

# مطالعه عددی تأثیر مشخصات چرخ هواپیماهای مسافری در میزان صدمات وارد

## بر روسازی فرودگاه

غلامعلی شفابخش، استادیار دانشگاه سمنان

احسان کاشی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری دانشگاه سمنان

E-mail: eng\_eki@yahoo.com

### چکیده

با توجه به رشد روزافزون صنعت هواپیمایی، مدل‌های مختلفی از هواپیماها روانه بازار شده‌اند که تفاوت آنها در نوع کاربری، وزن، شکل هندسی و نحوه قرارگیری چرخها می‌باشد. در این مقاله به منظور بررسی تأثیر مشخصات چرخ هواپیماهای مسافری ایرباس و بوئینگ بر میزان ضریب خسارات تجمعی روسازیهای صلب و انعطاف‌پذیر، با استفاده از جدیدترین نسخه نرم‌افزار سازمان هوانوردی آمریکا، مطالعه عددی صورت گرفته و میزان صدمات وارد بر روسازی باند پرواز برای هر یک از هواپیماها بدست آمده است. همچنین مقایسه‌ای نیز بین تأثیر نوع هواپیما بر صدمات روسازی انعطاف‌پذیر و صلب باند پرواز صورت گرفته است. آنچنان که نتایج نشان می‌دهد، در میان هواپیماهای مسافری گروه بوئینگ، هواپیمای بوئینگ ۷۷۷ و در میان ایرباسها، هواپیمای ایرباس ۳۴۰ بیشترین صدمات را به روسازی صلب و انعطاف‌پذیر وارد می‌نمایند.

واژه‌های کلیدی: روسازی باند فرودگاه، چرخ هواپیما، ضریب خسارت تجمعی

### ۱. مقدمه

تحلیل و طراحی روسازی باند فرودگاه‌ها بر اساس تئوری لایه‌های ارتجاعی، نرم‌افزار LEDFAA<sup>۱</sup> می‌باشد. این نرم‌افزار که توسط سازمان هوانوردی آمریکا تهیه و آخرین نسخه آن در سال ۲۰۰۴ عرضه گردیده است، در طراحی روسازی صلب، انعطاف‌پذیر و روسازیهای مرکب و انواع روکشها بر اساس استانداردهای طراحی ضخامت روسازی سازمان هوانوردی آمریکا کاربرد دارد [۵]. همچنین این نرم‌افزار از قابلیت‌های منحصر به فردی در تحلیل خرابی روسازی فرودگاه و تعیین سهم هر یک از هواپیماها در میزان صدمات وارد بر روسازی فرودگاه برخوردار است.

### ۲. سوابق تحقیق

تا کنون مطالعات زیادی به منظور بررسی صدمات وارد بر روسازی فرودگاهها و تأثیر انواع مختلف هواپیماها بر آن

مطالعه ترافیک فرودگاه‌ها نشان می‌دهد که همواره طیف وسیعی از هواپیماها، با وزن و آرایشهای گوناگون چرخها از باند فرودگاه نشست و برخاست می‌نمایند. وجود این تفاوتها در انواع مختلف هواپیماها باعث به وجود آمدن خرابیهایی با شدتهای مختلف در سیستم روسازی باند فرودگاه می‌گردد. در این میان فرودگاه‌های پیشرفته دنیا با پیاده‌سازی سامانه مدیریت روسازی فرودگاه<sup>۱</sup>، سعی در کاهش صدمات وارد بر روسازی و حداقل نمودن هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری روسازی فرودگاه دارند [۱]. در این زمینه سازمان هوانوردی آمریکا، مطالعات زیادی را بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی با مقیاس واقعی به انجام رسانیده و به خصوص جهت تعمیم نتایج به نسلهای آینده هواپیماها، با استفاده از مدلسازی‌های دو و سه بعدی در محیط نرم‌افزارهای اجزاء محدود، تحقیقات بسیاری صورت پذیرفته است [۲ و ۳ و ۴]. یکی از نرم‌افزارها در زمینه

### ۳. تعریف مسئله

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر مشخصات چرخ هوایماهای مسافری بوئینگ و ایرباس بر میزان صدمات وارد بر روسازی باند فرودگاه، مطالعه عددی با استفاده از جدیدترین نسخه نرم‌افزار سازمان هوانوردی آمریکا صورت پذیرفته است. در این مطالعه ابتدا توسط نرم افزار، روسازی انعطاف‌پذیر و صلب باند فرودگاه با فرضیات یکسان برای هر یک از هوایماهای ایرباس و بوئینگ طراحی شده و در ادامه نتایج به دست آمده در رابطه با سهم صدمات وارده برای هر یک از هوایماها ارائه شده است.

### ۳-۱ فرضیات ترافیکی مربوط به طراحی روسازی

#### فرودگاه مورد مطالعه

به منظور محاسبه میزان ضریب خسارات تجمعی<sup>۴</sup> بر روسازی باند فرودگاه، فرضیات ترافیکی به شرح جدول ۱ در نظر گرفته شده است. ترافیک مختلط فرودگاه شامل مدل‌های مختلف هوایماهای مسافری گروه ایرباس و بوئینگ بوده و تعداد پرواز سالانه آنها در سال اول برابر با ۱۲۰۰ پرواز فرض شده است. همچنین ضریب رشد سالانه پروازها در فرودگاه مورد مطالعه برابر ۵ درصد فرض شده است.

جدول ۱. فرضیات ترافیکی مربوط به هوایماهای مسافری در

فرودگاه مورد مطالعه

نوع هوایما	تعداد پرواز سالانه	رشد سالانه پروازها	عمر طراحی	تعداد کل پروازها
گروه ایرباس	۱۲۰۰	۵٪	۲۰	۳۶۰۰۰
گروه بوئینگ	۱۲۰۰	۵٪	۲۰	۳۶۰۰۰

تعداد کل عملیات پرواز بر روی سیستم روسازی در دوره طرح از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد [۵، ۱۰]:

$$N = \left(1 + \frac{b \times L}{200}\right) \times a \times L \quad (1)$$

در این رابطه:

N: تعداد کل پروازها،

b: درصد رشد سالانه پروازها،

L: عمر دوره طرح روسازی،

a: تعداد پرواز سالانه هوایماها در سال اول.

صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۹ میلادی سازمان هوانوردی آمریکا با استفاده از آزمایشهای میدانی با مقیاس واقعی و از طریق تسهیلات مربوط به شبیه‌سازی واقعی حرکت هوایما<sup>۲</sup>، انواع مختلف هوایماها را از لحاظ نحوه آرایش چرخها و وزن آنها شبیه‌سازی نموده است [۶]. همچنین در سال ۲۰۰۴ میلادی، Tutumluer و kim در مطالعات بررسی تغییر شکلهای ماندگار روسازی فرودگاه، آزمایشهای بسیاری را بر اساس هوایماهای مسافری B-747 و A-380، B-777-300 و چند نمونه هوایمای نظامی انجام دادند که بر اساس نتایج به دست آمده، هوایمای B-777-300 و A-380 تأثیر زیادی بر روی میزان شیارافتادگی روسازی فرودگاه داشته‌اند [۷].

در سال ۲۰۰۵ میلادی، Wang و Chia-pei بر اساس نتایج تحقیقات میدانی در فرودگاه بین‌المللی Chiang Kai Shek تایوان [۸] و تعمیم نتایج در محیط سه بعدی نرم‌افزار اجزاء محدود، نشان دادند که مشخصات چرخهای اصلی هوایما بر میزان صدمات وارد بر روسازی نقش تعیین‌کننده‌ای داشته و در عمر مفید روسازی و میزان ضخامت دالهای بتنی روسازی مؤثر است. همچنین با شبیه‌سازی حرکت هوایماهای B-777-300 و B-747 نشان داده شد که تنشهای قائم وارد بر روسازی در اثر بارهای استاتیکی، بیشتر از حالت اعمال بارهای دینامیکی می‌باشد.

در سال ۲۰۰۶ میلادی مطالعاتی توسط Joel بر روی چند نرم‌افزار سازمان هوانوردی آمریکا، از جمله LEDFAA و FEDFAA انجام گرفت و با بهره‌گیری از سوابق گذشته تحلیل و طراحی فرودگاه در دنیا و ضرورت توسعه و پیشرفت آن برای نسلهای آینده هوایماهای پهن پیکر، نتایج زیر بیان گردید [۹]:

- لزوم پیش‌بینی وضعیت روسازی فرودگاه‌ها در آینده، با در نظر گرفتن نسلهای جدید هوایماهای پهن‌پیکر و صدمات وارده از طریق هر یک از آنها با استفاده از نرم‌افزارهای فوق‌الذکر در محیط دو و سه بعدی اجزاء محدود، با عنایت به اینکه هوایماهای نسلهای آینده بسیار سنگین‌تر و بزرگتر می‌باشند.

- از اهمیت بیشتر برخوردار شدن تعداد و نحوه چیدمان چرخها با افزایش وزن کل هوایماهای نسلهای آینده و لزوم انتخاب بهترین نوع آرایش هندسی چرخها توسط تولید کنندگان.

## مطالعه عددی تأثیر مشخصات چرخ هواپیماهای مسافری در میزان صدمات وارد بر روسازی فرودگاه

اصلاح شده با سیمان، زیر اساس از سنگدانه‌های خرد شده و بستر طبیعی می‌باشد. همچنین عمر طرح، ۲۰ سال و ضریب عکس‌العمل خاک بستر برابر  $38/38 \text{ MN/m}^3$  در نظر گرفته شده است.

در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر، مدول الاستیسیته بستر، بر اساس میزان CBR از رابطه ۲ تعیین می‌گردد [۱۰]:

$$E = 1500 \text{ CBR} \quad (2)$$

در این رابطه:

$E$ : مدول الاستیسیته بر حسب Psi

در طراحی روسازی صلب باند فرودگاه، زمانی که طراحی با ضریب اطمینان بالا مد نظر باشد، از رابطه ۳ جهت به دست آوردن میزان ضریب عکس‌العمل خاک بستر ( $k$ )، استفاده می‌شود [۵]:

$$E_{SG} = 26 K^{1.284} \quad (3)$$

در این رابطه:

$E_{SG}$ : مدول الاستیسیته بستر بر حسب Psi و

$K$ : ضریب عکس‌العمل خاک بستر بر حسب Pci

بر اساس رابطه ۱ و فرضیات جدول ۱، تعداد کل عملیات پرواز بر روی سیستم روسازی در طول دوره طراحی عبارت است از:

$$N = \left(1 + \frac{5 \times 20}{200}\right) \times 1200 \times 20 = 36000$$

### ۲-۳ فرضیات سازه‌ای در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر

#### و صلب

پس از تعیین مشخصات ترافیکی مربوط به فرودگاه، لازم است فرضیات سازه‌ای شامل تعداد و جنس لایه‌ها نیز جهت طراحی روسازی صلب و انعطاف‌پذیر باند فرودگاه تعیین گردند. مفروضات سازه‌ای به کار رفته عبارتند از:

- سیستم روسازی انعطاف‌پذیر باند فرودگاه مطابق جدول ۲، یک سیستم چهار لایه متشکل از رویه بتن آسفالتی، اساس تثبیت شده، زیر اساس از سنگدانه‌های خرد شده و بستر طبیعی می‌باشد. همچنین عمر طراحی برابر ۲۰ سال و ضریب باربری کالیفرنیا<sup>۹</sup> برای خاک بستر برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است.
- سیستم روسازی صلب باند فرودگاه مطابق جدول ۳، یک سیستم چهار لایه متشکل از رویه بتنی از سیمان پرتلند، اساس

جدول ۲. مشخصات و جنس لایه‌های روسازی انعطاف‌پذیر

نام لایه	جنس لایه	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون
P-401 AC Surface (Asphalt Concrete)	رویه بتن آسفالتی	۱۳۷۸/۹۵	۰/۳۵
P-401 St flex (Stabilized flexible)	اساس تثبیت شده	۲۷۵۷/۹۰	۰/۳۵
P-209 Cr Ag (Crushed Aggregate)	زیر اساس از سنگدانه‌های خرد شده	۳۶۸/۰۴	۰/۳۵
Subgrade	بستر طبیعی	۱۰۳/۴۲	۰/۳۵

جدول ۳. مشخصات و جنس لایه‌های روسازی صلب

عنوان	جنس لایه	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت خمشی بتن (MPa)	ضریب پواسون
PCC Surface (Portland Cement Concrete)	رویه بتنی از سیمان پرتلند	۲۷۵۷۹/۰۳	۴/۸۳	۰/۱۵
P-304 CTB (Cement Treated Base)	اساس اصلاح شده با سیمان	۳۴۴۷/۳۸	۰	۰/۲۰
P-209 Cr Ag (Crushed Aggregate)	زیر اساس از سنگدانه‌های خرد شده	۲۴۴/۲۷*	۰	۰/۳۵
Subgrade	بستر طبیعی	۱۰۳/۴۲	۰	۰/۴۰

\* میزان مدول الاستیسیته برای لایه سنگدانه‌ای توسط نرم افزار تعیین می‌گردد و نمی‌توان آن را تغییر داد. همچنین لایه‌های سنگدانه‌ای ضخیم‌تر از ۲۱۰mm برای سنگدانه‌های خرد نشده و ضخیم‌تر از ۲۶۰mm برای سنگدانه‌های خرد شده، بصورت خودکار به لایه‌های نازک‌تر تقسیم می‌شوند.

لیست ترافیک مختلط تقسیم می‌شود. به عبارت دیگر هر کدام از هواپیماها سهمی از خسارت تجمعی داشته و در پایان مراحل طراحی، جمع ضریب CDF برای کل هواپیماها برابر ۱ می‌گردد. این ضریب نشان دهنده میزان صدمات ناشی از ترافیک مختلط بر روسازی باند فرودگاه است. بدین صورت که اگر  $CDF < 1$  باشد از عمر روسازی هنوز باقی مانده و روسازی بطور جدی دچار صدمه نشده است. اگر  $CDF = 1$  باشد از تمام عمر مفید روسازی استفاده شده و اگر  $CDF > 1$  باشد تحمل روسازی پایان یافته و روسازی صدمه دیده است [۵].

در این تحقیق، به منظور تعیین میزان ضریب خسارات تجمعی برای هر یک از هواپیماهای مسافری گروه ایرباس و بوئینگ، طراحی روسازی صلب و انعطاف‌پذیر باند فرودگاه بطور مجزا، با مفروضات یکسان توسط نرم‌افزار صورت پذیرفته و نتایج حاصل از طراحی و میزان سهم CDF برای هر یک از هواپیماها در جداول و نمودارهای مربوطه ارائه شده است.

#### ۴-۱ سهم ضریب خسارات تجمعی برای هر یک از

##### هواپیماهای گروه ایرباس

بر اساس مفروضات ترافیکی و سازه‌ای بیان شده در قسمتهای قبل، طراحی روسازی انعطاف‌پذیر و صلب برای هواپیماهای مسافری گروه ایرباس صورت پذیرفته و ضخامت هر یک از لایه‌ها و در نهایت ضخامت کل سیستم روسازی باند فرودگاه مطابق جداول ۴ و ۵ بدست آمده است.

روابط ۲ و ۳ برای تبدیل CBR و k به مدول الاستیسیته بستر بر اساس اطلاعات تجربی می‌باشند. علاوه بر این روابط، جهت محاسبه مدول الاستیسیته بستر از نتایج آزمایشگاهی یا اطلاعات حاصل از آزمایشهای غیر مخرب نیز می‌توان استفاده کرد. با جایگذاری مقادیر  $CBR = 10$  و  $k = 38/38 MN/m^3$  و تبدیل آنها به سیستم واحد انگلیسی در معادلات ۲ و ۳ مقدار  $E_{SG}$  حاصل از هر دو رابطه برابر با  $15,000 Psi$  (معادل  $103/42 MPa$ ) می‌گردد. علت مساوی فرض کردن مدول الاستیسیته بستر در مورد هر دو نوع روسازی انعطاف‌پذیر و صلب آن است که سعی گردیده است تا شرایط طراحی هر دو نوع روسازی تا حد امکان یکسان در نظر گرفته شود تا مقایسه نتایج حاصله در شرایط برابر انجام گیرد.

#### ۴. تعیین سهم ضریب خسارات تجمعی برای هر یک از هواپیماهای مسافری گروه ایرباس و بوئینگ

در پایان مراحل طراحی روسازی، نرم‌افزار ضریبی را نیز تحت عنوان ضریب خسارت تجمعی (CDF) برای هر یک از هواپیماها ارائه می‌دهد که بیانگر میزان صدمات وارد بر روسازی باند فرودگاه بعد از گذشتن دوره عمر روسازی است. این ضریب برای روسازیهای تحت خدمت، مقداری بین صفر تا یک داشته و بصورت تجمعی بین هواپیماهای موجود در

جدول ۴. ضخامت لایه‌های روسازی صلب برای گروه ایرباس

جنس لایه	رویه بتنی از سیمان پرتلند	اساس اصلاح شده با سیمان	زیر اساس از سنگدانه‌های خرد شده	ضخامت کل
ضخامت (mm)	۴۲۴/۷	۱۵۲/۴	۱۵۲/۴	۷۲۹/۵

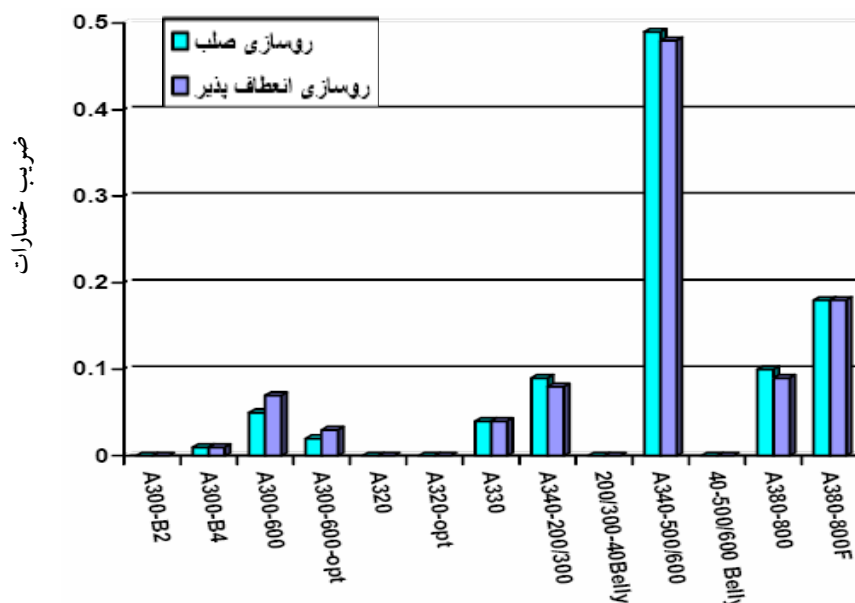
جدول ۵. ضخامت لایه‌های روسازی انعطاف‌پذیر برای گروه ایرباس

جنس لایه	رویه بتن آسفالتی	اساس تثبیت شده	زیر اساس از سنگدانه‌های خرد شده	ضخامت کل
ضخامت (mm)	۱۲۷	۲۰۳/۲	۳۸۹/۲	۷۱۹/۴

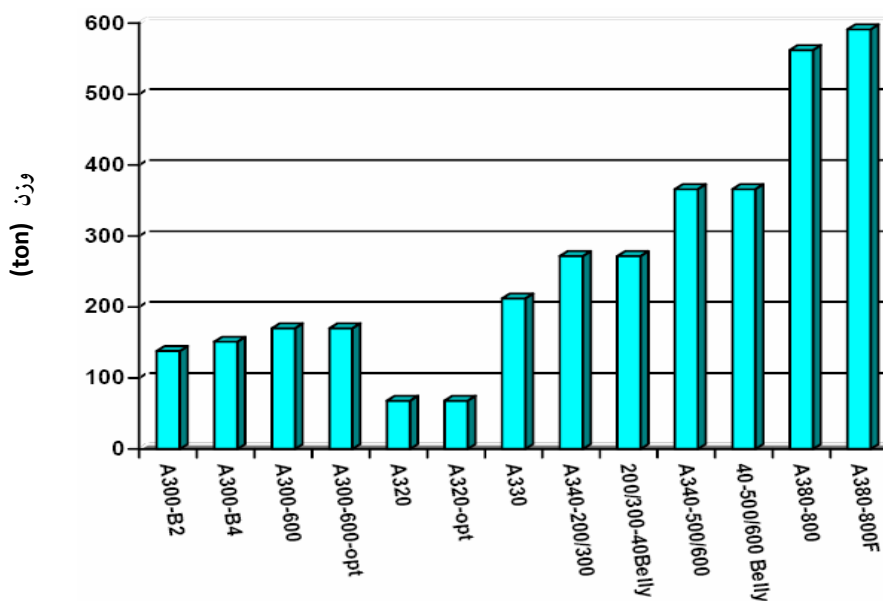
## مطالعه عددی تأثیر مشخصات چرخ هواپیماهای مسافری در میزان صدمات وارد بر روسازی فرودگاه

نکته جالب توجه اینکه برخی از هواپیماها در این دسته هیچ سهمی را از میزان CDF ندارند و این ضریب برای آنها صفر می باشد. این موضوع برای هواپیمای A320 به دلیل وزن کم آن و برای سایر هواپیماها به دلیل آرایش خاص چرخهای آن می باشد. در شکل های ۲ و ۳ مقایسه وزن و فشار باد چرخهای هر یک از هواپیماهای مسافری گروه ایرباس نشان داده شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده از نرم افزار، سهم CDF در روسازی صلب و انعطاف پذیر باند فرودگاه برای هر یک از هواپیماهای این گروه در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در نمودار شکل ۱ نشان می دهد که هواپیمای ایرباس مدل A340-500/600 بیشترین سهم CDF را در بین سایر هواپیماهای مدل ایرباس دارد و پس از آن هواپیمای مدل A380-800F و A380-800 بیشترین سهم را دارا می باشند.

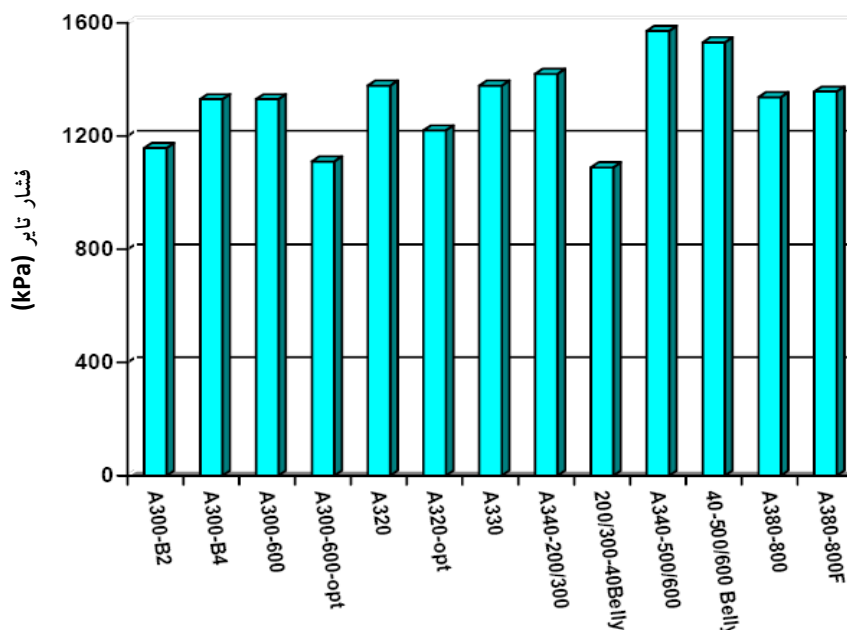


شکل ۱. نمودار سهم هر یک از انواع مختلف هواپیمای گروه ایرباس در میزان ضریب خسارات تجمعی



شکل ۲. نمودار وزن کل هواپیماهای گروه ایرباس [۵]

## شفابخش و کاشی



شکل ۳. نمودار فشار باد چرخ هواپیماهای گروه ایرباس [۵]

جدول ۶. ضخامت لایه‌های روسازی صلب برای گروه بوئینگ

جنس لایه	رویه بتنی از سیمان پرتلند	اساس اصلاح شده با سیمان	زیر اساس از سنگدانه‌های خرد شده	ضخامت کل
ضخامت (mm)	۴۱۸/۶	۱۵۲/۴	۱۵۲/۴	۷۲۳/۴

جدول ۷. ضخامت لایه‌های روسازی انعطاف‌پذیر برای گروه بوئینگ

جنس لایه	رویه بتن آسفالتی	اساس تثبیت شده	زیر اساس از سنگدانه‌های خرد شده	ضخامت کل
ضخامت (mm)	۱۲۷	۲۰۳/۲	۴۱۳/۹	۷۴۴/۱

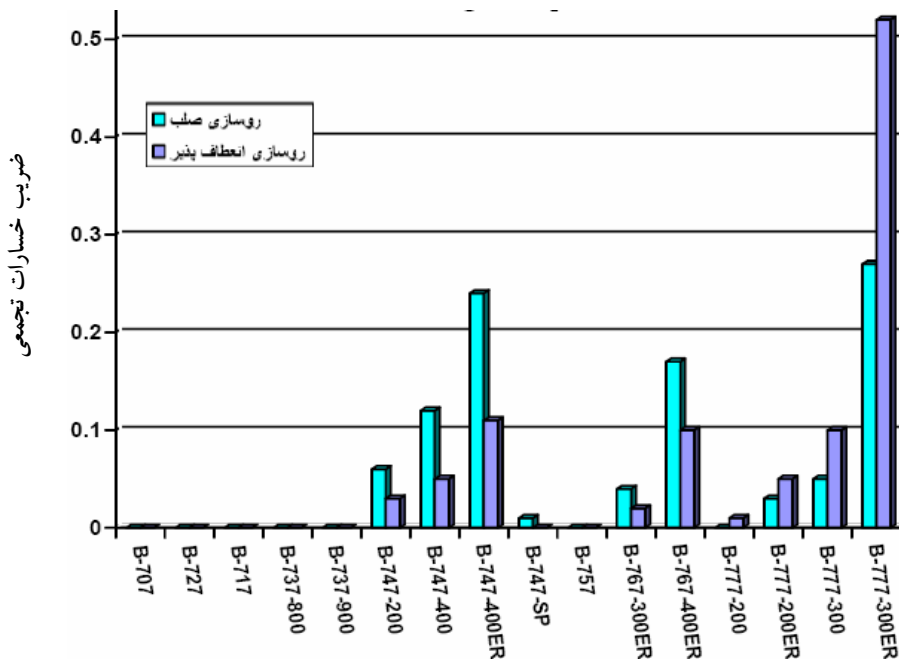
۴-۲ سهم ضریب خسارات تجمعی برای هر یک از

### هواپیماهای گروه بوئینگ

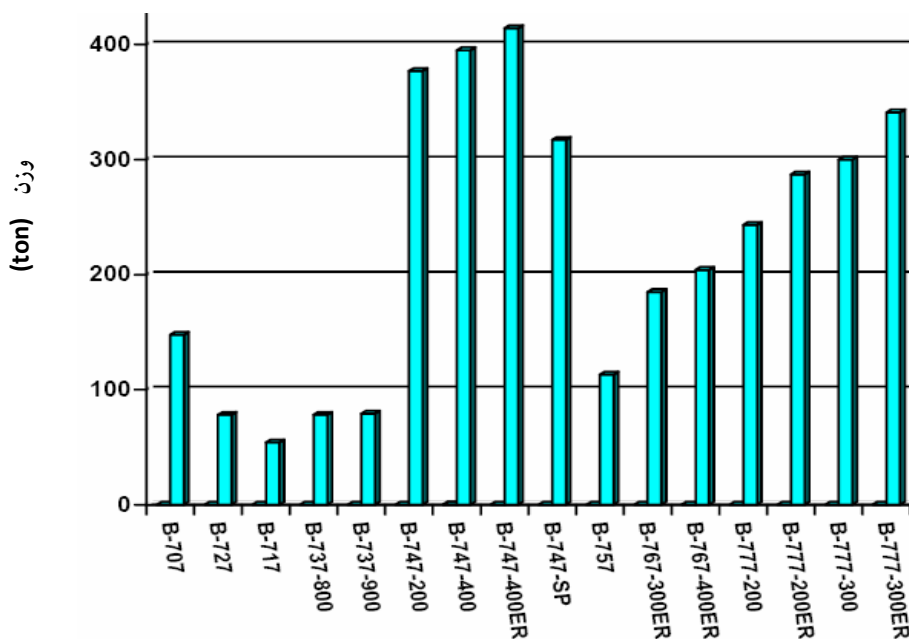
بر اساس مفروضات ترافیکی و سازه‌ای بیان شده، طراحی روسازی انعطاف‌پذیر و صلب باند فرودگاه برای هواپیماهای مسافری گروه بوئینگ نیز صورت پذیرفته و ضخامت هر یک از لایه‌ها و در نهایت ضخامت کل سیستم روسازی مطابق جداول ۶ و ۷ بدست آمده است. بر اساس نتایج بدست آمده از نرم افزار، سهم CDF در روسازی صلب و انعطاف‌پذیر باند فرودگاه برای هر یک از هواپیماهای این گروه در شکل ۴ نشان داده شده است.

همانطور که در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است، هواپیماهای ایرباس مدل A380-800 و A380-800F بیشترین وزن کل را داشته و هواپیماهای A-320 و A-320-opt کمترین وزن را در این گروه به خود اختصاص داده‌اند. در نمودار شکل ۳ مقایسه‌ای بین فشار باد تایر هواپیماهای مسافری گروه ایرباس صورت گرفته است. با توجه به نمودار، هواپیمای مدل A340-500/600 دارای بیشترین فشار باد تایر به میزان ۱۵۷۲kPa است. با مقایسه نتایج نمودار شکل ۳ و شکل ۱ می‌توان به تأثیر فشار باد تایر هواپیما در افزایش میزان ضریب خسارات تجمعی هر یک از هواپیماها پی برد.

مطالعه عددی تأثیر مشخصات چرخ هواپیماهای مسافری در میزان صدمات وارد بر روسازی فرودگاه



شکل ۴. نمودار سهم هر یک از انواع مختلف هواپیمای گروه بوئینگ در میزان ضربه خسارت تجمعی

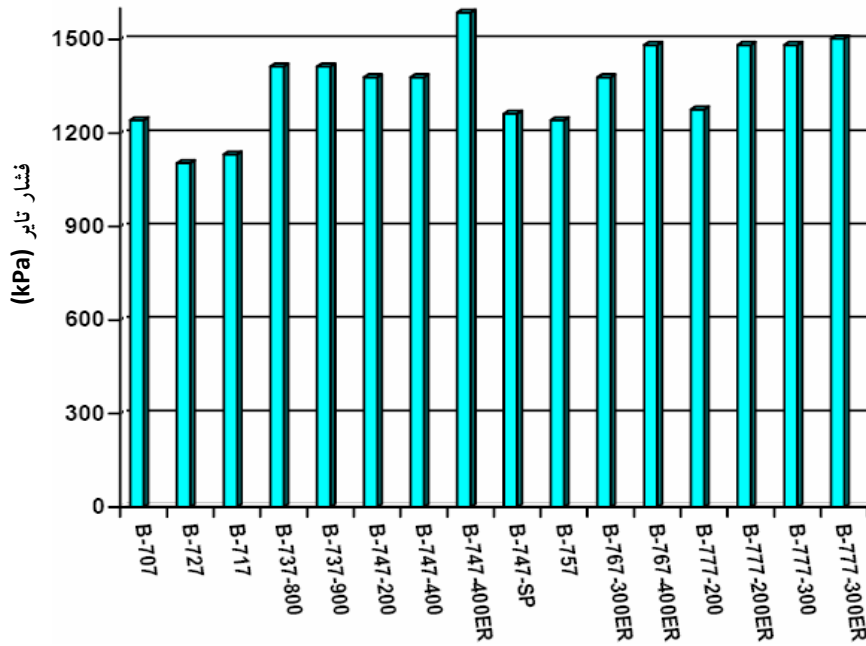


شکل ۵. نمودار وزن کل هواپیماهای گروه بوئینگ [۵]

بوئینگ ۷۱۷، ۷۲۷ و ۷۳۷ به دلیل وزن کم آن و برای سایر هواپیماها نظیر بوئینگ ۷۰۷ به دلیل آرایش خاص چرخهای آن است [۱۱]. در شکلهای ۵ و ۶ مقایسه وزن و فشار باد چرخهای هر یک از هواپیماهای مسافری گروه بوئینگ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۴ مشخص است، هواپیمای بوئینگ مدل B-777-300ER بیشترین سهم CDF را در بین سایر هواپیماهای مدل بوئینگ دارد و پس از آن هواپیمای مدل B-747-400ER بیشترین سهم را دارا است. همچنین برخی از هواپیماها در این دسته هیچ سهمی را از میزان CDF ندارند و این ضربه برای آنها صفر است. این موضوع برای هواپیمای

شفابخش و کاشی



شکل ۶. نمودار فشار باد چرخ هواپیماهای گروه بوئینگ [۵]

جدول ۸. مشخصات و فرضیات مربوط به مدل‌های مختلف انتخاب شده از گروه ایرباس و بوئینگ

مدل هواپیما	وزن ناخالص (tns)	فشار باد چرخ‌ها (kPa)	تعداد پرواز سالیانه	درصد رشد پروازها	عمر طراحی	درصد وزن روی چرخ‌های اصلی
B-747-200	۳۷۷/۸۴	۱۳۷۹	۱۲۰۰	۵	۲۰	۹۵
B-747-400	۳۹۵/۹۸	۱۳۷۹	۱۲۰۰	۵	۲۰	۹۵
B-747-400ER	۴۱۴/۱۲	۱۵۸۶	۱۲۰۰	۵	۲۰	۹۵
B-767-300ER	۱۸۵/۵۲	۱۳۷۹	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
B-767-400ER	۲۰۴/۵۷	۱۴۸۲	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
B-777-200	۲۴۳/۵۸	۱۲۷۶	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
B-777-200ER	۲۸۷/۸۰	۱۴۸۲	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
B-777-300	۳۰۰/۲۷	۱۴۸۲	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
B-777-300ER	۳۴۱/۱۰	۱۵۰۳	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
A300-600	۱۷۰/۰۹	۱۳۳۱	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
A300-600-opt	۱۷۰/۰۹	۱۱۱۰	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
A330	۲۱۲/۷۳	۱۳۷۹	۱۲۰۰	۵	۲۰	۴۷/۵
A-340-500/600	۳۶۶/۲	۱۵۷۲	۱۲۰۰	۵	۲۰	۳۲/۹
A-340-500/600Belly	۳۶۶/۲	۱۵۳۱	۱۲۰۰	۵	۲۰	۲۹/۳
A380-800	۵۶۲	۱۳۳۸	۱۲۰۰	۵	۲۰	۹۵/۰
A380-800F	۵۹۲	۱۳۵۸	۱۲۰۰	۵	۲۰	۹۵/۰



## مطالعه عددی تأثیر مشخصات چرخ هواپیماهای مسافری در میزان صدمات وارد بر روسازی فرودگاه

در این بخش به جهت تعمیم نتایج فوق، با استفاده از فرضیات مراحل قبل، از میان ۱۱ مدل هواپیمای ایرباس و ۱۶ مدل هواپیمای بوئینگ موجود در نرم افزار، ۱۵ مدل هواپیما را که دارای بیشترین میزان CDF بودند انتخاب نموده و مشخصات و فرضیات ترافیکی مربوط به طراحی برای این گروه هواپیماها به شرح جدول ۸ ارائه شده است.

با اعمال اطلاعات جدول فوق در پایگاه داده‌های نرم‌افزار و طراحی روسازی باند فرودگاه در دو حالت صلب و انعطاف پذیر بر اساس فرضیات سازه‌ای و ترافیکی بیان شده در قسمتهای قبل، نتایجی مطابق شکل ۷ به دست می‌آید. نتایج حاصل از طراحی نشان می‌دهد که برای ترافیک مختلط ارائه شده، ضخامت روسازی انعطاف‌پذیر بیشتر از صلب می‌باشد. بر این اساس در جدول ۹، ضخامت هر یک از لایه‌های سیستمهای روسازی به‌طور مجزا نشان داده شده است.

همانطور که در نمودار شکل ۵ نمایان است هواپیماهای بوئینگ B-747-200 و B-747-400 و B-747-400ER بیشترین وزن کل را داشته و بوئینگ ۷۱۷، ۷۲۷ و ۷۳۷ کمترین وزن را در این گروه به خود اختصاص داده‌اند. همچنین با توجه به نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود که هواپیمای مدل B-747-400ER دارای بیشترین فشار باد تایر به میزان  $1058 \text{ kPa}$  می‌باشد که با مقایسه نتایج شکل ۴ و ۶ می‌توان به تأثیر فشار باد تایر هواپیما در افزایش میزان ضریب خسارات تجمعی هر یک از هواپیماها پی برد. البته نتایج نمودار شکل ۶ به یکدیگر نزدیک بوده و از این رو نمی‌توان با قاطعیت قضاوت کرد و نتایج قطعی نیاز به مطالعات و بررسی روی چندین گروه هواپیما با فشار باد تایر متفاوت است.

### ۵. مقایسه روسازی صلب و انعطاف‌پذیر در میزان

#### CDF در ترافیک هواپیماهای مسافری مختلط

Airbus_Boeing	NewRigid	Des. Life = 20
Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
PCC Surface	443.6	4.83
P-304 CTB	152.4	3,447.38
P-209 Cr Ag	152.4	244.27
Subgrade	k = 38.38	103.42
Total thickness to the top of the subgrade, t = 748.4 mm		

Airbus_Boeing	NewFlexible	Des. Life = 20
Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
P-401 AC Surface	127.0	1,378.95
P-401 St (flex)	203.2	2,757.90
P-209 Cr Ag	459.7	389.42
Subgrade	CBR = 10.0	103.42
Total thickness to the top of the subgrade, t = 789.9 mm		

شکل ۷. نتایج حاصل از طراحی روسازی صلب و انعطاف‌پذیر

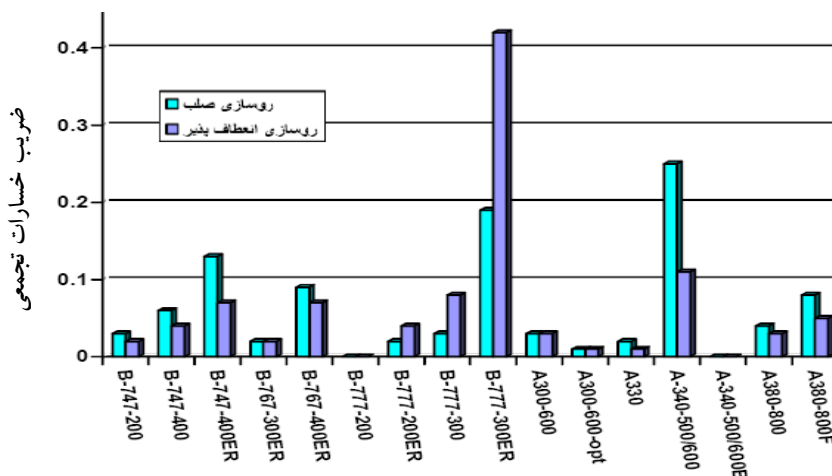
جدول ۹. ضخامت لایه‌های روسازی انعطاف‌پذیر و صلب برای گروه مختلط

جنس لایه	رویه	اساس	زیر اساس	بستر	ضخامت کل روسازی
ضخامت انعطاف‌پذیر (mm)	۱۲۷	۲۰۳/۲	۴۵۹/۷	-	۷۸۹/۹
ضخامت صلب (mm)	۴۴۳/۶	۱۵۲/۴	۱۵۲/۴	-	۷۴۸/۴

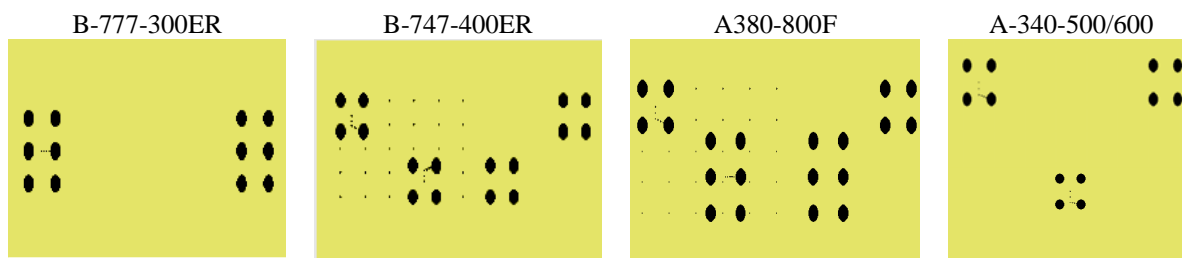
یک نوار از سطح روسازی به عرض چرخها به صورت مکرر صورت پذیرفته و این تکرار حرکت چرخها باعث تشدید میزان صدمات وارده در روسازی انعطاف پذیر می گردد [۱۴]. عملکرد روسازی، توزیع بار وارده بر روی سطح بزرگتری از بستر است که این سطح نسبت به سطح تماس چرخ بر روی روسازی وسیعتر می باشد. توزیع بار در روسازی صلب و انعطاف پذیر بر اساس تئوری لایه های ارتجاعی متفاوت است. توزیع بار در روسازی صلب به دلیل سختی جنس لایه ها در سطح وسیعتری نسبت به روسازی انعطاف پذیر صورت می پذیرد و این امر باعث می گردد تا در مورد هواپیماهای بوئینگ میزان ضریب خسارات تجمعی در روسازی انعطاف پذیر، بیشتر از روسازی صلب باشد [۱۵]. در روسازی صلب نیز سهم هواپیماهای ایرباس مدل A-340-500/600 بیشتر از سایر هواپیماهای مسافری ایرباس و بوئینگ می باشد که این امر به این دلیل می باشد که بیشترین وزن بر روی هر چرخ در حدود ۳۰/۵ تن مربوط به این هواپیما است. همچنین در این مدل از ایرباس همانگونه که در جدول ۸ نیز بیان گردید، بر خلاف سایر هواپیماها ۶۶ درصد از وزن کل توسط چرخهای اصلی و ۳۳ درصد آن توسط چرخهای دماغه تحمل می شود.

پس از طرح روسازی صلب و انعطاف پذیر باند فرودگاه برای یک گروه هواپیما شامل ۱۵ مدل ایرباس و بوئینگ، نتایج میزان ضریب خسارات تجمعی بصورت نمودار شکل ۸ برای هریک از حالات صلب و انعطاف پذیر نشان داده شده است.

آنچنان که نمودار شکل ۸ نشان می دهد، در روسازی صلب، هواپیماهای ایرباس مدل A-340-500/600 با ۲۵ درصد و هواپیماهای بوئینگ مدل B-777-300ER با ۱۹ درصد، به ترتیب بیشترین سهم از میزان ضریب خسارات تجمعی را به خود اختصاص داده اند. همچنین در روسازی انعطاف پذیر، هواپیماهای بوئینگ مدل B-777-300ER با ۴۲ درصد سهم قبل ملاحظه ای از میزان ضریب خسارات تجمعی را به خود اختصاص داده است. در میان کلیه هواپیماهای مسافری ایرباس و بوئینگ، هواپیماهای B-777-300ER بیشترین سهم از میزان ضریب خسارات تجمعی در روسازی انعطاف پذیر را به خود اختصاص داده که این عامل به دلیل نوع آرایش خاص چرخهای این هواپیما است [۱۲ و ۱۳]. در شکل ۹ نحوه آرایش چرخهای ۴ نوع هواپیما مسافری نشان داده شده است. نحوه آرایش چرخهای هواپیماهای بوئینگ B-777-300ER (تاندوم زوج ۳ تایی)، باعث گشته تا تداوم اعمال بار بر روی



شکل ۸. نمودار مقایسه میزان CDF در روسازی صلب و انعطاف پذیر در ترافیک مختلط



شکل ۹. تعداد و نحوه آرایش چرخ های برخی هواپیماهای بوئینگ و ایرباس [۵]

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان صدمات وارده بر روسازی ناشی از نشست و برخاست هواپیماها، نحوه آرایش چرخها است. نوع آرایش چرخها در هواپیماهای با وزن بالا باید به گونه‌ای باشد که انتقال بار هواپیما توسط چرخها بر روی سطح وسیعتری از روسازی صورت پذیرد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که هر چه آرایش چرخها گسترده‌تر باشد، میزان ضریب خسارات تجمعی برای آن هواپیما کمتر بوده و بر عکس هر چه آرایش چرخها در سطح محدودتری متمرکز باشد، میزان صدمات وارده افزایش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۱ بیان گردید، اختلاف کمی در میزان CDF گروه ایرباس در روسازی صلب و انعطاف پذیر وجود دارد که این عامل از دو جهت قابل بررسی است:

- در میان کلیه هواپیماهای گروه ایرباس، هواپیمای A-340-500/600 به دلیل وزن زیاد و تعداد کم چرخها، دارای بیشترین مقدار وزن بر روی هر چرخ بوده و این امر باعث گردیده تا سهم قابل ملاحظه‌ای از میزان CDF را به خود اختصاص دهد.

- نحوه آرایش چرخهای A-340-500/600 به صورت ۳ دسته تاندم زوج ۲ تایی و جمعاً ۱۲ چرخ می‌باشد. آرایش چرخهای این هواپیما نسبت به سایر هواپیماها حالت منظم‌تری داشته و سطح تماس چرخها با روسازی نیز وسیعتر بوده و این مسئله باعث تعدیل نیروهای وارده می‌گردد. ضمناً در حین حرکت هواپیما بر روی یک نوار از سطح روسازی به عرض چرخ، تنها ۲ چرخ بطور مشترک یکی پس از دیگری عبور می‌نمایند که این عامل خود باعث گردیده تا در روسازی صلب و انعطاف‌پذیر اختلاف میزان CDF بسیار ناچیز باشد.

نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که هواپیمای B-777-300ER با ۵۲ درصد، سهم قابل توجهی از میزان CDF را در روسازی انعطاف‌پذیر به خود اختصاص داده است. ولی در روسازی صلب سهم این هواپیما تقریباً نصف شده و به میزان ۲۷ درصد می‌رسد که تقریباً با هواپیمای B-747-400ER که دارای سهم ۲۴ درصد است نزدیک می‌باشد. اختلاف CDF هواپیمای B-777-300ER در روسازی صلب و انعطاف‌پذیر را می‌توان ناشی از نحوه آرایش چرخها دانست. زیرا مدل چرخهای این هواپیما بصورت تاندم زوج سه تایی یعنی ۱۲ چرخ بر روی ۴

محور سه تایی است. این نوع نحوه آرایش از ۲ جهت قابل بررسی است:

- سطح تماس چرخها بر روسازی باند پرواز تنها شامل ۴ نوار به عرض چرخها می‌باشد که کلیه چرخها بر روی آن حرکت نموده و نیروهای وارده را یکی پس از دیگری انتقال می‌دهند. این عامل باعث تشدید صدمات وارده تنها به قسمتهای خاصی از سطح روسازی می‌گردد.

- در طراحی روسازی باند فرودگاه توسط نرم‌افزار، با در نظر گرفتن مقاومت خمشی بتن و مدول الاستیسیته مصالح، ضخامت رویه بتن آسفالتی در روسازی انعطاف‌پذیر برابر ۱۲۷ میلیمتر و ضخامت رویه بتنی در روسازی صلب ۴۴۳/۶ میلیمتر می‌باشد. ضخامت و صلیبت بالای رویه بتنی در روسازی صلب باعث گشته تا میزان صدمات وارده از طرف هواپیمای B-777-300ER در روسازی انعطاف‌پذیر بیشتر از صلب باشد. همچنین توزیع بار در روسازی صلب به دلیل سختی جنس لایه‌ها در سطح وسیع‌تری نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر صورت می‌پذیرد و این امر باعث گشته تا در هواپیمای B-777-300ER میزان ضریب خسارات تجمعی در روسازی انعطاف‌پذیر بیشتر از صلب باشد.

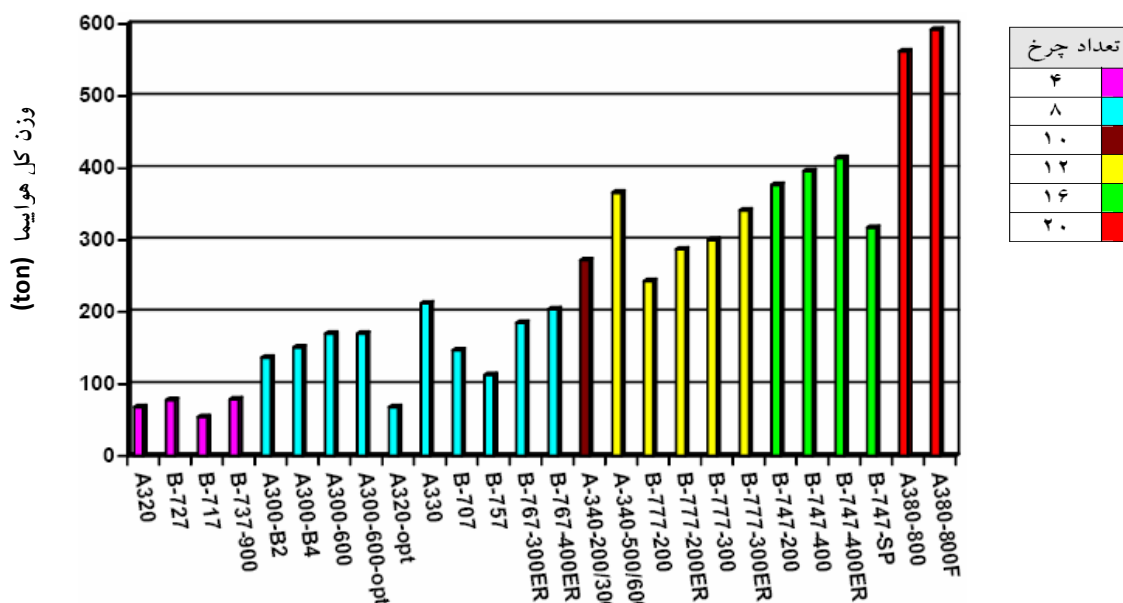
در نمودار شکل ۱۰ هواپیماهای مسافری گروه ایرباس و بوئینگ بر حسب وزن و تعداد چرخهایشان طبقه‌بندی شده‌اند. با بهره‌گیری از این نمودار می‌توان اثر وزن، تعداد و نحوه آرایش چرخها را بر میزان صدمات وارده بر روسازی باند فرودگاه بررسی نمود.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، با اینکه هواپیمای B-747-400ER دارای وزن کل و میانگین وزن هر چرخ بیشتری نسبت به هواپیمای B-777-300ER است، ولی آرایش گسترده چرخهای آن بر سطح روسازی باعث گردیده تا اثرات تخریبی آن بر روسازی کمتر از بوئینگ ۷۷۷ گردد که این عامل ناشی از آرایش خطی و متمرکز چرخهای بوئینگ ۷۷۷ است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد آرایش چرخها بصورت تاندم زوج ۳ تایی باعث گشته تا تداوم اعمال بار بر روی نواری از سطح روسازی به عرض چرخها بصورت مکرر صورت پذیرفته و این تکرار حرکت چرخها باعث تشدید میزان صدمات وارده در روسازی انعطاف‌پذیر باند پرواز می‌گردد. از آنجا که ضخامت لایه رویه بتن آسفالتی در روسازی انعطاف‌پذیر باند

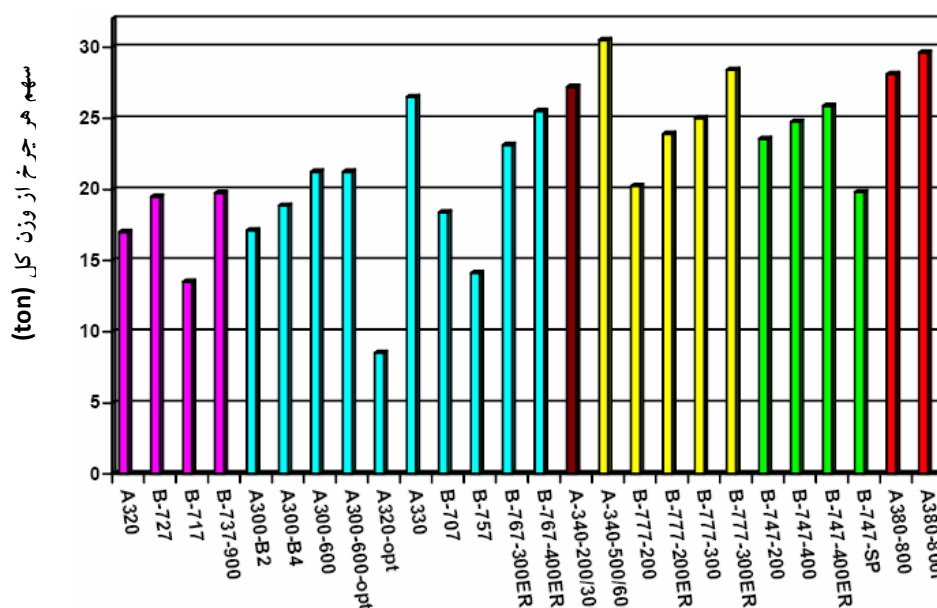
## شفابخش و کاشی

پرواز کم است، این مسأله باعث گردیده تا سهم تخریبی این هواپیما در روسازی انعطاف‌پذیر بیشتر از صلب باشد. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، هواپیماهای ایرباس ۳۸۰ و بوئینگ ۷۴۷ دارای بیشترین وزن کل می‌باشند. اما همانطور که در قسمتهای قبل بیان گردید، هیچیک از هواپیماهای ایرباس ۳۸۰ و بوئینگ ۷۴۷ در میزان ضریب خسارات جمعی دارای بیشترین درصد نمی‌باشند. این امر نشان می‌دهد که عامل وزن هواپیما به تنهایی تأثیرگذار نبوده و تعداد چرخها و نحوه آرایش آنها نیز در میزان ضریب خسارات

تجمعی نقش دارند. همچنین نحوه آرایش چرخها باید به گونه‌ای باشد که همانند هواپیمای بوئینگ ۷۷۷، مسیر حرکت چرخها بر روسازی باند بصورت مشترک صورت نگیرد و باعث تشدید صدمات وارده به سطح مورد نظر نگردد. بدین منظور با داشتن وزن کل هر یک از هواپیماها و تعداد چرخهای اصلی آنها می‌توان بار ناشی از وزن هواپیما را بر روی هر یک از چرخها بدست آورد. این عمل برای کلیه هواپیماهای مسافری بوئینگ و ایرباس صورت پذیرفته و نمودار آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. نمودار تفکیک تعداد چرخ و وزن کل هواپیماهای مسافری ایرباس و بوئینگ [۵]



شکل ۱۱. نمودار سهم هر چرخ از وزن کل، برای هواپیماهای مسافری ایرباس و بوئینگ

6- Garg, N. and W. H. Marsey. (2002). "Comparison Between Falling Weight Deflectometer and Static Deflection Measurements on Flexible Pavement at the National Airport Pavement Facility (NAPTF)". Paper presented at the 2002 Federal Aviation Administration Airport Technology Conference, Chicago, IL.

7- Erol Tutumluer & In Tai Kim, (2004). "Permanent Deformation Behavior of Airport Pavement Base and Subbase Courses" University of Illinois, Urbana-Champaign November 9, 2004.

8- Chia-pei & Shih-ying Wang. (2005). "The Development and Application of Finite Element Model in the Chiang-Kai-Shek International Airport". Preceding the 8th Int'l Conference on Concrete Pavements, August 10-12, 2005. Colorado, USA.

9- Rodney N. Joel, (2006) "FAA Rigid Pavement and Tools Design Philosophy" Northwest Region Airports Conference, April 10, 2006.

10- US Army and Air Force (1989), "Flexible pavement design for airfields. (Elastic Layer Method)", Technical Manual TM 5-825-2-1/AFM 88.

11- Gomez-Ramirez, F. M., and M. R. Thompson. (2002). "Characterizing Aircraft Multiple Wheel Load Interaction for Airport Flexible Pavement Design". Civil Engineering Studies, COE Report. University of Illinois at Urbana-Champaign.

12- Gopalakrishnan, K. and M. R. Thompson. (2004). "Comparative Effect of B777 and B747 Trafficking on Elastic Layer Moduli of NAPTF Flexible Pavements". In Proceedings of the 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, NJ.

13- Gervais, E. L., G. F. Hayhoe, and N. Garg. (2003) "towards a Permanent Solution for 6-Wheel Landing Gear Aircraft". Proceedings of the 2003 ASCE Airfield Specialty Conference, Las Vegas, NV.

14- Chou, C.P., H.J. Cheng, and M.H. Lee, (2007) "Analysis of Transverse Traffic Distribution of Taxiway", in 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board. 2007: Washington, D. C.

15- Rodney N. Joel, (2008), "Flexible Pavement FAARFIELD Design Criteria", FAA Southwest Region Partnership Conference, USA.

همانطور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ بیان گردید، هواپیمای A380-800F دارای وزنی در حدود ۵۹۲ تن می‌باشد. اما به لحاظ داشتن ۲۰ چرخ این وزن تعدیل گشته و هر یک از چرخها وزنی در حدود ۲۹/۶ تن را تحمل می‌کنند. این عدد برای هواپیمای ایرباس مدل A-340-500/600 که ۱۲ چرخ دارد، در حدود ۳۰/۵ تن است که با توجه به وزن تقریبی ۳۶۶ تنی این هواپیما، سهم هر یک از چرخها در انتقال وزن هواپیما به روسازی بسیار بیشتر از ایرباس ۳۸۰ می‌باشد که و این امر باعث افزایش میزان ضریب خسارات تجمعی در هواپیمای A-340-500/600 گردیده است.

## ۷. پانویس‌ها

- 1- Airport Pavement Management System (APMS)
- 2-Layered Elastic Design Federal Aviation Administration (LEDFAA)
- 3- National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)
- 4- Cumulative Damage Factor (CDF)
- 5- California Bearing Rate (CBR)

## ۸. مراجع

- 1-Navneet Garg, (2008) "Introduction to FAA's national airport pavement test facility (NAPTF)" workshop – accelerated pavement testing for airport pavements and its impact on pavement design for new generation aircraft, Presented to 3rd Intl. Conf. on APT, Madrid, Spain, September 30, 2008.
- 2- M. Willis, D. Johnson and B. Sukumaran, (2006) "Three –Dimensional Finite Element Analyses of Flexible Airport Pavement for the Next Generation of Aircrafts". Minnesota Department of Transportation, USA, 2006.
- 3- Gopalakrishnan, K. and M. R. Thompson. (2003). "Rutting Study of NAPTF Flexible Pavement Test Sections". In Proceedings of the 2003 ASCE Airfield Specialty Conference, Las Vegas, NV.
- 4- Gopalakrishnan, K. (2008) "Evaluation of accelerated deterioration in NAPTF flexible test pavement", journal of Zhejiang university SCIENCE A, may 4 2008.
- 5- Federal Aviation Administration, (2004) "LEDFAA User's Manual", third Edition.

