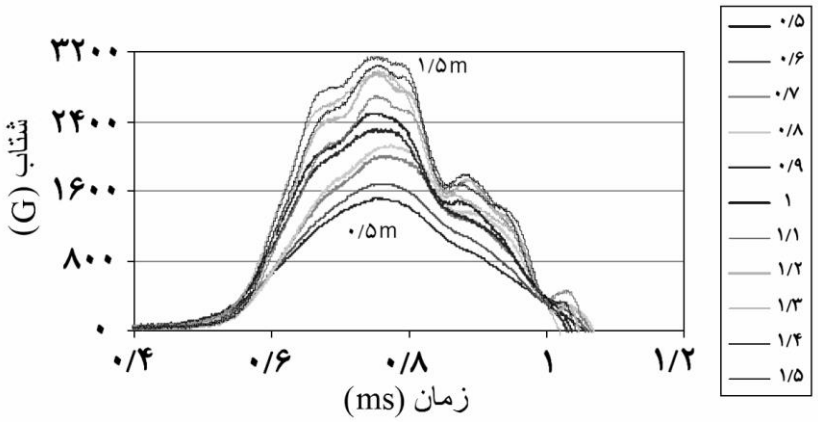
برای آزمون در سطح محصول، گویال و بوراتینسکی[2] در سال(۲۰۰۰) [۲۳] اولین مطالعه را بر روی روش آزمون انجام دادند و نشان دادند که روش‌های معمول برای آزمون سقوط محصولات قابل حمل، هم آزمون محدود شده و هم آزمون آزاد، به صورت ذاتی دارای اشکالاتی هستند. آزمون محدود شده قابلیت تکرار زیادی دارند؛ اما نمی‌توانند شرایط سقوط واقعی را تقلید کنند.



شکل ۲- پالس ضربه نیم- سینوس آزمون سقوط

1- Joint Electron Device Engineering Council

2- Buratynski



شکل ۳- پالس برخورد برحسب ارتفاع سقوط، ارائه شده توسط لوان و همکاران [۲].

آزمون سقوط آزاد به حالت حقیقی نزدیک‌تر است؛ اما قابلیت تکرار کمتری دارد چون کنترل کردن جهت فشار و ضربه وارده کار مشکلی است. به منظور انجام آزمون‌های سقوط قطعات، آن‌ها روش آزمونی را پیشنهاد کردند که در آن یک نمونه در بالای یک میز آزمون هدایت شونده با زاویه دلخواه آویزان شده، سپس قطعه رها می‌شود تا آزادانه حرکت کند.

شیم و لیم[1] در سال(۲۰۰۰) [۲٤] یک دستگاه آزمایش اثر سقوط را ثبت کردند که از یک جفت نگه‌دارنده نصب شده بر روی یک بلوک متحرک تشکیل شده که می‌تواند تا ارتفاع دلخواه برای سقوط بالا رفته رها شود تا آزادانه سقوط کند. سپس، بلافاصله قبل از برخورد، محصول با جهت‌دهی دلخواه از نگه دارنده‌ها جدا می‌شود. محققان زیادی بر روی آزمون‌های سقوط در سطح محصول برای قطعات الکترونیکی قابل حمل تحقیق نموده‌اند. سیه[2] و همکاران در سال(۲۰۰۲) [۲۵] و لیم و همکاران در سال(۲۰۰۲ و ۲۰۰۳) [۲٦ و ۲۷] آزمون‌های جامعی را برای بررسی پاسخ ضربه سقوط برای مدل‌های مختلف دستگاه‌های PDA[3] و گوشی‌های تلفن همراه انجام داده‌اند. نیروی ضربه، کشش‌ها و شتاب القا شده به تخته مدار چاپی اندازه‌گیری و در زوایای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده، اطّلاعات مهمی را در مورد کشش‌ها و نیروهای ضربه در طول سقوط ارائه می‌دهند.

ژو[4] و همکاران در سال(۲۰۰۸) [۲۸] یک دستگاه آزمون سقوط را برای انجام آزمون‌های سقوط به صورت تکرارپذیر و با جهت‌دهی دلخواه طراحی کردند. در این سامانه، ضربه توسط یک آونگ که قطعه مورد نظر در انتهای آن قرار دارد اینجاد می‌شود، به این صورت که آونگ تا زاویه دلخواه بالا برده شده سپس رها می‌شود و سپس قطعه مورد نظر در انتهای آونگ به یک میله هاپکینسون[5](۲۰۰۸) برخورد نموده و نیروی ضربه اندزه‌گیری می‌شود.

قابلیت اطمینان و پاسخ مکانیکی محصولات تجاری در مقابل فشار ناشی از ضربه نسبتاً مورد علاقه مجامع علمی نبوده و بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه به صورت داخلی در شرکت‌های مربوطه صورت پذیرفته است؛ اما تعداد کمی محققان در این مورد تحقیقاتی انجام داده‌اند. لیم و همکاران در سال(۲۰۰۳) [۲۷] اثر ضربه بر محصولات الکترونیکی قابل حمل مختلف را در زوایای ضربه متفاوت بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که زوایای برخورد عمودی و افقی در مقایسه با هر زاویه برخورد دیگر، باعث وارد آمدن نیروی ضربه بزرگ‌تر به صفحه

1- Shim and Lim
2- Seah
3- Personal Digital Assistant
4- Zhou
5- Hopkinson Bar

نگه‌دارنده اجزاء در داخل محفظه محصول می‌شوند. این امر به این دلیل است که زمانی که یک قطعه بر روی یکی از گوشه‌ها سقوط می‌کند، تمامی انرژی جنبشی ناشی از ضربه در همان لحظه انتقال نیافته، بلکه قطعه به حرکت خود ادامه می‌دهد و ضربات متعاقباً به آن وارد می‌شوند.

به عبارت دیگر، در این موارد، انرژی جنبشی کل به چند ضربه دیگر تقسیم می‌شود. همچنین ضربه‌های در جهت عمودی، نیروی ضربه بیشتری را موجب می‌شوند؛ اما ضربه‌های در جهت افقی(ضربه روی صفحه نمایش یا پشت دستگاه) تنش‌های درونی بیشتری را بر اتصالات درونی وارد می‌کنند. تن[1] و همکاران در سال (۲۰۰۵) [۲۹] نیز در همین راستا تحقیق مشابهی را برای چند مدل تجاری رایج گوشی‌های تلفن همراه انجام داده‌اند.

۳- شبیه‌سازی فرآیند سقوط

ارزیابی پاسخ یک دستگاه الکترونیکی و بسته‌بندی آن به فشار ناشی از ضربه شامل: ترکیبی از آزمون‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های حاصل از شبیه‌سازی می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها مزایای آشکاری بر روش‌های آزمایشگاهی دارند، از جمله: تکرار پذیر بودن، فراهم نمودن اطّلاعاتی مثل میزان فشار، تنش‌ها، شتاب و ...، در هر نقطه و هر زمان در طول تحلیل فرآیند. شبیه‌سازی را می‌توان با کم‌ترین هزینه و در هر مرحله از طراحی انجام داد. محققان از روش تحلیل المان محدود برای شبیه‌سازی اثرات سقوط بر روی محدوده وسیعی از محصولات و دستگاه‌های الکترونیکی استفاده نموده‌اند [۱۰ و۳۰]. برخی محققان نوع مواد بسه‌بندی را نیز در شبیه‌سازی آزمون‌های سقوط بررسی کرده‌اند [۱۱ و ۳۱].

محققان در راستای درک مکانیسم شکست حاصل از فشار، نتایج حاصل از آزمون‌های فیزیکی را با نتایج شبیه‌سازی المان محدود همبسته کرده اند. آزمون‌های فیزیکی هنوز هم رایج هستند؛ اما روش تحلیل المان محدود نیز اطّلاعات با ارزشی را در اختیار می‌گذارد. با تحلیل المان محدود، استخراج نتایج در هر زمان و در هر نقطه از ساختار در طول فرآیند سقوط امکان‌پذیر می‌شود. همچنین می‌توان در طول فرآیند سقوط ساختار قطعه را از درون نیز بررسی کرد که این امر در آزمون‌های فیزیکی امکان‌پذیر نیست. همچنین تحلیل المان محدود اطّلاعات ارزشمندی در مورد برهمکنش اجزاء در طول فرآیند سقوط و اینکه چه تغییراتی در طراحی می‌تواند به غلبه بر این برهمکنش‌ها کمک کند، در اختیار می گذارند [۳۲].

بعد از گذشت بیش از چهار دهه از توسعه روش‌های المان محدود و همچنین با کمک رایانه‌های سرعت بالا، امروزه شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای بر پایه روش المان محدود به طور گسترده و با موفقیت مورد قبول واقع شده است. یک شبیه‌سازی رایانه‌ای برای تحلیل هر مرحله از طراحی به صورت کارا و مؤثر استفاده می‌شود. شبیه‌سازی می‌تواند اطّلاعات مکانیکی کاملی را در هر موقعیتی برای یک موضوع خاص ارائه دهد. برای به دست آورن پیش‌بینی‌های قابل اعتماد در شبیه‌سازی رایانه‌ای انتخاب مدل صحیح و تجربه شخص تحلیل‌گر دارای اهمیت است؛ اما سؤال مهم این است که مدل شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده تا چه اندازه دقیق هستند، بنابراین تعدادی آزمون برای ارزیابی صحت نتایج به دست آمده از مدل، لازم و ضروری است. در نتیجه ترکیبی از شبیه‌سازی و آزمون می‌تواند بهترین روش برای به دست آوردن یک تحلیل قابل اعتماد و به دنبال آن طراحی محصول و بسته‌بندی موفّق آن باشد.

سازندگان قطعات و محصولات الکترونیکی قابل حمل باید سختی فیزیکی و قابلیت اطمینان را در طراحی قطعات در نظر بگیرند. به طور سنتی، آزمون‌های گسترده سقوط فیزیکی بر روی نمونه‌ها انجام می‌شد تا قابلیت اطمینان و میزان شکنندگی آن‌ها ارزیابی شود. آزمون‌های آزمایشگاهی در حالی که روش‌های مستقیم و دقیقی را برای تقویت محصولات ارائه می‌دهند، در عین حال تلاش های زیادی را می‌طلبند و همچنین هزینه بر و زمان‌بر

1- Tan

هستند. مدل‌سازی عددی می‌تواند در طراحی یک محصول جدید کمک بزرگی باشد. امروزه، بسیاری از تحلیل‌های مهندسی برای طراحی محصول بر مدل‌سازی اثرات موضعی با در نظر گرفتن تغییر شکل در محل وارد شدن ضربه، تمرکز کرده‌اند. با در دسترس بودن امکانات محاسباتی پیشرفته و کدهای المان محدود، انجام آزمون‌های مجازی سقوط از طریق شبیه‌سازی المان محدود امکان‌پذیر می‌شود. طراحی محصول و بسته‌بندی آن را می‌توان به سرعت تغییر و یا اصلاح نمود و آزمون‌های سقوط را شبیه‌سازی کرده و اثر بهینه‌سازی‌های صورت گرفته بر توانمندی فیزیکی محصول را مشاهده نمود. اگر مدل‌سازی‌ها و ت حلیل‌ها دقیق صورت گیرند، مدل محاسباتی می‌تواند پاسخ محصول را به ضربه ناشی از سقوط، حتّی قبل از اینکه نمونه واقعی تولید و آزموده شود، پیش‌بینی کند.

زمانی که طراحی نهایی محصول و نوع بسته‌بندی آن به انجام رسید، آنگاه می‌توان یک نمونه اولیه را جهت تعیین کارایی واقعی محصول تولید نمود. در این صورت طراحی محصول به دلیل کاهش تعداد نمونه‌های اولیه و کاهش تعداد آزمون‌ها، زمان و هزینه‌ها در چرخه توسعه محصول کاهش یافته و در نتیجه فرآیند طراحی محصول کارامدی بیشتری خواهد داشت. به علاوه با توجّه به درنظر گرفتن بسته‌بندی فیزیکی بدنه و نهایی محصول از ابتدا و در مرحله طراحی و شبیه‌سازی امکان طراحی بهتر و کاهش هزینه‌های ناشی از صدمات و حمل‌ونقل به طرز مؤثری فراهم می‌باشد.

گویال[1] و همکاران در سال (۱۹۹۹) [۳۳] ضربه وارد شده بر گوشی تلفن همراه را بررسی کردند و یک روش تحلیلی برای مطالعه اثر ضربه سقوط بر روی گوشی تلفن همراه ارائه دادند. آن‌ها پیشنهاد کردند که ساختار و هندسه محصول در کنار تنش‌های موضعی منجر به شکست مواد در تحلیل نوع شکست حائز اهمیت می‌باشد. لیم و همکاران در سال(۱۰۰۲) [۲۶] اثر ضربه را بر روی یک پیجر الکترونیکی با استفاده از شبیه‌سازی عددی المان محدود بررسی کرده‌اند. آن‌ها تنش‌های سطحی بر روی محفظه پیجر و نیروی ضربه را مورد بررسی قرار داده و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نموده و نشان دادند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود و نتایج آزمایشگاهی برای اثر سقوط پیجر الکترونیکی دارای همبستگی خوبی می باشند.

لو[2] و همکاران در سال(۲۰۰۱ و ۲۰۰٤) [۸ و ۹] تلاش‌های گسترده‌ای را در خصوص بررسی اثر سقوط بر روی دستگاه‌های الکتریکی و شبیه‌سازی این فرآیند انجام داده‌اند. آن‌ها نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش المان محدود را با نتایج حاصل از آزمایش واقعی سقوط مقایسه نموده‌اند. آن‌ها یکی از مشکلات شبیه‌سازی المان محدود را ریز ساختارهای درونی دستگاه‌های الکترونیکی گزارش کرده‌اند. از آنجا که گام‌های زمانی در روش تحلیل المان محدود صریح، تابعی از اندازه کوچک‌ترین المان می باشد، مش‌های بسیار ریز مربوط به قطعات زیر درونی دستگاه، منجر به طولانی‌تر شدن زمان حل مسأله می‌شود.

لیو[3] و همکاران در سال (۲۰۰۵) [۳٤] اثر ضربه ناشی از سقوط را بر روی یک دستگاه پمپ انسولین و یک دستگاه گوشی تلفن همراه بررسی نموده و نتایج آزمون فیزیکی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود مقایسه کرده‌اند. آن‌ها مقدار نیروی وارده به دستگاه در جهت‌های مختلف برخورد را بررسی نموده‌اند. برخی محققان اثر نوع آلیاژ لحیم‌کاری و اتصالات داخلی دستگاه‌های الکترونیکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

لین یه[4] و همکاران در سال (۲۰۰٦) [۲۰] یک مدل عددی برای بررسی میزان مقاومت اتصالات لحیم‌کاری شده نسبت به وارد آمدن ضربات متوالی تا زمان شکست و مقاومت آن در مقابل تنش‌های فشاری و کششی در اثر ضربات متوالی را توسعه داده‌اند. ونگ و همکاران در سال(۲۰۰۹) [۷] با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود ویژگی‌های فیزیکی و خواص فشاری-کششی انواع آلیاژ لحیم‌کاری را برای کاربردهای تلفن همراه مورد بررسی

1- Goyal

2- Low
3- Liu
4- Lin Yeh

قرار داده‌اند. ژنگ و همکاران در سال(۲۰۰۸) [۳] نشان دادند که در اثر ضربه ناشی از سقوط، تخته مدار چاپی دچار ارتعاش آزاد (یکی از شاخص‌های ذاتی سامانه) شده که این ارتعاشات منجر به شکستن اتصالات لحیم‌کاری آن می‌شود. آن‌ها سپس با استفاده از آنالیز مودال شاخص‌های دینامیکی ذاتی سامانه (همانند ارتعاش آزاد) را بررسی نموده و در نهایت مدل نظریه لرزش استانداردJEDEC برای PCB را برای سه تراشه با اندازه‌های متفاوت بررسی نموده‌اند. سپس نتایج نظری حاصل را با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود و آنالیز مودال مقایسه و تصدیق کرده‌اند.

متیلا[1]و همکاران در سال(۲۰۱٤) [۳۵] اثر سقوط در سطح محصول را برای چند چندین مدل تجاری مختلف گوشی تلفن همراه انجام داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که اثر سقوط بر روی یک قطعه الکترونیکی را می‌توان به دو دوره زمانی متوالی تقسیم کرد: اول خم شدن یا انحنای تخته مدار در اثر شدّت ضربه در لحظه برخورد، و دوم لرزش ناشی از شدّت ضربه لحظه برخورد که در لحظات بعدی به تخته مدار وارد می‌شود. آن‌ها به کمک تحلیل المان حدود نشان دادند که تنش‌ها و فشارهای وارده به شدّت موضعی هستند و تمرکز بالای تنش به علت نیروهای خمشی، پیچشی و یا فشار وارده به تخته مدار از طرف دیگر قطعات اطراف آن در طول دوره زمانی اول و برخوردهای درونی بین تخته مدار و دیگر قطعات جانبی آن مثل باتری یا صفحه نمایش در طول دوره زمانی دوم، می‌باشد.

آن‌ها همچنین نشان دادند که در بیشتر موارد، تنش‌های وارده در اثر لرزش‌های بعد از لحظه برخورد بسیار کمتر از تنش‌های وارده در لحظه برخورد، می‌باشند و لرزش‌های بعد از لحظه برخورد در اکثر دستگاه‌ها به خوبی میرا می‌شوند.

٤- نتیجه گیری

۱. در تحقیق حاضر، تحلیل و بررسی اثرات ضربه، سقوط و همچنین بسته‌بندی فیزیکی بدنه و بسته‌بندی نهایی محصول در دستگاه‌های الکترونیکی مرور گردید. در این تحقیق تلاش شد خلاصه‌ای از تلاش‌های انجام شده در این زمینه ارائه شود.

۲. اهمیت روش تحلیل المان محدود در مطالعه اثرات ضربه و سقوط بر روی دستگاه‌های الکترونیکی و توجّه به بسته‌بندی آن‌ها تصدیق شد؛ از تحلیل المان محدود می‌توان برای تعیین کمیت‌هایی مثل توزیع تنش در لحظه برخورد، که از طریق آزمایش به سختی حاصل می‌شوند، بهره برد؛ اما این به آن معنی نیست که تحقیقات آزمایشگاهی قابل صرفه‌نظر کردن هستند.

۳. اثرات ضربه، سقوط و بسته‌بندی بر روی دستگاه‌های الکترونیکی را می‌توان به دو دسته بر پایه تخته مدار و بر پایه محصول تقسیم‌بندی نمود. انجام آزمون‌های سقوط بر پایه محصول با بسته‌بندی نهایی و بدون بسته‌بندی نهایی و با در نظر گرفتن بسته‌بندی قاب تجهیز و حتّی بدون آن اجتناب‌ناپذیر است، چرا که آزمون‌های بر پایه تخته مدار، واکنش‌های میان PCB و محفظه نگه‌دارنده و همچنین چفت و بست‌ها، اتصالات و ارتباط میان تجهیز و بسته‌بندی آن را در حین فرآیند سقوط و وارد شدن ضربه، در نظر نمی‌گیرند.

٤. همچنین این نیاز احساس می‌شود که باید رابطه‌ای بین آزمون‌های بر پایه تخته مدار و محصول برقرار گردد. تحلیل آزمون سقوط و اثر ضربه با روش المان محدود را می‌توان به طور مؤثر جهت رسیدن به زمان‌های محاسبه کمتر و قابل قبول انجام داد.

همچنین بررسی تحقیقات انجام شده نشان‌دهنده کمبود تحقیقات در زمینه آزمون‌های سقوط بر پایه محصول بوده که نیازمند تحقیقات بیشتر می‌باشد.

1- Mattila

۵- منابع

1. Low, K.H., (2003). "**Drop-impact cushioning effect of electronics products formed by plates**". Advances in engineering software, Vol. 34, pp. 31–50.

2. Luan, J., Tee, T.Y., Pek, E., Lim, C.T., Zhong, Z., (2007). "**Dynamic responses and solder joint reliability under board level drop test**". Microelectronics Reliability Vol. 47, pp. 450–460.

3. Zhang, B., Ding, H., Sheng, X., (2008). "**Modal analysis of board-level electronic package**". Microelectronic engineering, Vol. 85, pp. 610–620.

4. Zhou, C.Y., Yu, T.X., (2009). "**Analytical models for shock isolation of typical components in portable electronics**". International journal of impact engineering, Vol. 36, pp. 1377–1384.

5. Tee, T.Y., Ng, H.S., Lim, C.T., Pek, E., Zhong, Z., (2003). "**Board level drop test and simulation of TFBGA packages for telecommunication applications**". Electronic components and technology conference, Proceedings. 53rd, pp. 121 – 129.

6. Zhu, L., Marcinkiewicz, W., (2005). "**Drop impact reliability analysis of csp packages at board and product system levels through modeling approaches**". IEEE Transactions on components and packaging technologies, Vol. 28, No. 3, pp. 449–456.

7. Wong, E. H., Seah, S. K. W., van Driel, W. D., Caers, J. F. J. M., Owens, N., Lai, Y. S., (2009). "**Advances in the drop-impact reliability of solder joints for mobile applications**". Microelectronics reliability, Vol. 49, No. 2, pp. 139–149.

8. Low, K.H., Yang, A., Hoon, K.H., Zhang, X., Lim, J.K.T., Lim, K.L., (2001). "**Initial study on the drop-impact behavior of mini Hi-Fi audio products**". Advances in engineering software, Vol. 32, No. 9, pp. 683–693.

9. Low, K.H., Wang, Y., Hoon, K.H., Wai, W.K., (2004). "**A virtual boundary model for a quick drop–impact analysis of electronic components in TV model**". Advances in engineering software, Vol. 35, pp. 537–551.

10. Wang, Y.Y., Lin, T.Y., Hua, L., (2003). "**Drop-impact simulation and experimental verification for spindle fixation of video and audio module**". Mechatronics, Vol. 13, No. 5, pp. 427–440.

11. Wang, Y.Y., Lu, C., Li, J., Tan, X.M., Tse, Y.C., (2005). "**Simulation of drop/impact reliability for electronic devices**", Finite elements in analysis and design, Vol. 41, No. 6 ,pp. 667–680.

12. Sharan, K., Lahoti, S., Zhou, J., (2006). "**Dynamic response of a portable electronic product subjected to an impact load**". Thermal and thermomechanical proceedings 10th Intersociety conference on phenomena in electronics systems, San Diego, pp. 1049 – 1055.

13. Lim, C.T., Teo, Y. M., Shim, V. P. W., (2002). "**Numerical simulation of the drop impact response of a portable electronic product**". IEEE Transactions on components and packaging technologies, Vol. 25, No. 3.

14. Wang, Y., Low, K. H., Pang, H. L. J., Hoon, K. H., Che, F. X., Yong, Y. S., (2006). "**Modeling and simulation for a drop-impact analysis of multi-layered printed circuit boards**". Microelectronics reliability, Vol. 46, No. (2-4), pp. 558–573.

15. Mattila, T. T., Vajavaara, L., Hokka, J., (2013). "**An approach to board-level drop reliability evaluation with improved correlation with use conditions**". IEEE 63rd Electronic components & technology conference, Las Vegas, NV, pp. 1259 – 1268.

16. JEDEC, (2003). "**Board level drop test method of components for handheld electronic products**".

JEDEC Document for board level drop test method of components for handheld electronic products, JEDEC Solid State Technology Association, Arlington, VA, Paper No. JESD22-B111.
17. Lall, P., Panchagade, D.R., Choudhary, P., Gupte, G., Suhling, J.C., (2008). "**Failure-Envelope approach to modeling shock and vibration survivability of electronic and mems packaging**". IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 31, No. 1.
18. Yu, D., Kwak, J.B., Park, S., Lee, J., (2010). "**Dynamic responses of PCB under product-level free drop impact**". Microelectronics reliability, Vol. 50, No. 7, pp. 1028–1038.
19. Luan, J. E., Tee, T. Y., (2004). "**Analytical and numerical analysis of impact pulse parameters on consistency of drop impact results**". Sixth Electronics packaging technology conference, pp. 664 - 670.
20. Yeh, C.L., Lai, Y.S., Kao, C.L., (2006). "**Evaluation of board-level reliability of electronic packages under consecutive drops**". Microelectronics reliability, Vol. 46, pp. 1172–1182.
21. Yau, Y.H., Hua, S.N., (2011). "**A comprehensive review of drop impact modeling on portable electronic devices**". Applied mechanics reviews, Vol. 64, pp. 020803-17.
22. JEDEC Document for Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products, "**Subassembly Mechanical Shock**", JEDEC Solid state technology association, Arlington, VA, Paper No. JESD22-B110A.
23. Goyal, S., Buratynski, E.K., (2000). "**Methods for realistic drop-testing**". International journal of microcircuits and electronics packaging, Vol.23, No.1, pp.45–52.
24. Shim, V.P.W., Lim, C.T., (2000). "**Impact drop tester for portable consumer products**". US patent, No. 09/592,262.
25. Seah, S.K.W., Lim, C.T., Wong, E.H., Tan, V.B.C., Shim, V.P.W., (2002). "**Mechanical response of PCBs in portable electronic products during drop impact**". the 4th Electronics packaging technology conference, Singapore, pp. 120–125.
26. Lim, C.T., Low, Y.J., (2002). "**Investigating the drop impact of portable electronic products**". The 52nd Electronic components & technology conference, United States, pp. 1270–1274.
27. Lim, C.T., Ang, C.W., Tan, L.B., Seah, S.K.W., Wong, E.H., (2003). "**Drop impact survey of portable electronic products**". The 53rd Electronic components and technology conference, Proceedings, pp. 113–120.
28. Zhou, C.Y., Yu, T.X., Lee, R. S.W., (2008). "**Drop/impact tests and analysis of typical portable electronic devices**". International journal of mechanical sciences, Vol. 50, No. 5, pp. 905–917.
29. Tan, L.B., Ang, C.W., Lim, C.T., Tan, V.B.C., Zhang, X., (2005). "**Modal and impact analysis of modern portable electronic products**". The proceedings of the 55th electronic component and technology conference, Lake Buena Vista, Vol. 1, pp. 645–653.
30. Nagaraj, B., (1997). "**Drop impact simulation of a custom pager product**". Advanced electronic packaging, Vol. 1, pp. 539–547.
31. Lu, C., Li, J., Tse, Y.C., Wang, Y.Y., (2001). "**Drop-test simulations for electronic devices with packaging materials**", Joint NCHC-IHPC Seminar, Taiwan, 9.
32. Cadge, D., Wang J.H.J., Bai, R., Gong, P., (2006). "**Drop test simulation of electronic devices using finite element method**". Electronic materials and packaging,

EMAP 2006, International conference on, pp. 1-7.
33. Goyal, S., Upasani, S., Patel, D. M., (1999). "**Improving impact tolerance of portable electronic products: Case study of cellular phones,**" Experimental mechanics, Vol. 39, No. 1, pp. 43–52.
34. Liu, S., Wang, X., Ma, B., Gan, Z., Zhang, H., (2005). "**Drop test and simulation of portable electronic devices**". sixth International conference on electronic packaging technology, Shenzhen, China, pp. 1-4.
35. Mattila, T.T., Vajavaara, L., Hokka, J., Hussa, E., Mäkelä, M., Halkola, V., (2014). "**Evaluation of the drop response of handheld electronic products**". Microelectronics reliability, Vol. 54, No. 3, pp. 601–609.

آدرس نویسنده

تهران- میدان صنعت(شهرک قدس)- خیابان هرمزان- خیابان پیروزان جنوبی- نبش کوچه پنجم- ساختمان اسراء- مرکز مطالعات و پژوهش‌های لجستیکی- طبقه اول- گروه بسته‌بندی.