

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نام خانوادگی دانشجو: محمد باقرزاده	نام: بابک
عنوان پایان نامه: مطالعه آیروالاستیک عرشه شکاف دار پلهای معلق	
اساتید راهنما: دکتر هوشیار ایمانی کله سر و مهندس مسعود ابی ترابی استاد مشاور: مهندس فرید صالحی عالی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: عمران
گرایش: سازه	دانشگاه: محقق اردبیلی
تاریخ فارغ التحصیلی: ۸۷/۱۰/۱۶	تعداد صفحه: ۱۱۵
کلید واژه ها: آیرودینامیک ، آیروالاستیک ، فلاتر	
<p>چکیده : این تحقیق به تحلیل عددی پاسخ عرشه سوراخ دار پلهای معلق در مقابل باد میپردازد . روش المان محدود که از روشهای مدرن میباشد تکنولوژی پیشرفته آنالیز سازه های مختلف را با استفاده از کامپیوترهای دیجیتالی به ارمغان آورده است بطوریکه پیش پردازش و پس پردازش اطلاعات ورودی و خروجی را به آسانی در دسترس قرار می دهد و نتایج مطمئنی را برای پاسخهای سازه ای ارائه میدهد . ابزار اصلی مورد استفاده در این مطالعه مدلسازی اندرکنش سازه وسیال (سازه عرشه پل و باد) با استفاده از نرم افزار ANSYS و مقایسه آن با نتایج تونل باد و نتایج حاصل از محاسبات دیگر دانشمندان میباشد .</p>	

فصل اول : کلیات تحقیق

- ۱-۱- عنوان تحقیق..... ۱
- ۲-۱- تعریف واژه ها..... ۱
- ۳-۱- بیان مساله..... ۱
- ۴-۱- لزوم انجام تحقیق..... ۲
- ۵-۱- هدف تحقیق..... ۲
- ۶-۱- فرضیات تحقیق..... ۲
- ۷-۱- نوع تحقیق..... ۲
- ۸-۱- روش تحقیق..... ۲
- ۹-۱- پیشینه تحقیق..... ۳
- ۱۰-۱- محدودیت های تحقیق..... ۳

فصل دوم : آیرودینامیک اجسام هوابند

- ۱-۲- معادلات حاکم..... ۴
- ۱-۱-۲- معادلات حرکت و پیوستگی..... ۴
- ۲-۱-۲- معادلات ناویر- استوکس..... ۶
- ۳-۱-۲- معادله برنولی..... ۷
- ۲-۲- جریان های با مسیر منحنی شکل- جریان های گردبادی..... ۸
- ۳-۲- لایه مرزی و جدادگی..... ۹
- ۴-۲- تشکیل منطقه پشت و جریان های گردبادی در جریان های دوبعدی..... ۱۲
- ۵-۲- بررسی آثار ناشی از نیروهای فشار، برا، کشش و لنگر در جریان های دو بعدی روی شکلهای سازه ای..... ۲۱

فصل سوم : پدیده های آیروالاستیک

- ۱-۳- مقدمه..... ۳۲
- ۲-۳- ریزش گردبادی و پدیده قفل شدگی..... ۳۳
- ۳-۳- نوسانات بیضوی در جهت عمود بر باد..... ۳۶
- ۱-۳-۳- فرمول بندی تحلیلی مساله نوسان بیضوی..... ۳۶

۴-۳	ناحیه پشت جریان نوسان بیضوی	۴۰
۳-۵	انحراف پیچشی	۴۳
۳-۵-۱	مدلسازی تحلیلی و انحراف پیچشی	۴۴
۳-۶	نوسانات شلاقی	۴۶
۳-۶-۱	نیروی برا و لنگر آیرودینامیک	۴۷
۳-۶-۲	حل معادلات نوسان شلاقی	۵۲

فصل چهارم : تاریخچه پل های معلق و روشهای مختلف آنالیز پدیده فلاتر در آنها

۴-۱	مقدمه	۵۶
۴-۲	تاریخچه پل های معلق	۵۶
۴-۳	آثار باد بر روی پلهای معلق	۶۵
۴-۴	آثار نیروهای آیرودینامیک خود تحریک (Self Excited) در پدیده فلاتر بر روی مشخصه های الاستیک و خواص دینامیکی پلهای معلق	۷۱
۴-۵	روشهای مختلف آنالیز پدیده فلاتر در پلهای معلق	۷۳
۴-۵-۱	روشهای تجربی یا Experimental Approaches	۷۳
۴-۵-۲	روشهای تحلیلی یا Analytical Approaches	۷۵
۴-۵-۳	روشهای عددی یا Numerical Approaches	۷۵
۴-۵-۳-۱	مدلسازی عددی (کامپیوتری) پدیده فلاتر	۷۹
۴-۵-۳-۲	فرمولبندی لاگرانژی - اولری اختیاری (Arbitrary Lagrangian -Eulerian) و یا (ALE)	۸۱

فصل پنجم : بررسی عددی پدیده فلاتر در عرشه پلهای معلق

۵-۱	مقدمه	۸۴
۵-۲	فرضیات اعمال شده به نواحی حل	۸۵
۵-۳	آیرودینامیک عددی مربوط به مقاطع ثابت عرشه پلها	۸۶
۵-۴	شرحی بر مراحل مدلسازی با نرم افزار ANSYS	۹۰
۵-۵	مشخصه های الاستیک ، خواص دینامیکی و شکل هندسی مربوط به دهنه های اصلی پل های Tacoma و GBEB	۹۲
۵-۶	بررسی نتایج تحلیلهای انجام شده	۹۸

- ۵-۷- نتیجه گیری.....۱۰۶
- ۵-۸- ارائه پیشنهادات جهت تحقیقات آتی.....۱۰۶

- شکل ۲-۱ نیروهای وارد بر یک المان حجمی از سیال ۵
- شکل ۲-۲ افزایش سرعت خطی یا ارتفاع از دیواره ۶
- شکل ۲-۳ جریان در مسیر منحنی شکل ۹
- شکل ۲-۴ نمودار سرعت در لایه مرزی ۱۰
- شکل ۲-۵ جداشدگی جریان در گوشه ۱۱
- شکل ۲-۶ الف- جریان عبور کرده از صفحه ای با گوشه تیز $R_e \cong 0.3$ ۱۲
- شکل ۲-۶ ب- جریان عبوری از روی صفحه تیز گوشه $R_e \cong 10$ ۱۲
- شکل ۲-۶ ج- جریان عبوری از روی صفحه ای تیز گوشه $R_e \cong 250$ ۱۳
- شکل ۲-۶ د- جریان عبوری از روی صفحه ای تیز گوشه $R_e \geq 1000$ ۱۳
- شکل ۲-۷ الف- جریان عبوری از استوانه دایره ای شکل $R_e \cong 1$ ۱۴
- ب- جریان عبوری از استوانه دایره ای شکل $R_e \cong 20$ ۱۴
- ج- جریان عبوری از استوانه دایره ای شکل $30 \leq R_e \leq 5000$ ۱۴
- د- جریان عبوری از استوانه دایره ای شکل $5000 \leq R_e \leq 200000$ ۱۴
- ه- جریان عبوری از استوانه دایره ای شکل $R_e \geq 200000$ ۱۴
- شکل ۲-۸ دنباله گردبادها در تونل آب ۱۶
- شکل ۲-۹ ارتباط بین عدد استروهمال و عدد رینولدز برای استوانه های با مقطع دایره ای ۱۷
- شکل ۲-۱۰ الف- عکس ماهواره ای گردباد ابرها در جریان پایین دست جزیره Guadalupe ۱۸
- شکل ۲-۱۰ ب- عکس ماهواره ای جریان در اطراف جزیره Mayen در اقیانوس اطلس ۱۸
- شکل ۲-۱۱ اثر صفحات جداکننده بر جریان عبوری از یک استوانه دایره ای شکل ۱۹
- شکل ۲-۱۲ جدایی خطوط جریان و تشکیل منطقه پشت در منشورهای مربع و مستطیل شکل ۲۰
- شکل ۲-۱۳ نیروهای کشش و برا روی جسم هوا بند دلخواه ۲۱
- شکل ۲-۱۴ تغییرات تدریجی مقدار میانگین ضریب C_D با عدد رینولدز برای استوانه های با مقطع دایره ای ۲۳
- شکل ۲-۱۵ تاثیر عدد رینولدز با توزیع فشار روی یک استوانه دایره ای شکل ۲۴
- شکل ۲-۱۶ اثر طول جسم در امتداد جریان هوا بر ضریب کشش برای یک جسم مکعب مستطیل ۲۵
- شکل ۲-۱۷ تاثیر عدد رینولدز، گرد بودن گوشه ها و زبری سطح روی ضریب کشش برای استوانه هایی با مقطع دایره ای شکل (Γ : شعاع گوشه، k : اندازه دانه های ماسه) ۲۶
- شکل ۲-۱۸ نمونه ای از ضریب کشش C_D به صورت تابعی از عدد رینولدز ۲۶

- شکل ۲-۱۹ طیف نوسانات برا برای یک جسم مکعب برای جریانی عمود بر ضلع $R_e = 10^5$ ۲۷
- شکل ۲-۲۰ تغییرات ضریب نیروی نوسانی قائم C_{Nms} برای مکعب مستطیل با زاویه برخورد ۲۸
- شکل ۲-۲۱ الف نمایش جریان آب بر روی مدل یک مقطع یک پل ۲۸
- شکل ۲-۲۱ ب نمایش جریان آب بر روی مدل مقطع یک پل که تقریبا شکل هم خط جریان دارد ۲۹
- شکل ۲-۲۲ لایه های جدا شده در جریان آرام و متلاطم ۳۱
- شکل ۲-۲۳ وابستگی ضرایب کشش به شدت اغتشاش ۳۱
- شکل ۳-۱ تعیین فرکانس ریزش گردبادی با سرعت باد در سازه الاستیک ۳۴
- شکل ۳-۲ نوسانات عمود بر جهت وزش سازه الاستیک استوانه ای ۳۵
- شکل ۳-۳ کشش و برا در یک جسم هوا بند ثابت ۳۷
- شکل ۳-۵ ضرایب نیرو برای استوانه هشت وجهی $R_e = 1.2 * 10^6$ ۳۹
- شکل ۳-۶ سه نمونه از ضرایب نیروی جانبی و دامنه های پاسخ نوسان بیضوی ۴۰
- شکل ۳-۷ جداکننده در دسته چهار تایی از خطوط انتقال ۴۱
- شکل ۳-۸ پلان دواستوانه در پدیده نوسانات بیضوی ناحیه پشت ۴۲
- شکل ۳-۹ توزیع کیفی سرعت میانگین، برا و کشش روی استوانه دوار در ناحیه پشت استوانه دیگر ۴۲
- شکل ۳-۱۰ دامنه خط اثر مدار نوسان بیضوی ناحیه پشت ۴۳
- شکل ۳-۱۱ هندسه و پارامترها برای مساله انحراف پیچشی ۴۴
- شکل ۳-۱۲ ضریب لنگر برای سازه هوا بند به عنوان تابعی از زاویه برخورد ۴۵
- شکل ۳-۱۳ بخش حقیقی و موهومی تابع دوران تئودورسن $C(K)=F(K)+iG(K)$ ۴۸
- شکل ۳-۱۴ الف ضرایب A_i^*, H_i^* برای جسم هوا گذر نازک ($i=1,2,3$) و سه عرشه جعبه ای هوا گذر که در شکل (۴-۱۴-ب) نمایش داده شده است ۵۱
- شکل ۳-۱۴ ب عرشه سه پل ۵۲
- شکل ۴-۱ پل بروکلین-نیویورک (۸۳-۱۸۶۷) ۵۷
- شکل ۴-۲ پل جورج واشینگتن-نیویورک (۱۹۳۱) ۵۸
- شکل ۴-۳ پل گلدن گیت-سانفرانسیسکو (۱۹۳۷) ۵۸
- شکل ۴-۴ پل مکیناک-میشیگان (۱۹۵۷) ۶۰
- شکل ۴-۵ پل تامار-انگلستان ۶۰

- شکل ۴-۶ پل فورس رود- اسکاتلند (۱۹۶۴) ۶۱
- شکل ۴-۷ پل سالازار- پرتقال (۱۹۶۴) ۶۲
- شکل ۴-۸ پل سورن رود- انگلستان (۱۹۶۶) ۶۲
- شکل ۴-۹ پل هامبر- انگلستان (۱۹۸۱) ۶۳
- شکل ۴-۱۰ کابل کشی پل هامبر- انگلیس ۶۳
- شکل ۴-۱۱ پل دوم بوسفور- ترکیه (۱۹۸۸) ۶۴
- شکل ۴-۱۲ پل آکاشیکایکو- ژاپن (۱۹۹۸) ۶۴
- شکل ۴-۱۳ تاریخچه زمانی ناشی از نیروی کشاننده (Drag) وارده بر یک سازه یکدرجه آزادی
..... ۶۵
- شکل ۴-۱۴ شکل مودهای خمشی مربوط به ارتعاش پل معلق از Arrol و Chaterjee در سال
۱۹۸۱ ۶۷
- شکل ۴-۱۵ رفتار آیروداستیک عرشه پلهای معلق ۶۷
- شکل ۴-۱۶ مقطع عرضی پل GBEB دانمارک که مشابه با مقطع عرضی یک هواگذر بوده و
هندسه عرشه در گوشه ها تیز شده است ۶۹
- شکل ۴-۱۷ استفاده از مقاطع باز خرابایی دارای حفره و یا شبکه در سطح عرضی در پل آکاشی
کایکیو ژاپن ۶۹
- شکل ۴-۱۸ استفاده از پره های صاف در لبه های کناری جهت کاهش ارتعاشات ناشی از تحریکات
گردبادی ۷۰
- شکل ۴-۱۹ کاهش ارتعاشات قائم ناشی از تحریکات گردبادی با استفاده از تاثیرات تیز گوشه ای
کردن مقطع در پل کریک ۷۰
- شکل ۴-۲۰ پاسخ سازه دارای ضریب میرایی منفی ۷۳
- شکل ۴-۲۱ نمونه ساخته شده ای از عرشه یک پل معلق بمنظور انجام آزمایش مدل کامل پل
..... ۷۴
- شکل ۴-۲۲ نمونه ساخته شده ای از عرشه یک پل معلق بمنظور انجام آزمایش مدل مقطع و
مشاهده پدیده فلاتر در آن ۷۵
- شکل ۴-۲۳ تصویری از شبکه ایجاد شده حول دماغه هواپیما ۷۸
- شکل ۴-۲۴ سیستم متناوب حلگرها در تحلیل FSI ۷۹

شکل ۴-۲۵ هندسه مربوط به مقطع عرضی دهانه اصلی در عرشه پل معلق GBEB دانمارک	۸۰
شکل ۴-۲۶ مدل ایده آل شده عرشه در حالت دو بعدی	۸۰
شکل ۴-۲۷ ابعاد ناحیه سیال	۸۱
شکل ۴-۲۸ روش ALE	۸۲
شکل ۴-۲۹ نواحی حل مسئله شامل ناحیه عرشه پل و سیال و شرایط مرزی فرض شده در نواحی مذکور و محل اندرکنش سازه و سیال	۸۳
شکل ۵-۱ صفحه تحت بارگذاری در حالت تنش مسطح یا حالت Plane Stress	۸۵
شکل ۵-۲ دیوار حائل تحت بارگذاری در حالت کرنش مسطح یا حالت Plane Strain	۸۵
شکل ۵-۳ شبیه سازی پدیده ریزش گردبادی Vortex – Shedding Phenomenon با استفاده از نرم افزار ANSYS در پل GBEB	۸۷
شکل ۵-۴ مشاهده پدیده ریزش گردبادی با استفاده از آزمایش تونل باد برای پل Storebelt	۸۸
($S_r = 0.19$)	۸۸
شکل ۵-۵ هندسه ریزش گردبادی Vortex – shedding	۸۸
شکل ۵-۶ عدم تشکیل کامل پدیده Vortex – Shedding در اثر ایجاد سوراخ در عرشه	۸۹
شکل ۵-۷ فلوجارت برنامه نویسی جهت به دست آوردن سرعت فلاتر	۹۱
شکل ۵-۸ شکل هندسی مربوط به دهانه اصلی پل GBEB دانمارک در حالت بدون سوراخ	۹۳
شکل ۵-۹ شکل هندسی مربوط به دهانه اصلی پل GBEB دانمارک در حالت با سوراخ	۹۳
شکل ۵-۱۰ مود اول قائم یا مود خمشی ارتعاش $f_{1v} = 0.097$	۹۳
شکل ۵-۱۱ مود اول پیچشی ارتعاش $f_{1\alpha} = 0.27$	۹۴
شکل ۵-۱۲ مدل ایده آل شده پل GBEB در حالت بدون سوراخ	۹۵
شکل ۵-۱۳ مدل ایده آل شده پل GBEB در حالت با سوراخ	۹۵
شکل ۵-۱۴ مدل ایده آل شده مربوط به پل GBEB در حالت دوم	۹۶

- شکل ۵-۱۵ معادل سازی سیستم جرم فنر قائم و پیچشی با یک سیستم جرم فنر قائم ۹۶
- شکل ۵-۱۶ مدل ایده آل شده مربوط به پل GBEB در نرم افزار ANSYS ۹۷
- شکل ۵-۱۶ شبکه بندی اولیه ناحیه سازه و سیال ۹۸
- شکل ۵-۱۷ نواحی حل مسئله شامل ناحیه عرشه پل و سیال و شرایط مرزی فرض شده در نواحی مذکور و محل اندرکنش سازه و سیال ۹۹
- شکل ۵-۱۸ منحنی تاریخچه زمانی ارتعاشات مربوط به لبه جلویی عرشه پل GBEB در حالت فلاتر ۱۰۰
- شکل ۵-۱۹ منحنی تاریخچه زمانی ارتعاشات مربوط به لبه عقبی عرشه پل GBEB در حالت فلاتر ۱۰۱
- شکل ۵-۲۰ منحنی تاریخچه زمانی ارتعاشات مربوط به لبه جلویی و عقبی عرشه سوراخ دار پل GBEB در حالت فلاتر ۱۰۲
- شکل ۵-۲۱ کانتور توزیع سرعت جریان حول عرشه سوراخ دار پل GBEB در حالت فلاتر ۱۰۳
- شکل ۵-۲۲ کانتور توزیع فشار حول عرشه سوراخ دار پل GBEB در حالت فلاتر ۱۰۳
- شکل ۵-۲۳ تغییر مکان عرشه پل GBEB در حالت فلاتر ۱۰۴

جدول ۱-۲ عدد استروهاال برای اشکال گوناگون، برگزیده از ASCE	۱۷
جدول ۲-۲ ضرایب کشش و برا برای اشکال سازه ای	۳۰
جدول ۱-۵ مشخصه های دینامیکی مربوط به دهانه اصلی پل GBEB	۹۴
جدول ۲-۵ خلاصه نتایج مربوط به پل GBEB	۱۰۴

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱ عنوان تحقیق

بررسی پدیده های آیروالاستیک در عرشه پلهای معلق شکافدار

۱-۲ تعریف واژه ها

پلهای معلق : پلهای معلق سازه های انعطاف پذیری (Flexible) هستند که قابلیت ارتعاش در پیوندهای بالا رداشته و میتوانند در موده های مختلف خمشی و پیچشی و یا ترکیبی از آنها ارتعاش نماید بطوریکه موده های غالب در این نوع سازه ها عمدتاً موده های بالاتر بوده و لزوم مطالعه و بررسی موده های ارتعاشی بالاتر را اجتناب ناپذیر می سازد.

آیروالاستیسیته : علمی است که به مطالعه اندرکنش های مابین سیال و سازه می پردازد مطالعه پدیده هایی که در آنها نیروهای آیرودینامیک و حرکات سازه ای به مقدار قابل ملاحظه ای بر هم اثر می گذارند. ناپایداری آیرودینامیک : ناپایداری آیرودینامیک پدیده ای است که درون جریان سیال به صورتهای مختلف مانند آشفتگی جریان، تشکیل گردباد و ... در ناحیه پشت جریان در اثر قرار گرفتن یک جسم ثابت (بنام جسم هوابند) در داخل جریان سیال به وجود می آید.

ناپایداری آیروالاستیک : ناپایداری آیروالاستیک پدیده ای است که در جسم یا سازه واقع در مسیر جریان اتفاق می افتد بگونه ای که جسم مذکور تحت نیروهای آیرودینامیک سیال بنحوی تغییر شکل می دهد که تغییر شکل اولیه باعث افزایش تغییر شکلهای نوسانی بعدی (با مشخصه واگرایی) می گردد. این پدیده همواره به همراه نیروهای آیرودینامیکی است که در اثر حرکت خود جسم به حالت تحریک می رسد که به این نیروها نیروهای خود ارتعاشی گفته می شود.

۱-۳ بیان مساله

اصلی ترین معیار طراحی عرشه پلهای معلق بررسی رفتار آیروالاستیک آنها می باشد که با استفاده از روشهای مختلفی مانند روش تحلیلی صفحه تخت تئودورسن ، روشهای نیمه تجربی - نیمه تحلیلی مانند روش دترمینان پایداری ، روش تجربی مانند استفاده از تونل باد ، و... انجام می شود. ابزار اصلی مورد استفاده در این پایان نامه انجام مدلسازی کامپیوتری اندرکنش مابین سازه (عرشه شکافدار پل GBEB) و سیال در مقیاس کامل (Full Scale) با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS می باشد

که با انجام تحلیل غیرخطی هندسی، پاسخ تاریخچه زمانی عرشه پل بدست می آید. در انتها نتایج بدست آمده با نتایج روشهای دیگر و نتایج دیگر محققین (برای عرشه بدون شکاف پل GBEB) مقایسه می گردد.

۴-۱ لزوم انجام تحقیق

تونل باد بعنوان ابزار تحقیقاتی مهمی برای بررسی رفتار پلهای معلق می باشند. ولی با توجه به اینکه انجام این آزمایشات و مدلها بسیار گران بوده و مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی می باشد، (بعنوان مثال در طراحی پل GBEB دانمارک تعداد ۱۶ مقطع Box با هندسه های مختلف توسط Larsen و Jacobsen آزمایش شده و هر آزمایش مدل مقطع (Sectional Model) بطور متوسط ۶ هفته بطول انجامید). بنابر این امروزه تحلیلهای عددی بطرز چشمگیری مورد توجه واقع شده اند و دانشمندان متوسل به روشهای تحلیلی دیگری مانند تکنیک دینامیک سیال عددی (CFD)، المان محدود (FEM)، تفاضلات محدود (FDM) و... شده اند و امیدوارند با استفاده از این تحلیلها و ترکیب آنها با روشهای تجربی از ابزارهای تجربی، بطور کارآمد تری استفاده نمایند و به عبارتی دیگر استفاده از این روشها باعث صرفه جویی در زمان و هزینه آزمایشهای مورد نیاز در زمان فاز طراحی می شود.

۵-۱ هدف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق بررسی عددی مهمترین رفتار آیروداستیک پلهای معلق یا رفتار فلاتر این پلها در برابر جریان سیال (باد) و بررسی میزان تاثیر ایجاد شکاف در بهینه کردن این پدیده می باشد.

۶-۱ فرضیات تحقیق

فرضیات در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر عبارتند از :

الف : مدل سازی ناحیه سیال و سازه (عرشه پل) بصورت دو بعدی (2-D).

ب : عرشه پل بصورت جسم صلب (دارای سطح صلب) در نظر گرفته می شود.

ج : ناحیه سازه بصورت کرنش مسطحه یا (Plane Strain) در نظر گرفته می شود.

د : معادلات حاکم بر سیال (معادلات ناویر استوکس) بصورت غیر قابل تراکم (Incompressible) و لایه ای (Laminar) در نظر گرفته می شود.

۷-۱ نوع تحقیق

تحلیلی - توصیفی

۸-۱ روش تحقیق

روش تحقیق برای پل GBEB دانمارک مطابق گامهای زیر است :

گام اول : حل جریان عبوری از عرشه شکافدار پل GBEB در حالت ثابت.
گام دوم : حل جریان عبوری از عرشه شکافدار پل GBEB در حالت متحرک بمنظور یافتن سرعت باد بحرانی فلاتر.
گام سوم : ارایه نتایج پل مذکور و مقایسه نتایج فرکانس ریزش گردبادی و سرعت بحرانی فلاتر با نتایج بدست آمده از کارهای تجربی، روشهای دیگر و نتایج دیگر محققین.

۹-۱ پیشینه تحقیق

بصورت عددی هیچ تحقیقی در زمینه بررسی تاثیر ایجاد سوراخ در عرشه پل های معلق بر روی سرعت فلاتر انجام نشده است ولی یک گروه ژاپنی^۱ (۲۰۰۲) به صورت آزمایشگاهی روی این موضوع تحقیق کرده اند.

۱۰-۱ محدودیتهای تحقیق

با توجه به محدودیت کامپیوترهای موجود مدل سازی بصورت دو بعدی با گامهای زمانی نسبتا بزرگ و جریان در حالت لایه ای و غیر قابل تراکم در نظر گرفته شده اند.

1 Hiroshi sato,nobuyuki hirahara,koichiro fumoto,shigeru hirano,shigeki kusuhara

فصل دوم

آیرودینامیک اجسام هوا بند^۱

در این فصل برخی از اصول تحلیل و آزمایشگاهی که اساس مطالعات مهندسی باد است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهم ترین معیار طراحی عرشه پلهای معلق بررسی رفتار آیرولاستیک آنها می باشد. از بین تمامی رفتارهای آیرولاستیک نیز مهم ترین رفتار در پلهای معلق، پدیده فلاتر یا نوسانات شلاقی می باشد. بدین منظور دانشمندان مختلف از روشهای مختلفی بمنظور بررسی رفتار فلاتر پلهای مذکور استفاده می نمایند. تئوری مشتقات خطی فلاتر ارائه شده توسط اسکانلن و تومکو (scanlan & Thomko) در سال ۱۹۷۱ که با فرض اعمال حرکت‌های معین (پیچشی و قائم) به عرشه مدل مورد نظر بدست می آیند بطور گسترده جهت تعیین این پدیده (فلاتر) مورد استفاده قرار می گیرد. در بیشتر عرشه پلهای مخصوصاً پلهای با مقطع قوطی شکل به منظور تخمین اولیه مشتقات خطی از تئوری صفحه تخت و جریان لزج تئودورسن (Theodorsen) که در سال ۱۹۳۵ ارائه گردیده ویا از فرمول تقریبی بسیار مفید سلبرگ (Selberg) که در سال ۱۹۶۱ ارائه گردیده است استفاده می شود. پیش زمینه دیگری نیز درباره تحلیل فلاتر توسط فانگ (Fung) در سال ۱۹۹۳ ارائه شده است.

۱-۲ معادلات حاکم

۱-۱-۲ معادلات حرکت و پیوستگی

المانی از یک سیال را با حجم ثابت dv در نظر بگیرید. بردار سرعت سیال عموماً چنین بیان می‌شود:

$$u = u_i + v_j + w_k \quad (1-2)$$

که i و j و k مؤلفه‌های برداریکه در امتداد سه محو دستگاه متعامد X و Y و Z می‌باشند. برای اختصار از این به بعد x و y و z را با نماد x_1 و x_2 و x_3 و همچنین به جای u و v و w از u_1 و u_2 و u_3 استفاده می‌شود. بردارهای i و j و k نیز با i_1 و i_2 و i_3 نشان داده می‌شوند. بنابراین معادله (۱-۲) به شکل زیر تبدیل خواهد شد.

$$u = \sum_{i=1}^3 u_i i_i$$

¹ Bluff-Body Aerodynamics

نیروی که بر سیال داخل حجم dv اثر می کند از دو قسمت تشکیل می شود. قسمت اول نیروی حجمی است، مانند نیروی وزن که آن را با $F\rho dv$ نشان می دهند، که چگالی سیال می باشد. قسمت دوم در اثر نیروی خالص وارد بر سیالی که تنشهای داخلی آن σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) است می باشد.

مثلاً سهم تنش قائم σ_{ij} بر این نیرو (شکل (۲-۱)) عبارتست از :

$$-\sigma_{11}dx_2dx_3 + (\sigma_{11} + \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x_1}dx_1)dx_2dx_3 = \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x_1}dx_1dx_2dx_3 = \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x_1}dv \quad (۳-۲)$$

به طریق مشابه می توان نشان داد که مؤلفه نیروی خالص در جهت در اثر اعمال تمام تنشهای σ_{ij} برابر است با :

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}dV$$

با نشان دادن مؤلفه های نیروی حجمی F توسط F_i ($i=1, 2, 3$) معادله تعادل با بهره گیری از قانون دوم نیوتن به شکل زیر درمی آید:

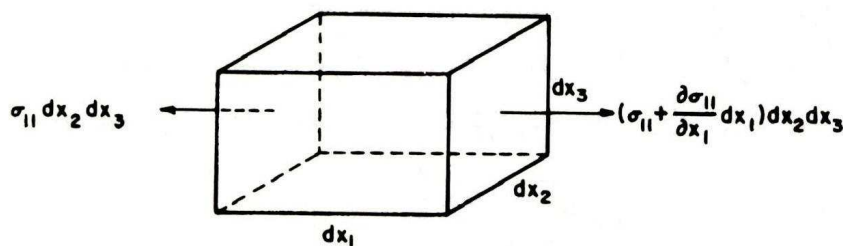
$$\frac{Du_i}{Dt}\rho dV = F_i\rho dV + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}dV \quad (i=1, 2, 3) \quad (۵-۲)$$

در رابطه بالا عمل گر $\frac{D}{Dt}$ را مشتق مادی می نامند و بوسیله تعریف زیر بیان می شود:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \quad (۶-۲)$$

از آنجا که معادله (۵-۲) برای تمام المانهای حجمی صادق است، ضریب dv ممکن است از معادله (۵-۲) حذف گردد، بنابراین معادلات حرکت سیال به صورت مؤلفه های اندیسی بصورت زیر نوشته می شود :

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (i=1, 2, 3) \quad (۷-۲)$$



شکل ۲-۱ نیروهای وارد بر یک المان حجمی از سیال

بسته به طبیعت نیروهای F_i و تنشهای وارده σ_{ij} شکلهای گوناگونی از این معادله اساسی را می توان بر روی جزئی از سیال به دست آورد. قبل از بررسی این حالت ویژه بد نیست نگاهی به معادله بقاء جرم بیاندازیم. این معادله نرخ افزایش جرم سیال داخل یک سطح بسته را برابر با اختلاف بین نرخ ورودی و خروجی در حجم احاطه شده توسط سطح مورد نظر بیان می کند.

بنابراین معادله پیوستگی چنین نوشته می شود :

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (8-2)$$

این رابطه برای سیال غیر قابل تراکم که در آن تغییرات جرم مخصوص ρ وجود ندارد، به صورت زیر نوشته می‌شود:

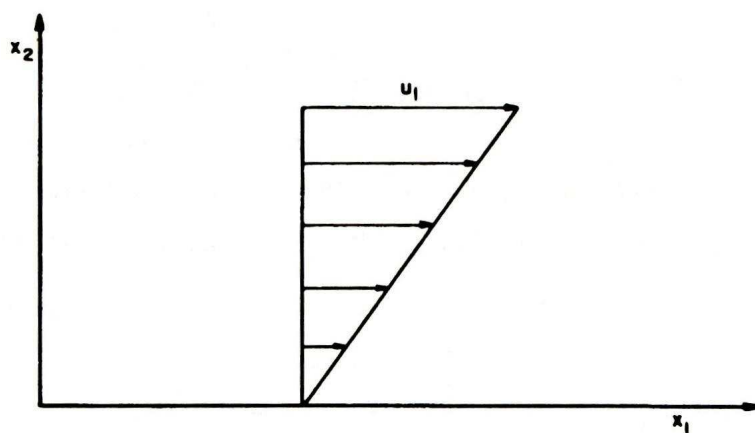
$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (9-2)$$

۲-۱-۲ معادلات ناویر - استوکس^۱

برخلاف جامدات، سیالات تحت شرایط استاتیکی قادر به تحمل هیچگونه تشنی در حالت پایدار به غیر از فشار عمودی نمی‌باشند. ولی در وضعیت دینامیکی، سیال ممکن است برش را در حالتی که وابسته به زمان باشد، تحمل کند. اغلب در کاربردهای مکانیکی سیال، کافی است که فرض شود تنش‌های مورد نظر یا فشارهای قائم‌اند یا متناسب به ویسکوزیته^۲ می‌باشند.

سیالاتی که در آنها تنش برشی داخلی متناسب با نرخ تغییرات سرعت با فاصله عمود بر آن است را سیالات ویسکوز و یا سیالات نیوتنی می‌نامند. به عنوان مثال تنش برشی σ_{12} در جریان دو بعدی ساده در شکل (۲-۲) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_{12} = \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \quad (10-2)$$



شکل ۲-۲ افزایش سرعت خطی یا ارتفاع از دیواره

که μ ضریب تناسب ویسکوزیته سیال نامیده می‌شود و واحد آن جرم تقسیم بر طول ضربدر زمان (مثلاً g/cm.s) می‌باشد.

بنابراین با تقسیم تمام تنشهای تانسور σ_{12} در یک نقطه از سیال به تنش فشاری (یا به طور ساده‌تر فشار یعنی تنش قائم) p ، تنش انحرافی که با رابطه زیر تعریف می‌شود، بدست می‌آید:

$$d_{ij} = 2\mu \left[e_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sum_{k=1}^3 e_{kk} \right] \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (11-2)$$

که در آن تانسور کرنش انحرافی e_{ij} بصورت زیر می‌باشد:

¹ Navier Stokes Equations

² Viscosity

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (12-2)$$

و

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (13-2)$$

تفکیک تنش σ_{ij} از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu \left[e_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \sum_{k=1}^3 e_{kk} \right] \quad (14-2)$$

با استفاده از این رابطه تنشها برای یک سیال نیوتنی در معادله حرکت خواهیم داشت:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ 2\mu \left[e_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \sum_{k=1}^3 e_{kk} \right] \right\} \quad (15-2)$$

در رابطه فوق F_i نیروی حجمی می‌باشد.

معادله (15-2) ($i, j = 1, 2, 3$) به معادلات ناویر - استوکس معروف است. با بهره‌گیری از معادله (12-2) و اگر ویسکوزیته سیال μ ثابت در نظر گرفته شود آنگاه معادله (15-2) به رابطه زیر تبدیل می‌شود.

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \left[\sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{k=1}^3 \left[\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \right] \quad (16-2)$$

مجدداً حالت ساده‌تر زمانی است که سیال غیر قابل تراکم باشد. پس معادله 16-2 در غالب‌برداری به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$(17-2)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho F - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial p}{\partial x_i} i_i + \mu \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u}{\partial x_j^2}$$

۳-۱-۲ معادله برنولی^۱

در حالتی که سیال مورد نظر غیر قابل تراکم بوده و همچنین غیر ویسکوز ($\mu=0$) باشد و بتوان از اثر نیروهای حجمی صرف‌نظر نمود، آنگاه معادله (17-2) به شکل ساده‌تری در می‌آید:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial p}{\partial x_i} i_i \quad (18-2)$$

اگر دستگاه مختصات طوری انتخاب شود که جهت X_1 متناظر با جهت حرکت باشد، و نیز جریان یکنواخت فرض شود، آنگاه با انتگرال‌گیری از معادله (18-2) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{1}{2} |u|^2 + \frac{p}{\rho} = Const \quad (19-2)$$

¹ Bernoulli's Equation

در هر نقطه از خطوط جریان معادله (۱۹-۲) شکل خاصی از تئوری برنولی است و عموماً به صورت زیر نوشته می شود :

$$\frac{1}{2}\rho u^2 + P = Const \quad (20-2)$$

که در آن u سرعت جریان در امتداد خطوط جریان می باشد. مقدار $\frac{1}{2}\rho u^2$ دارای بعد فشار بوده و به آن فشار دینامیکی گفته می شود. رابطه مهم فوق بکرات در تعریف و تفسیر رابطه بین فشار و سرعت در هوا و جریان باد در تونل باد، استفاده می شود.

۲-۲ جریان های با مسیر منحنی شکل - جریان های گردبادی^۱

جیرانی دو بعدی بین دو نقطه با خطوط جریان متحدالمرکز با فاصله dr از یکدیگر را در نظر بگیرید. فرض کنید که شعاع انحناء r باشد (شکل (۳-۲)). برای اینکه جریان در مسیر منحنی شکل باقی بماند، باید شتابی به سمت مرکز انحناء خطوط جریان با مقدار $\frac{u^2}{r}$ داشته باشد. همانطور که در قبل نیز ذکر شده است، u سرعت مماسی موضعی جریان می باشد. فرض کنید فشاری که روی المانی از سیال مورد نظر وارد می شود با p نشان داده شود. اختلاف فشار از یک خط جریان به خط بعدی در امتداد r که باعث شتاب می شود، با dp نشان داده می شود. معادله حرکت برای المانی از سیال عبارتست از :

$$dp dA = \rho dr dA \frac{u^2}{r}$$

که ρ دانسیته سیال و dA مساحت المان در صفحه ای عمود بر صفحه شکل می باشد. ان رابطه نشان می دهد که فضا عمود بر خطوط جریان، منحنی شکل و بدون حضور نیروهای دیگر تغییر می کند و برابر است با :

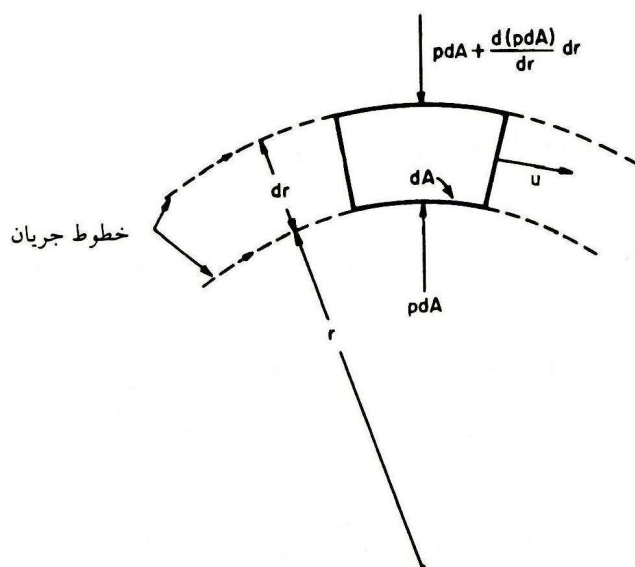
(۲۱-۲)

$$dp = \rho u^2 \frac{dr}{r}$$

بنابراین معادله برنولی (۲۰-۲) محاسبه فشار در امتداد یک منحنی از خطوط جریان را نتیجه می دهد. خصوصاً می توان حالتی را در نظر گرفت که در آن جریان کاملاً دایره ای است و مقدار p_0 در معادله (۲۰-۲) در تمام خطوط جریان یکی باشد. به حالت، جریان گردبادی می گویند. با مشتق گیری از رابطه (۲۰-۲) می توان نوشت :

$$\rho u \frac{du}{dr} + \frac{dp}{dr} = 0 \quad (22-2)$$

¹ Vortex flow



شکل ۲-۳ جریان در مسیر منحنی شکل

از ترکیب رابطه فوق و معادله (۲۱-۲) نتیجه می‌شود:

$$\frac{du}{u} = -\frac{dr}{r} \quad (23-2)$$

از معادله (۲۳-۲) می‌توان انتگرال‌گیری کرد تا به رابطه زیر رسید:

$$ur = C = \text{Const} \quad (24-2)$$

این قانون ساده برای یک سیال غیر قابل تراکم و غیر ویسکوز ($\mu=0$) رابطه تئوریک سهمی بین شعاع r و سرعت مماسی u را در یک گردباد آزاد^۱ بیان می‌کند.

۲-۳ لایه مرزی و جداسدگی

محدوده مقادیر ویسکوزیته در سیالات مختلف بسیار وسیع است. ویسکوزیته هوا در فشارها و درجه حرارت‌های معمول نسبتاً کوچک است. به هر حال در بعضی شرایط این مقدار کوچک نقش مهمی ایفا می‌کند. یکی از این اثرات مهم ویسکوزیته هوا در تشکیل لایه مرزی است.

جریان هوایی که بر روی یک سطح صاف و ثابت حرکت می‌کند را در نظر بگیرید. به تجربه ثابت شده است که هوا در تماس با سطح به آن می‌چسبد. این پدیده باعث می‌شود که حرکت هوا در یک لایه نزدیک به سطح کند شود که بعنوان لایه مرزی معروف است.

در داخل لایه مرزی سرعت هوا از صفر در سطح به مقدار کامل خود افزایش می‌یابد، که معادل سرعت جریان در خارج از این لایه است. یک نمونه از نمودار سرعت لایه مرزی در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.

هوا چون دارای جرم است، طبق قانون دوم نیوتن اثر اینرسی را تجربه می‌نماید و یا بطور مشخص‌تر معادلات ناویراستوکس در آن صدق می‌کند. دو اثر بسیار مهم در جریان هوا اینرسی و ویسکوزیته

¹ Free vortex