ISAV2022
دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱ تهران - ایران

# طراحی و شبیه‌سازی آکوستیکی یک سالن سینما با استفاده از نرم افزار ODEON

محمد صابر صراف زاده قدیمی[آ*]، فاطمه علی بابایی[ب]

[آ] ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فیزیک، دانشجوی دکتری

[ب] ایران، تهران، دانشگاه شاهد، دانشکده ریاضی، کارشناس ارشد

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: *sarrafzadeh.s@gmail.com*

## چکیده

در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی آکوستیکی یک سالن سینما به حجم ۲۲۸۲ مترمکعب پرداخته شده است. فضای این سالن سینما، ابتدا در محیط Extrusion Modeler به صورت سه بعدی ترسیم شده و سپس به محیط نرم افزار ODEON جهت شبیه‌سازی آکوستیکی وارد شده و با طراحی آکوستیکی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای RT، T20، T30، EDT و STI مورد بررسی قرار گرفته‌اند و داده‌های بدست آمده از نرم افزار که با آیین‌نامه مقررات ملی مبحث هجدهم وزارت ساختمان و مسکن و همچنین استانداردهای بین المللی آکوستیک تطابق دارند، نشان می‌دهند که این سالن سینما از نظر آکوستیکی بصورت مطلوب طراحی شده است. با بررسی داده‌ها، مشاهده شده است که با اجرای این طرح آکوستیک، مقدار زمان واخنش در بسامدهای ۸ kHz – ۲۵۰ Hz کمتر از ۰/۷۵ ثانیه می‌باشد که برای این سالن سینما با حجم ذکر شده در بالا، مطلوب و استاندارد است. همچنین میزان STI در تمامی نقاط تحت بررسی حدود ۰/۸ بوده و در گستره قابلیت فهم گفتار عالی قرار گرفته است. سایر پارامترهای مورد بررسی در مقاله نیز، همگی نشان از حسن طراحی آکوستیکی این سالن سینما داده‌اند.

**کلمات کلیدی**: شبیه‌سازی؛ طراحی آکوستیکی؛ سالن سینما؛ نرم افزار ODEON.

---

## ۱- مقدمه

تاریخ آغاز طراحی آکوستیکی با ساخت تئاتر یونان باستان و سپس رم باستان شروع شد. تا پایان قرن نوزدهم طراحی این گونه فضاها بر اساس سعی و خطا و تجربی انجام می‌پذیرفت. در سال ۱۸۹۵ بدلیل غیر قابل تحمل بودن مشکل آکوستیکی تالار موزه‌ی هنر فگ (Fogg)، فیزیک‌دان جوانی به نام سابین (Sobine) سعی در بهبود بخشیدن به این مشکل کرد. این مسئله در تاریخ آکوستیک

به عنوان اولین تلاش علمی در جهت بهبود بخشیدن به وضعیت آکوستیکی یک تالار به شمار می‌رود. از آن پس طراحی آکوستیکی یکی از حوزه‌های فعال در فیزیک و معماری به شمار می‌رود [۱].

سینماها از صوت تقویت شده استفاده می‌کنند و فضا را با مواد جذب کننده صوت عالی طراحی می‌کنند. بنابراین دیگر مهم نیست که شکل فضا بصورت آکوستیکی طراحی گردد. اما نکته مهم عبارت است از خاصیت انعکاسی سینما، که باید از تعدادی دیوار و سقف ساخته شده از مواد جذب کننده صوت به منظور مهار طنین و پژواک استفاده کرد. باید حداقل نیمی از فاصله موجود میان دیوارها و سقف سینما را عایق‌کاری نمود [۲].

نکته‌ی حائز اهمیت در طراحی آکوستیک سینماها، همانند سالن‌های سخنرانی و کنفرانس، پایین آوردن زمان واخنش سالن تا حد استاندارد می‌باشد. استفاده از سطوح جذب و پخش کننده نقش بسیار تعیین کننده‌ای در کیفیت صدا که عموما توسط سیستم-های تقویت الکترونیکی پخش می‌شود خواهد داشت [۱].

با توجه به پیشرفت تکنولوژی‌های ضبط و ارائه صدا در صنعت سینما، و استفاده از تکنولوژی سیستم‌های صوتی پیشرفته، توجه به آکوستیک استاندارد سالن‌های سینما، امروزه بیش از گذشته مورد نیاز و ضروری است. اجرای طرح آکوستیک ارائه شده در این مقاله که با نرم افزار ODEON انجام شده است، شرایط آکوستیکی فضای مورد نظر را بهینه و مطلوب خواهد نمود. سعی شده است تا استانداردسازی آکوستیک سالن با کمترین تغییرات در طرح سالن به دست آید و همچنین از مواد و مصالح آکوستیکی قابل دسترسی در شرایط فعلی استفاده شود. شایان ذکر است که نرم افزار ODEON قوی‌ترین نرم افزار برای شبیه‌سازی و طراحی آکوستیک داخلی فضاها می‌باشد که در گذر سالیان متمادی، قابل اعتماد بودن داده‌ها و محاسبات آن در پروژه‌های بسیاری به اثبات رسیده است.

## ۲- پارامترهای مهم در طراحی آکوستیکی سالن سینما

به منظور طراحی آکوستیکی یک سالن سینما باید پارامترهای آکوستیکی را مطابق با استانداردهای این نوع فضا بدست آورد. مهمترین پارامترهای آکوستیکی در ارزیابی آکوستیک سالن‌های سینما، نوفه زمینه (BN)، عایق‌بندی صوتی ($R_W$)، زمان واخنش (RT)، قابلیت فهم کلام (STI) و یکنواختی توزیع انرژی صوتی (SPL) می‌باشند.

### ۲-۱ *تعیین زمان واخنش استاندارد سالن سینما*

با توجه به آیین‌نامه مقررات ملی مبحث هجدهم وزارت ساختمان و مسکن، زمان واخنش (Reverberation Time) سالن‌های سینما باید بین ۰/۴ تا ۱/۲ ثانیه بسته به حجم سالن سینما باشد [۳]. با توجه به حجم این سالن سینما (۲۲۸۲ مترمکعب)، زمان واخنش مطلوب و استاندارد این سالن سینما حدود ۰/۷۵ ثانیه (به خصوص در گستره‌ی بسامدی ۵۰۰ Hz – ۴۰۰۰ Hz) برآورد می‌شود.

### ۲-۲ *عایق بندی صوتی جداکننده‌ها*

عایق بندی صوتی جداکننده‌ها (دیوارها، درها، سقف و ...) در سالن‌های سینما با توجه به آیین‌نامه مقررات ملی مبحث هجدهم وزارت ساختمان و مسکن، باید حداقل ۵۰ دسی‌بل باشد[۳]. به جهت رسیدن به این عایق بندی صوتی در سالن سینما، ضروری است که از دیوار دوبل در جداکننده‌ها استفاده گردد. بهتر است ضخامت دیوارها متفاوت بوده و بین دو دیوار جاذب صوت استفاده گردد. همچنین در ورودی و خروجی سالن سینما باید بصورت دوبل اجرا گردد و در تمام آکوستیک باشد. هر در باید ۳۵ دسی‌بل افت عبور صوتی داشته باشد و بین دو در حداقل ۳۰ سانتی‌متر فاصله‌ی هوایی باشد.

### ۲-۳ *نوفه زمینه سالن سینما*

حداکثر تراز نوفه زمینه معادل ($L_{Aeq}$) در سالن سینما با توجه به آیین‌نامه مقررات ملی مبحث هجدهم وزارت ساختمان و مسکن، باید ۳۵ دسی‌بل باشد[۳]. به جهت رسیدن به این نوفه زمینه باید موارد قید شده در بخش عایق‌بندی صوتی جداکننده‌ها

رعایت شوند. همچنین ضروری است که در مسیر کانال‌های هوارسان سالن سینما از سایلنسر استفاده شود تا نوفه تجهیزات مکانیکی هواساز به سالن سینما منتقل نشود.

### ۲-۴ *قابلیت فهم گفتار*

قابلیت فهم گفتار (Intelligibility) که با شاخص STI اندازه‌گیری می‌شود، برای سالن‌های سینما، باید حداقل ۰/۷ باشد[۴].

### ۲-۵ *یکنواختی توزیع انرژی صوتی*

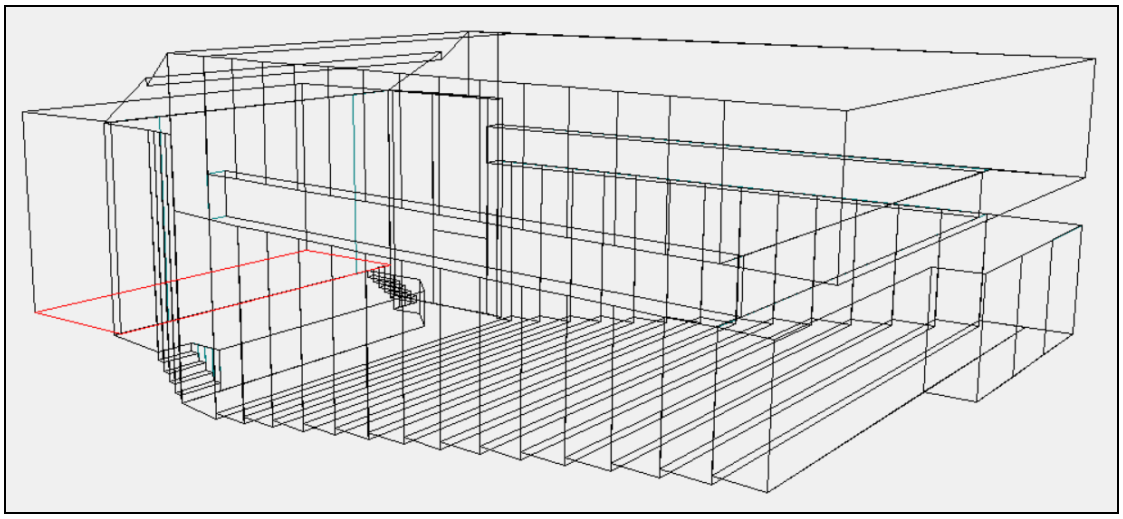
انرژی صوتی توزیع شده در سالن سینما باید یکنواخت باشد. به عبارتی نقطه کور صوتی و یا نقطه تشدید صوتی در سالن سینما نباید وجود داشته باشد و به تمامی نقاط سالن سینما باید انرژی صوتی مطلوب و مناسب برسد.

## ۳- شبیه‌سازی و بررسی داده‌های بدست آمده

شبیه‌سازی این پژوهش با استفاده از نرم افزار ODEON که یکی از قویترین نرم افزارهای شبیه‌سازی آکوستیکی فضاها می-باشد، انجام شده است. در ادامه مقاله به بررسی داده‌های بدست آمده می‌پردازیم و جزئیات طراحی و مواد آکوستیکی استفاده شده را بیان می‌نماییم.

### ۳-۱ *ترسیم سه بعدی فضای سالن سینما در محیط نرم افزار*

ابتدا سالن سینمای مورد نظر را در نرم افزار جانبی Extrusion Modeler بصورت سه بعدی ترسیم نموده و سپس آنرا وارد محیط نرم افزار ODEON می‌نماییم. شکل (۱) این سالن سینما را که در محیط نرم افزار ODEON وارد شده است، نشان می‌دهد.



**شکل ۱. سالن سینما ترسیم شده در محیط نرم افزار ODEON**

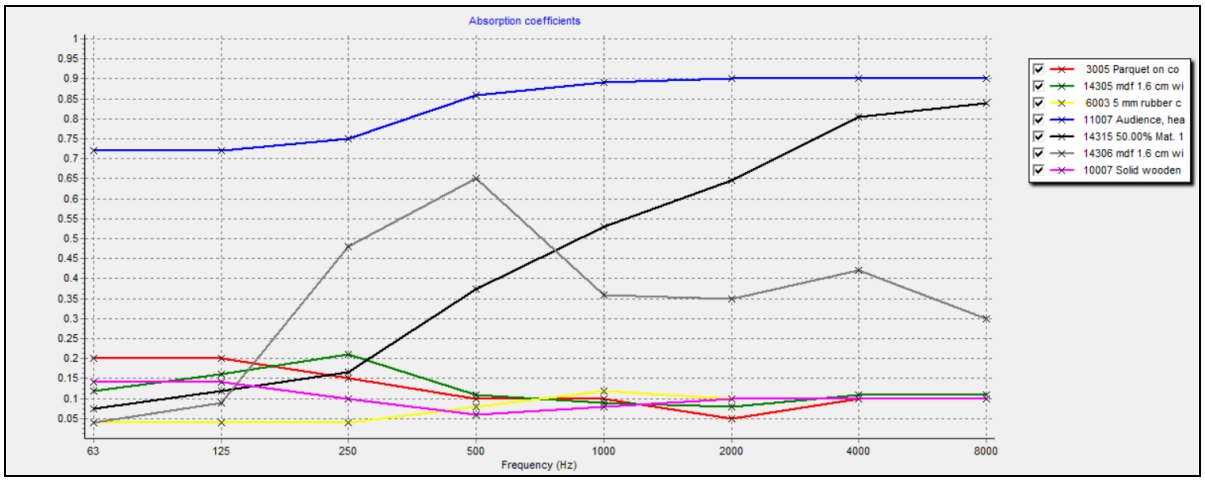
### ۳-۲ *تعریف مواد و جاذب‌های آکوستیکی*

در مرحله‌ی بعد باید برای تمامی سطوح داخلی فضا، مواد آکوستیکی مورد نظر را (اعم از جاذب‌ها، دیفیوزرها و ...) تعریف نمود. این سطوح و مواد به صورت زیر تعریف شده‌اند:

**جدول ۱. نوع سطوح سالن سینما و نوع مواد پوششی و آکوستیکی استفاده شده بر روی آنها**

| ردیف | نوع سطح | نوع ماده پوششی و آکوستیکی به همراه کد آن در نرم افزار ODEON | مساحت استفاده شده (مترمربع) |
|---|---|---|---|
| ۱ | کف سالن (شامل تمامی بخش‌های کف اعم از پله ها و ... ) | ۶۰۰۳ : موکت با ضخامت حداقل ۵ میلیمتر | ۲۲۰ |
| ۲ | کف سن | ۳۰۰۵ : پارکت | ۴۰ |
| ۳ | دیوار پشت سن، دیوارهای جانبی سن | ۱۴۳۱۵ : وول‌پنل و در پشت آن پشم سنگ با چگالی ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضخامت ۳ سانتی‌متر | ۱۲۵ |
| ۴ | سقف سن، سقف سالن | ۱۴۳۰۶ : MDF به ضخامت ۱۶ میلیمتر پانچ شده با سوراخ هایی به قطر ۹ میلیمتر و فاصله محور تا محور ۳ سانتیمتر و در پشت آن پشم سنگ با چگالی ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضخامت ۳ سانتیمتر | ۱۴۱ |
| ۵ | پیشانی جلوی سن، دیوار پشت سالن و قسمتی از دیوار جانبی | ۱۴۳۰۵ : MDF به ضخامت ۱۶ میلیمتر و در پشت آن پشم سنگ با چگالی ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضخامت ۳ سانتیمتر | ۵۱۰ |
| ۶ | درهای سالن | ۱۰۰۰۷ : درهای تمام آکوستیک چوبی | ۲۰ |
| ۷ | دیوارهای جانبی سالن | (۴۰٪)۱۴۳۰۶ + (۶۰٪)۱۴۳۰۵ | آورده شده |
| ۸ | شنوندگان به همراه صندلی‌ها | ۱۱۰۰۷ : صندلی پارچه ای با فوم ضخیم، پشت صندلی و کف آن از جنس چوب منفذدار | ۱۴۰ |

نمودار ضریب جذب صوتی مواد بکار رفته در این طراحی و پژوهش در شکل (۲) آورده شده است.

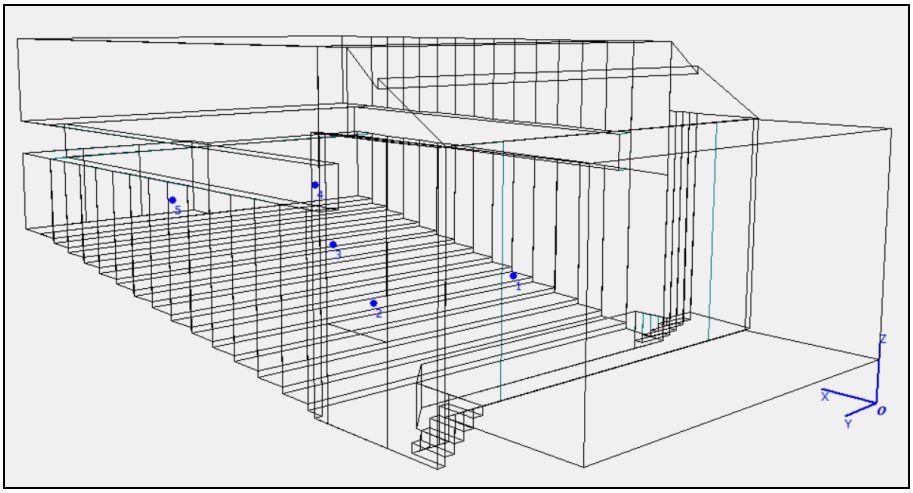



**شکل ۲. نمودار ضریب جذب صوتی مواد بکار رفته در طراحی**

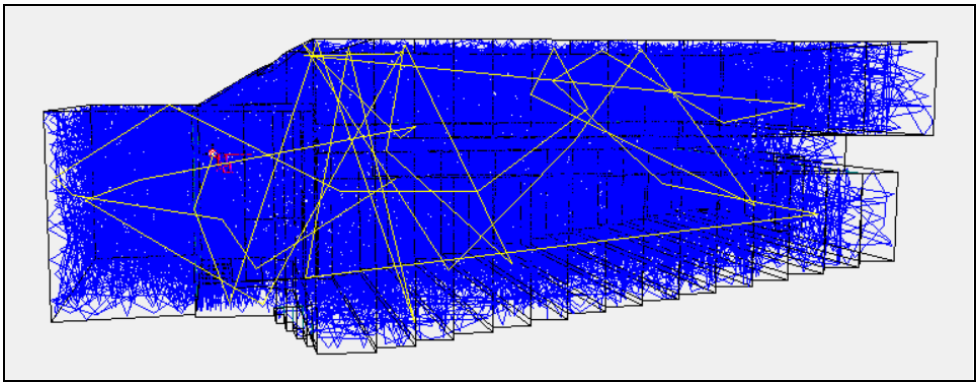
### ۳-۳ *تعریف موقعیت و مدل میکروفون‌ها و بلندگو*

سپس باید بلندگو و میکروفون‌های اندازه‌گیری را در سالن سینما تعریف کنیم که با ایجاد صدا توسط بلندگو و دریافت توسط میکروفون‌ها، زمان واخنش و سایر پارامترهای آکوستیکی فضا محاسبه شود. شکل (۳) محل قرارگیری میکروفون‌ها در این فضا را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی از ۵ میکروفون استفاده شده است تا با میانگین‌گیری از آنها به توزیع یکنواختی از صوت در فضا دست یابیم و خطای محاسبات را به حداقل برسانیم. میکروفون‌ها در ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتری که معادل ارتفاع گوش فرد نشسته بر روی صندلی در سالن است قرار گرفته‌اند.

شکل (۴) محل قرارگیری بلندگوی تست و نمایشی از ردگیری پرتوهای صوتی برای محاسبه زمان واخنش سالن سینما را نشان می‌دهد. این محل قرارگیری بلندگو صرفا برای محاسبه زمان واخنش می‌باشد و مکان قرارگیری بلندگوهای اصلی سالن نمی‌باشد. بلندگو در ارتفاع ۲ متر از کف قرار گرفته است.



**شکل ۳. محل قرارگیری میکروفون‌ها (۱، ۲ ، ۳ ، ۴ و ۵) در سالن سینما**



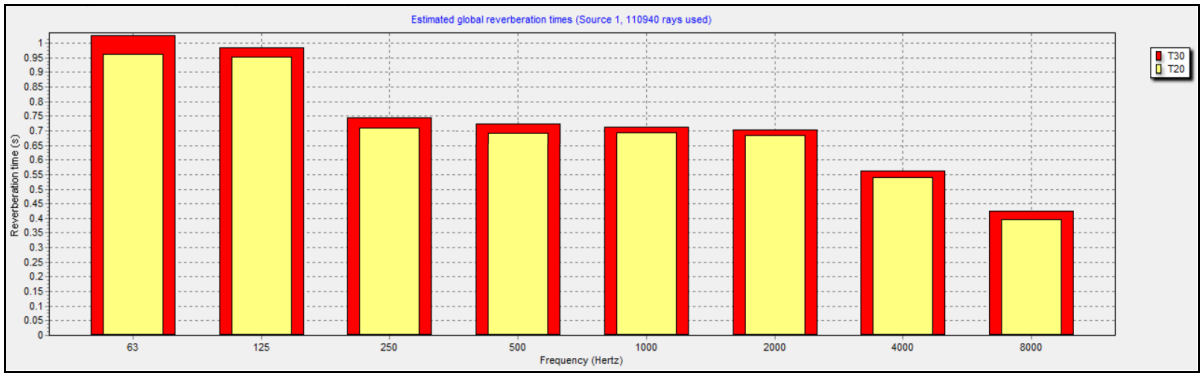
**شکل ۴. محل قرارگیری بلندگوی تست و نمایشی از ردگیری پرتوهای صوتی در سالن سینما**

### ۳-۴ *اجرای شبیه‌سازی و بدست آوردن داده‌ها*

در این مرحله چیدمان شبیه‌سازی کامل شده و آماده اجرای برنامه می‌باشد. نرم افزار را اجرا کرده و داده‌های مورد نیاز را بدست می‌آوریم.

### ۳-۵ *محاسبات* **T20** *و* **T30** *با روش ردگیری پرتوهای صوتی*

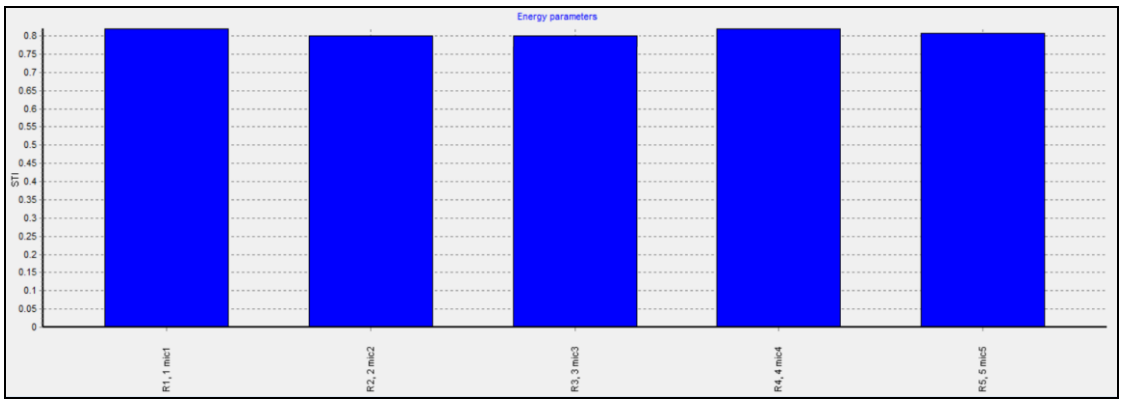
نتایج محاسبات T20 و T30 در شکل (۵) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، زمان واخنش در گستره‌ی بسامدی ۲۵۰ تا ۸۰۰۰ هرتزی از ۰/۷۵ ثانیه کمتر می‌باشد. با توجه به میزان زمان واخنش استاندارد مطرح شده برای حجم این سالن سینما، زمان واخنش بدست آمده مطلوب و استاندارد می‌باشد. تعداد پرتوهای منتشر شده ۱۱۰۹۴۰ عدد می‌باشد.




**شکل ۵. نتایج محاسبات T20 و T30**

### ۳-۶ *محاسبات* **STI** *در موقعیت میکروفون‌ها*

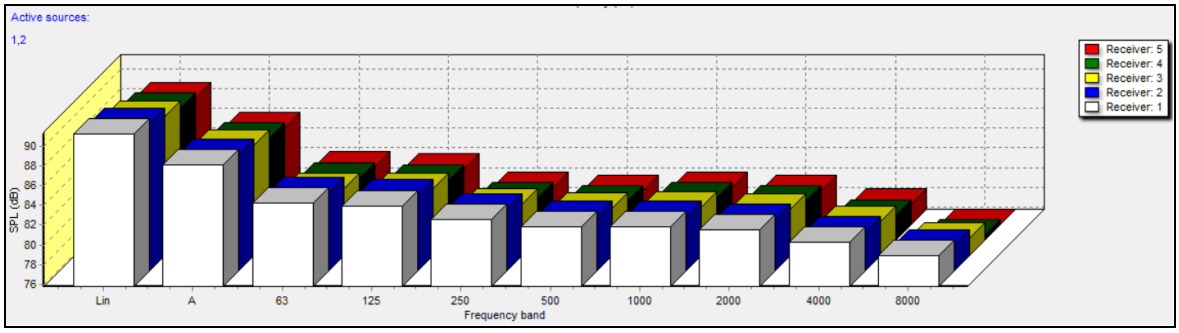
نتایج محاسبات STI در موقعیت میکروفون‌ها در شکل (۶) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان شاخص STI در محدوده عالی و استاندارد (حدود ۰/۸) برای سالن‌های سینما قرار دارد.




**شکل ۶. نتایج محاسبات STI در موقعیت میکروفون‌ها**

### ۳-۷ *محاسبات* **SPL** *رسیده به هر میکروفون*

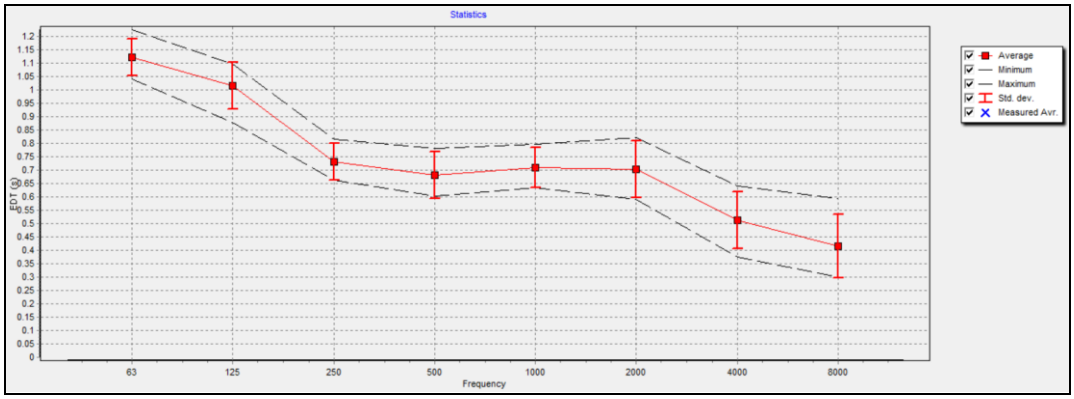
نتایج محاسبات SPL رسیده به هر موقعیت میکروفون در شکل (۷) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انرژی صوتی بصورت یکنواخت در سالن سینما توزیع شده است.




**شکل ۷. نتایج محاسبات SPL رسیده به هر میکروفون**

### ۳-۸ *نتایج محاسبات آماری بر روی پارامتر* **EDT**

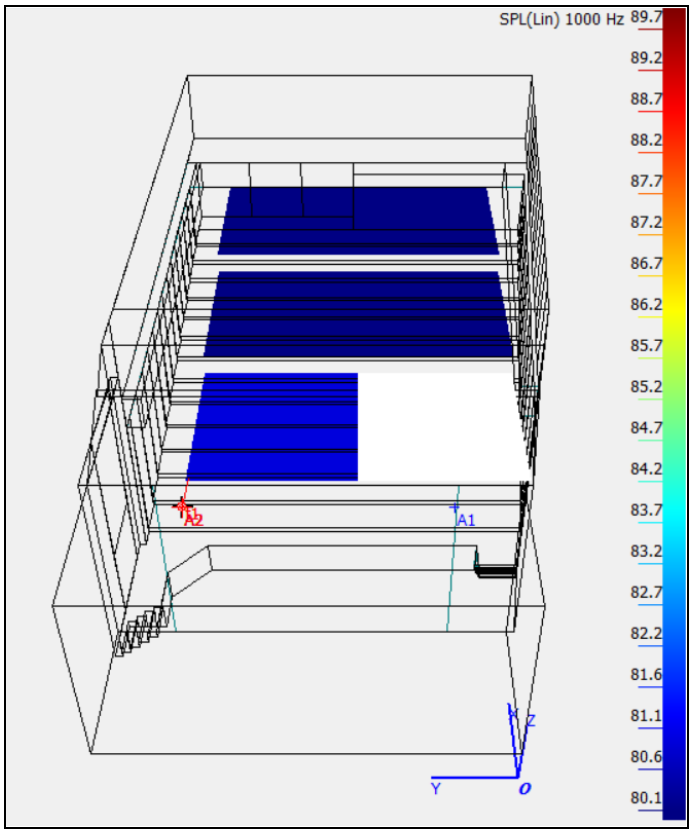
نتایج محاسبات آماری بر روی پارامتر EDT در شکل (۸) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انحراف از میانگین در بازه‌ی منطقی و مورد قبول قرار دارد.




**شکل ۸. نتایج محاسبات آماری بر روی پارامتر EDT**

### ۳-۹ *نمایش یکنواختی توزیع انرژی صوتی در سالن سینما*

یکنواختی توزیع انرژی صوتی در طراحی آکوستیک سالن سینما در شکل (۹) قابل رویت می‌باشد که نشان از حسن طراحی آکوستیک سالن می‌باشد. به عبارتی از نظر توزیع انرژی صوتی، منطقه کور یا تشدید در سالن مشاهده نمی‌شود.




**شکل ۹. یکنواختی توزیع انرژی صوتی در طراحی آکوستیک سالن سینما**

## ۴- نتیجه

با توجه به داده‌های بدست آمده، همانطور که ملاحظه می‌شود، زمان واخنش در گستره‌ی بسامدی ۲۵۰ Hz – ۸ kHz از مقدار ۰/۷۵ ثانیه فراتر نرفته و از ۰/۷۵ ثانیه کمتر می‌باشد. همچنین میزان شاخص STI برای موقعیت میکروفون‌ها بطور میانگین بیش از ۰/۸ می‌باشد که در محدوده قابلیت فهم کلام عالی قرار می‌گیرد. نتایج محاسبات SPL رسیده به هر موقعیت میکروفون نیز گویای این است که انرژی صوتی بطور یکنواخت در سالن سینما توزیع شده است. این مسائل گویای این موضوع می‌باشند که طراحی آکوستیکی این سالن سینما مطلوب و استاندارد می‌باشد. همچنین یکی از مسائلی که در طراحی آکوستیکی سالن‌های سینما مهم می‌باشد هموار بودن و یکنواختی زمان واخنش در گستره‌ی بسامدها می‌باشد (بخصوص در گستره‌ی گفتار) که همانطور که از نمودارها مشخص است، این مهم نیز در این طراحی لحاظ شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که اجرای طرح آکوستیک ارائه شده در این مقاله که با نرم افزار ODEON انجام شده است، شرایط آکوستیکی فضای مورد نظر را استاندارد و مطلوب خواهد نمود.

## مراجع


۱. قیابکلو، زهرا. "مبانی فیزیک ساختمان ۱ : آکوستیک"، جهاد دانشگاهی ( واحد صنعتی امیرکبیر)، چاپ سوم، ۱۳۸۹.

۲. بینگلی، کورکی. "آکوستیک"، ترجمه محمد حسین دهقان، نشر یزدا، چاپ دوم، ۱۳۸۸ .

۳. مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث هجدهم، "عایق‌بندی و تنظیم صدا" ، ویرایش سوم، ۱۳۹۶.

4. F. Alton Everest, “The Master Handbook of Acoustics”, McGraw-Hill, 2001.

5. Michael Moser. “Engineering Acoustics”, 2009.

6. Thomson Course Technology PTR, “Acoustic Design for the Home Studio”, 2006.

7. William J. Cavanaugh, Gregory C. Tocci, Joseph A. Wilkes, “Architectural Acoustics: Principles and Practice”, 2008.

8. ODEON ROOM ACOUSTICS PROGRAM, User Manual, 2009.