School of Mechanical Engineering
Sharif University of Technology

پایان نامه کارشناسی

عنوان:

تحلیل ارتعاشات و بهبود طراحی سازه یک کوادروتور سبک

استاد راهنما:

دکتر حسن سالاریه

نگارش:

محمد مهدی عطوی 91111084

جعفر قلیلی 91111095

تیر 1395

تشکر و قدردانی

از استاد دکتر حسن سالاریه و همچنین دکتر آقای مهرآت و دکتر خانم فدایی که در این پروژه خیلی زحمت کشیدند و راهنمایی کردند

از افراد محترم مشغول به کار در شرکت مهندسی صنعت و دانش رهپویان افلاک (صدرا) زیر نظر دکتر سالاریه که با کمک ایشان فرآیندهای پیشرفت پروژه در جو صمیمانه و دوستانه انجام گرفت

از شرکت رها که از تقدیم مشورت دریغ نکرد

از دانشگاه صنعتی شریف و دانشکده مکانیک

از استاد دکتر سعادت فومنی

کمال تشکر و قدردانی و بزرگواری تقدیم عرض می شود

چکیده:

در این پروژه سازه یک کوادروتور سبک دست ساز مورد تحلیل ارتعاشات قرار میگیرد. هدف آن است که مشخصه ارتعاشاتی سازه بهبود پبدا کند. شرایط کنونی (قبل از بهبود) به گونه ای است که در محل قرارگیری سنسورهای ناوبری در کوادروتور دامنه ارتعاشات سازه ای ناشی از تحریک پره ها زیاد است به گونه ای نویز زیادی روی سنسورها وارد می شود که عملکرد سیستم کنترل را به شدت کاهش می دهد. از این رو به کمک مدل سازی توسط نرم افزارهای مدلینگ همچون آنسیس و سالید وتحلیل ارتعاشات و اجرای روش هایی مانند تقویت موضعی واضافه کردن جاذبها، ارتعاشات کاهش می یابد، به گونه ای که عملکرد سیستم کنترل بهبود یابد. همچنین فرایندی برای اصلاح و کاهش تحریک ناشی از دوران پره ها به کمک بالانس آن توسط بالانسر حرفه ای مخصوص پره ها پیاده سازی می شود. هر روش پیشنهادی روی کوادرتور هدف به صورت آزمایشگاهی اجرا می شود؛ یعنی برای هر روش، بعداز بررسی های تئوریک مطلوب، اعمال شده ونتایج آن ثبت وارزیابی می شود. بعداز آن، با اینکه ارتعاشات سازه به کمتر از حد مجاز تعریف شده توسط بزرگان وشاهکاران صنعت کوادروتور نظیر آردوپایلوت کاهش یافت، کوادروتور نتوانست به پرواز پایدار درآید. به خاطر همین، در کنار ارتعاشات، ضرایب والگوریتم کنترلی آن نیز مورد توجه قرار می گیرد و مباحث مربوط به داده برداری توسط سنسورها مثل شتاب سنج و ژیروسکوپ همچون نرخ تغییر زاویه، فیلتر کردن آن وغیره بررسی می شود. همچنین بالانس کردن اسپید کنترلر موتورهای براشلس و درست کردن جوشهای برد توزیع ولتاژ واتصالات انجام می شود. در نهایت نتیجه می شود که مشکل در دو امر اساسی وجود دارد: بورد ناوبری حاوی سنسورها به خاطر وزن زیادی و قدیمی بودن آن است که در بازار دیگر موجود نیست واین علت اصلی ناپایداری است، و عدم بهینه وخوب بودن الگوریتم کنترلی بورد کنترلر است.

فهرست مطالب

چکیده: أ
فهرست مطالب.....ب
فهرست اشکال.....ج
فهرست جداول.....ه
1. مقدمه.....1
2. تحلیل مسأله.....5
2-1 . کوادکوپتر وقطعات آن.....5
2-2 . دینامیک کوادروتور.....15
2-3 . بررسی ارتعاشات بدنه.....18
2-4 . بالانسینگ پره ها.....33
2-5. دمپر و ایزوله کردن ارتعاشات – فلایت کنترل.....36
2-6. دمپر و ایزوله کردن ارتعاشات – موتورها.....38
2-7 . سخت کردن فریم کوادروتور.....45
3. نتایج و بحث.....47
4. مباحث اضافه: بررسی ضرایب کنترلر.....54
4-1 . تعریف کلی در مورد کنترلر PID در کوادکوپتر:.....54
4-2. روش تنظیم ثابت های کنترلر:.....56
5. جمعبندي و ارائه پیشنهادات.....58
5-1 . جمع بندی:.....58
5-2 . پیشنهادات:.....59
فهرست مراجع.....61
پیوستها:.....62

فهرست اشکال

شکل 1: يكي از اولين مدل هاي كوادكوپتر كه توسط ايتينه اوهيمشين سال 1924 ساخته شده(3) 1
شکل 2: فاصله موتور به موتور 6
شکل 3: بدنه کوادروتور مورد نظر پروژه 7
شکل 4: مشخصات هندسی موتور براشلس استفاده شده در کوادروتور 8
شکل 5: بروشور شرکت T-Motor برای موتور مورد نظر 8
شکل 6: شماتیک و قطعات موتورهای براشلس 9
شکل 7: مشخصات باتری های لیتیوم-پلیمر 10
شکل 8: باتری استفاده شده در پروژه 11
شکل 9: اسپید کنترلر استفاده شده در پروژه از شرکت T-Motor 12
شکل 10: پره های استفاده شده در پروژه 13
شکل 11: فرستانده رادیویی استفاده شده در پروژه 14
شکل 12: گیرنده رادیویی نصب شده بر کواد در پروژه 14
شکل 13: فلایت کنترلر استفاده شده در پروژه 15
شکل 14: حرکت Yaw 16
شکل 15: حرکت Pitch و Yaw 17
شکل 16: شبیه سازی 3-بعدی کوادروتور هدف در SolidWorks 18
شکل 17: تصویر 2-بعدی کواد 19
شکل 18: مش بندی سازه کواد در نرم افزار ANSYS 20
شکل 19: فرکانس های طبیعی کوادروتور 23
شکل 20: مودهای فرکانسی سازه کوادروتور 24
شکل 21: بخشی از مقاله ای درباره صنعت کامپوزیت فیبر کربن در ایران 28
شکل 23: نمودار آزاد یا نمودار نیرو فریم کواد 31
شکل 22: تحلیل تنش و کرنش فریم کوادروتور 31
شکل 24: نامیزانی دوار 33
شکل 25: بالانسر ATG است 34
شکل 26: اضافه کردن چسب برای بالانس کردن پره- گره در حالت تعادل استاتیکی قرار دارد 35
شکل 27: تراز سطح تعبیه شده در یک بالانسر 35
شکل 28: سیستم دمپینگ ارتعاشات استفاده شده در پروژه 37
شکل 29: دمپر استفاده شده 37
شکل 30: نصب دمپر، چسپ دوطرفه وفلایت کنترلر رو کوادروتور 38
شکل 31: پلی ال، ایزوسیانات و اسپری آماده پلی اورتان 39
شکل 32: پیشرفت واکنش مواد تشکیل دهنده پلی اورتان 40

شکل 33: هیسترزیس در ماده پلی اورتان 41
شکل 34: منحنی انتقال پذیری ارتعاشات برای الاستومرها (برای همه الاستومرها صادق است) 42
شکل 35: دمپینگ انتقال پذیری ارتعاشات از یک به پایین شروع می شود 42
شکل 36: شبیه سازی ایزوله کننده 43
شکل 37: پلی اورتان نصب شده در زیر موتورها 44
شکل 38: استفاده از سیم فیبر کربن ودو پد برای افزایش دمپینگ وسختی فریم 45
شکل 39: گیرنده رادیویی که به لاپتوپ متصل می شود 46
شکل 40: نرم افزار کنترل وهدایت کواد 46
شکل 41: حد مجاز ارتعاشات در هر جهت بر حسب متر بر مجذور ثانیه 47
شکل 42: دستگاه داده برداری شتاب سنج نصب شده بر فلایت کنترل در ین تست 48
شکل 43: نتایج تست اول به دست آمده 49
شکل 44: استاند تست کوادروتور 50
شکل 45: تست نهایی کوادروتور با نگه داشتن پایه های آن 51
شکل 46: تست نهایی کواد بر روی استاند 52
شکل 47: بلوک دیاگرام کنترلر PID در کوادکوپتر 54
شکل 48: کوادکوپتر در حالت روشن وکنترل شده (دور موتور 50%) 57
شکل 49: کوادکوپتر در حالت کنترل از دست داده (دور موتور 70%) 57
شکل 50: نمودار نمونه از تاثیر TPA روی ضرایب PID 59

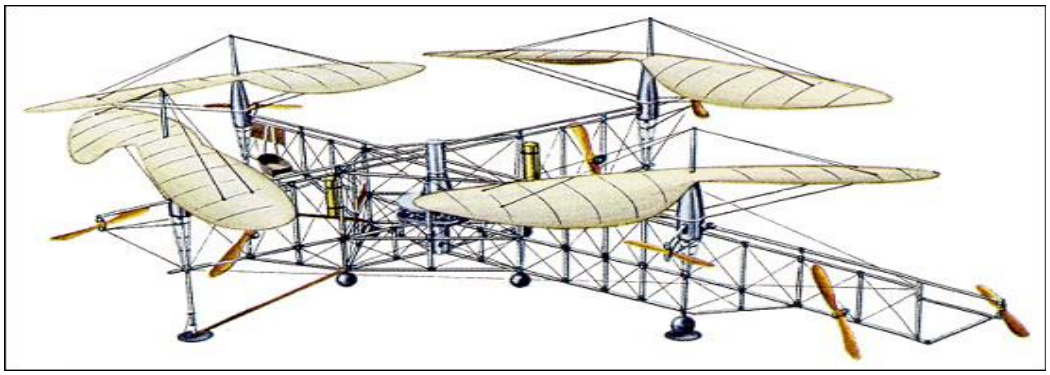
فهرست جداول

جدول 1: وضعیت ارتعاشات کوادکوپتر قبل از بهبود 3
جدول 2: مشخصات مکاترونیکی موتور از طرف شرکت T-Motor 9
جدول 3 : اطلاعات مش بندی. به تعداد المان ها و گره ها توجه شود 21
جدول 4 : مشخصات هندسی، ممانهای انرسی و جرم قطعات کواد 22
جدول 5 : فرکانسهای طبیعی سازه 23
جدول 6: فرکانس ارتعاشات وارد شده از طرف موتورها 25
جدول 7 : فرکانس های طبیعی فریم فیبر گلاسی 26
جدول 8: مشخصات فیبر گلاس و پلاستیک ABS 27
جدول 9 : فرکانس های طبیعی سازه فیبر کربنی 28
جدول10 : جرم سازه داده شده با استفاده از نرم افزار ANSYS 29
جدول 11: مشخصات موتورها- به تراست توجه شود 29
جدول 12: تورک وارد شده بر سازه توسط موتورها 30
جدول 13 : اطلاعات آنالیز تنش وکرنش سازه 32
جدول 14: بعضی نتایج حاصل از تست های غیر ارتعاشاتی 53

1. مقدمه

کوادکوپتر یکی از پیچیدترین وسایل پرنده بدون سرنشین است که به دلیل کمک گرفتن از چهار پره برای نیروی پیشرانش، کواد (چهار) کوپتر نامیده می شوند. این نوع پرنده عامود پرواز برخلاف پرنده موسوم –بالگرد- است که دارای یک روتور برای تولید لیفت و با زاویه دادن به روتور تراست یا مولفه افقی لیفت تولید می شود. البته بیکوپتر، تریکوپتر ...اکتاکوپتر وجود دارند، ولی کوادکوپتر به خاطر پایداری، وزن، مانور و الگوریتم کنترل شبه ساده در بین هواداران جا افتاده وبیشتر توجه به خود جلب کرده است.

با وجود اینکه مدل های اولیه کوادکوپتر ها در سال 1920 ساخته وتست شده است[1]، اما به این دلیل که کنترل وتنظیم پرواز چنین پهپاد بسیار سخت بود، پیشرفت در این زمینه فقط از اواخر دهه ی 2000 به بعد صورت گرفته است، واین در واقع پس از پیشرفت بزرگ در زمینه ی الکترونیک اتفاق افتاده که منجر به آسان وارزان شدن ساخت کنترلر ها، شتاب سنج ها وسیستم های موقعیت یاب شده است[2].



شکل 1: یکي از اولین مدل هاي کوادکوپتر که توسط ایتینه اوهیمشین سال 1924 ساخته شده (3)

کوادکوپتر ها به دلیل داشتن قدرت مانور فوق العاده و پرواز هایی با تعادل بالا از کاربرد های بسیار گسترده در زمینه های تحقیقاتی، نظامی، تصویر برداری و تفریحی برخوردارند.

اگرچه پیشرفت الکترونیک به جایی خوب پیش رفت و در به کار گرفتن کوادکوپترها کمک شایانی کرد، ولی هنوز مشکلاتی بر سر راه این تکنولوژی وجود دارد که استفاده از آن را محدود می کند؛ به

عنوان مثال یکی از ضعف های اصلی باتری هاست. با اینکه باتریهای مدرن لیتیوم-پلیمر ظرفیت خوبی دارند، اما هنوز نمی توان کوادروتوری ساخت که بیشتر از 40 دقیقه پرواز کند.

امروزه وبه علت رواج به روز افزوده این پهپادها نیاز است که محققان در مورد بهبود وبهینه سازی سازه های کوادکوپتر ورفع مشکلات آن، مانند ارتعاشات وظرفیت کم باتریها، بحث کنند وروش های استفاده بهینه از این پرنده های پر کاربرد پیدا کنند.

تعداد زیادی از مقاله ها وپروژه ها در مورد ساختن وبهبود سازه وکنترل کوادکوپترها انجام شده است که شاید یکی از مهمترین آنها پروژه ی آردوپایلوت (*ardu-pilot*) است که سال 2007 توسط کریس آندرسون وجوردی مونز ساخته شده و تحقیقات خیلی ارزشمندی در طی آن انجام شده است.[4]

کوادکوپترها با استفاده از دو مفهوم لیفت و گشتاور پرواز وحرکت می کنند. آنها مثال خوبی از قانون سوم نیوتن محسوب می شوند که می گوید هر عمل دارای عکس العمل مساوی ولی در جهت مخالف است. در بالگرد برای اینکه به خاطر کشتاور دورانی روتور آن حول خود نچرخد، یک روتور دم اضافه می شود تا گشتاور مساوی در جهت مخالف به بالگرد وارد کند. اما کوادکوپتر با چرخاندن روتورها در دو جهت مختلف این مطلب را برآورده می کند.

کوادکوپتر یک تکنولوژی است که در آن مکانیک، الکترونیک، مخابرات، ناوبری وهوافضا جمع شده است. کوادکوپتر دارای پیکربندی وتنظیمات متنوع از نوع سازه گرفته تا نوع کنترلر واز روش نصب موتورهای براشلس گرفته تا روش کنترل وهدایت آن است. همچنین می توان خیلی از تجهیزات جانبی نظیر جی پی اس به آن اضافه کرد.

مثل هر تکنولوژی دیگر، کوادکوپتر در کنار ایجابیات بسیار آن، معایبی هم دارد؛ معایبی در روش استفاده از آن و در نحوه استفاده از آن است. مثلا در لبنان داشتن یک کوادروتور مجوز می خواهد زیرا بعضی ها با داشتن آن به حریم خصوصی تجسس می کردند. همچنین در یک موقعی یک کوادروتور در پرواز بالای فرودگاه ها، اگر به یکی از توربینهای هواپیماها بخورد، می تواند فاجعه درست کند. از طرفی، روش استفاده از کوادکوپتر هم مهم است؛ کسی که کوادکوپتر استفاده کند باید عینک بزند، و احتیاط لازم را رعایت کند ودر فضای باز استفاده شود. به عنوان مثال در ماه می سال 2014 در ایالت ویریژینا در ایالات متحده یک کوادکوپتر یک کیلوگرامی بر سر تماشاچیان گاو بازی افتاد.[5] در نهایت، کوادکوپتر مثل هر ماشین دیگر، احتمال خراب شدن را دارد. بنابراین، مهارت هدایت کوادکوپتر یک نیاز تلقی می شود و کار هر کس نیست وبه آموزش نیاز دارد؛ به خاطر همین نرم افزارهای سیمولینک برای یادگرفتن هدایت وکنترل آنها ساخته وعرضه شد.

یک تصور غلط وجود دارد وآن این است که ساختار کوادروتور خیلی ساده است. در حقیقت، پیچیدگی های کوادکوپتر باعث می شود که اگر تلرانسیهای ظریف رعایت نشود، کوادکوپتر نمی تواند پرواز کند.

همچنین، مقالاتی زیادی راجع به کاربردهای کوادروتور وپهپادها نوشته شده است. بعضی مقالات ادعا دارند که مالتی کوپترها به زودی جای انسان در کارخانجات را می گیرند. این ادعا به خصوص در کارهای باربری و کالارسانی، سم پاشی وغیره تاکید شد زیرا زمان کار را کاهش می دهد و امنیت را بالا می برد. این مساله در 10 الی 20 سال آینده تحقق پیدا می کند وهر نفر می تواند خودروی پرنده خود –که همیشه آن را آرزو می کرد- را داشته باشد.[6]

در مقاله دیگری، ادعا شد که به کارگیری کوادروتورها در کشاورزی باعث صرفه جویی در زمان وهزینه ها می شود. این مقاله توضیح می دهد چگونه کوادروتور چک های سریع ولازم بر گیاهان ومحاصیل را به سرعت انجام می دهد. آنها اجازه می دهند که توجه بیشتری به رشد محاصیل بدون نیاز به اقدامات فیزیکی صورت بگیرد.[7]

پروژه مورد نظر شامل بررسی ارتعاشات وبهبود طراحی سازه ی یک کوادکوپتر سبک می باشد. این کوادکوپتر تحقیقاتی که توسط محققان شرکت مهندسی صنعت و دانش رهپویان افلاک (صدرا) ساخته شده ولی مشکل پرواز داشته و نیاز به بهبود و برطرف ارتعاشات سازه داشته است. این کوادروتور در سال قبل به صورت دستی ساخته شد، وبعضی قطعات آن نظیر کنترلر توسط خود شرکت صدرا تولید شد.

وضعیت موجود به این صورت است که ارتعاشات روی سنسورها از حد مجاز بیشتر بوده، و داده برداری به شکل خوب صورت نمی گرفت.

جدول 1: وضعیت ارتعاشات کوادکوپتر قبل از بهبود

راستای شتاب	ماکزیمم شتاب در وضعیت قابل قبول	وضعیت موجود (قبل از بهبود)
X	+/- 0.3 g	+/- 1.3 g
Y	+/- 0.3 g	+/- 1.73 g
Z	+/- 0.5 g	+/- 2g

بنابراین، هدف از این پروژه این است که:

- ✓ مصدر ارتعاشات شناخته و آنالیز شود،
- ✓ بررسی بدنۀ (فریم) کوادکوپتر از لحاظ ارتعاشاتی وفرکانسهای طبیعی بر حسب شکل هندسی وجنس مواد آن انجام شود،
- ✓ تاثیر مصدر ارتعاشات بر سازه ی کوادکوپتر بررسی شود،
- ✓ راه حل های برای بر طرف ارتعاشات نظیر بالانس کردن پره ها، اضافه کردن جاذبهای ارتعاشاتی و جداسازی مصدر ارتعاشات یا ایزوله کردن آن، اضافه ضریب دمپر وغیره ارائه، تحلیل و تست شود، و
- ✓ بهبود کلی سازه کوادکوپتر مورد نظر

در مراحل بعدتر بعضی از نقاط وهدفها اضافه شد:

- بررسی الگوریتم کنترلی، وتیونینگ مردن ضرایب پی آی دی،
- بررسی پرفورمنس وکارایی قطعات کوادکوپتر نظیر اسپید کنترلر وغیره، و
- و امکان سنجی تغییر بورد ناوبری وقطعات حساس کوادروتور.

به غرض رسیدن به اهداف مورد نظر، در ابتدای هر روش، آن به صورت تیوریک تحلیل وآنالیز شده، سپس بر کوادروتور اعمال، و نتایج آن تحلیل می شد.

2. تحلیل مسأله

2-1 . کوادکوپتر وقطعات آن

فریم یا بدنه، پره ها و موتورهای براشلس الکتریکی قطعات اساسی تشکیل دهندۀ کوادروتور را تشکیل می دهند. برای کارآیی بهتر وعملکرد بهینه کواد، باید موتورها و پره ها در فاصله های مساوی قرار بگیرند. جنس این قطعات هم مهم است؛ به عنوان مثال فیبر کربن که اخیرا راهی بازار وصنعت شد استحکام فولاد را دارد در حالی که دانسیتۀ وزنی آن به مراتب کمتر است، واین در صنعت هوافضا یک هدف ارزشمند محسوب می شود. قطعات الکترونیکی که کواد را راه می اندازد دقیقا مثل قطعات الکترونیکی راه انداز RC Helicopter است که شامل ماژول الکتریکی کنترل سرعت (اسپید کنترلر)، میکروکنترلر یا کمپیوتر کوچک (پردازنده و قطعات جانبی نظیر حافظه و...) تعبیه شده برای کنترل وبرنامه نویسی و باطری می شود.

I. بدنه:

بدنه همان سازه ایست که همه قطعات برآن سوار می شوند. حالت بهینه آنها این است که جرم کمی واستحکام بیشتری داشته باشند. برای انتخاب ویا ساختن فریم سه عامل مهم وجود دارد: جرم، سایز کواد و جنس مواد. بدنه باید استحکام لازم را داشته باشد تا ارتعاشات ناشی از موتورها را خنثی ویا به حداقل برساند. معمولا آنها از سه قطعه تشکیل می شوند:

- قطعه یا پلیت مرکزی که قطعات الکترونیکی بر آن سوار می شوند،
- چهار بازو که به قطعه مرکزی وصل می شوند، و
- چهار براکت بر روی انتهای بازوها برای نصب موتورها.

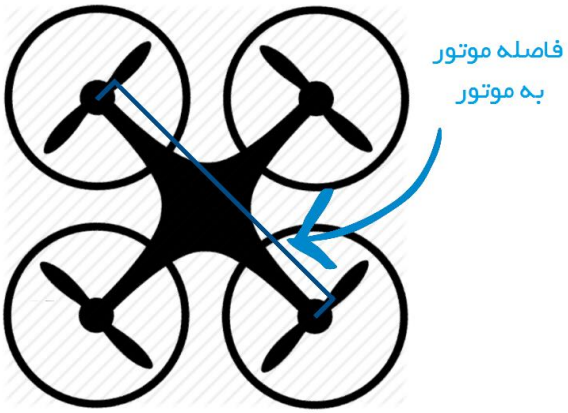
بدیهی است که هرچه قدر این قطعات بتواند به راحتی تفکیک ونصب شود بهتر است؛ این یک اصل از اصول TRIZ است.

سایز وشکل بدنه ها متنوع بوده و بر حسب کاربرد ساخته می شوند. جنس آنها هم با گذشت زمان متنوع و پیشرفت کرده است، آنها معمولا از مواد زیر ساخته می شوند:

- فیبر کربن- بهترین مادهٔ جاذب ارتعاشات همراه با استحکام قوی وجرم نسبتا کم است. اما قیمت این ماده خیلی زیاد است.
- آلیاژ آلومینیوم- تیرهای مربعی توخالی آلومینیومی خیلی استفاده می شوند. ولی از لحاظ ارتعاشاتی خیلی بهینه نیست ودر بعضی حالات می تواند داده برداری سنسورها را به چالش بکشد.
- چوپ مثل چوپ MDF – خیلی کم استفاده می شوند. آنها قدرت جذب ارتعاشات را دارند اما از استحکام کمی برخوردار هستند.
- فیبر گلاس و یا پلاستیک- کاربرد زیادی دارند زیرا هم مشخصات قابل قبولی دارند وهم قیمتی زیاد ندارند.

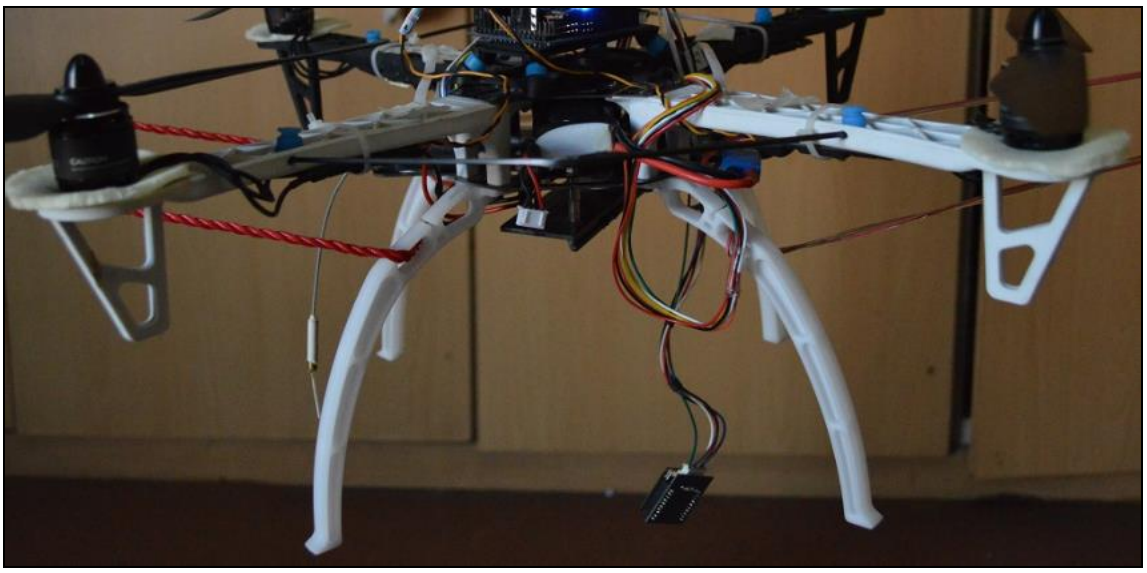
پلیت مرکزی معمولا از فیبر گلاس ساخته می شود.

برای تعیین سایز بدنه از دو اصطلاح "فاصله موتور به موتور" (motor-to-motor distance) که فاصله بین دو نوک بازوی متقابل می باشد. این فاصله معمولا به قطر پره ها بستگی دارد زیرا هرچه قدر قطر پره زیاد شود، این فاصله باید افزایش یابد تا پره ها به هم برخورد نکنند.



شکل 2: فاصله موتور به موتور

در این پروژه، بازوهای کوادکوپتر از جنس پلاستیک ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) تقویت شده، پلیت مرکزی از جنس فیبر گلاس، و فاصله موتور-به-موتور تقریبا 50 سم است.



شکل 3: بدنه کوادروتور مورد نظر پروژه

II. موتورها (روتورها):

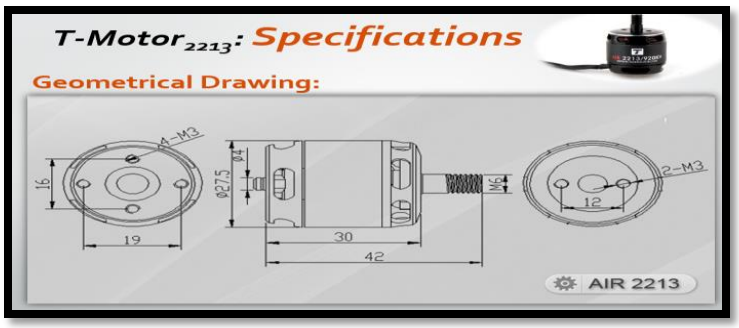
هدف موتورها چرخاندن پره ها برای تولید لیفت است. در این جور کاربردها فقط موتورهای براشلس از پس عهده تولید تراست لازم در می آیند، زیرا هم تورک و سرعت مطلوبی دارند، هم قابل کنترل هستند وهم عمر طولانی ومداومت (به خاطر عدم وجود جاروبک ها واصطکاک) دارند.

البته این موتورها در بحث کویلینگ یا سیم کشی و میدان مغناطیسی شبیه به موتورهای DC هستند، ولی چون آهن رباها (قطب ها) روی شفت (روتور)، و سیم پیچ روی بدنه سیلندر (استاتور) قرار دارند، دیگر نیاز به جاروبک برای سویچینگ برق نیست، بلکه کافی است آن سویچینگ به صورت الکترونیکی انجام شود. زمان تایمینگ این کار توسط سنسور هال تعیین می شود که در داخل هر موتور براشلس تعبیه می شود. این موتورها می توانند به سرعت های بالاتر از موتور های دی سی برسند، همچنین کارایی بیشتری دارند زیرا قدرت بر اثر اصطکاک جاروبک ها به هدر نمی رود.

هر موتور علاوه بر مشخصات هندسی آن (سایز آن)، یک مشخصه اساسی دارد:(Kv (kilovolts است. این مقدار نشان دهندهٔ تعداد دورها در دقیقه (RPM) بر حسب ولت است (Kv = RPMs per

Volt). بنابراین هرچه قدر این مقدار بالاتر رود، سرعت موتور بالا می رود، ولی تورک یا گشتاور آن هم کم می شود.

موتورهای استفاده شده در این پروژه از شرکت T-Motor و 920 Kv دارند.



شکل 4: مشخصات هندسی موتور براشلس استفاده شده در کوادروتور

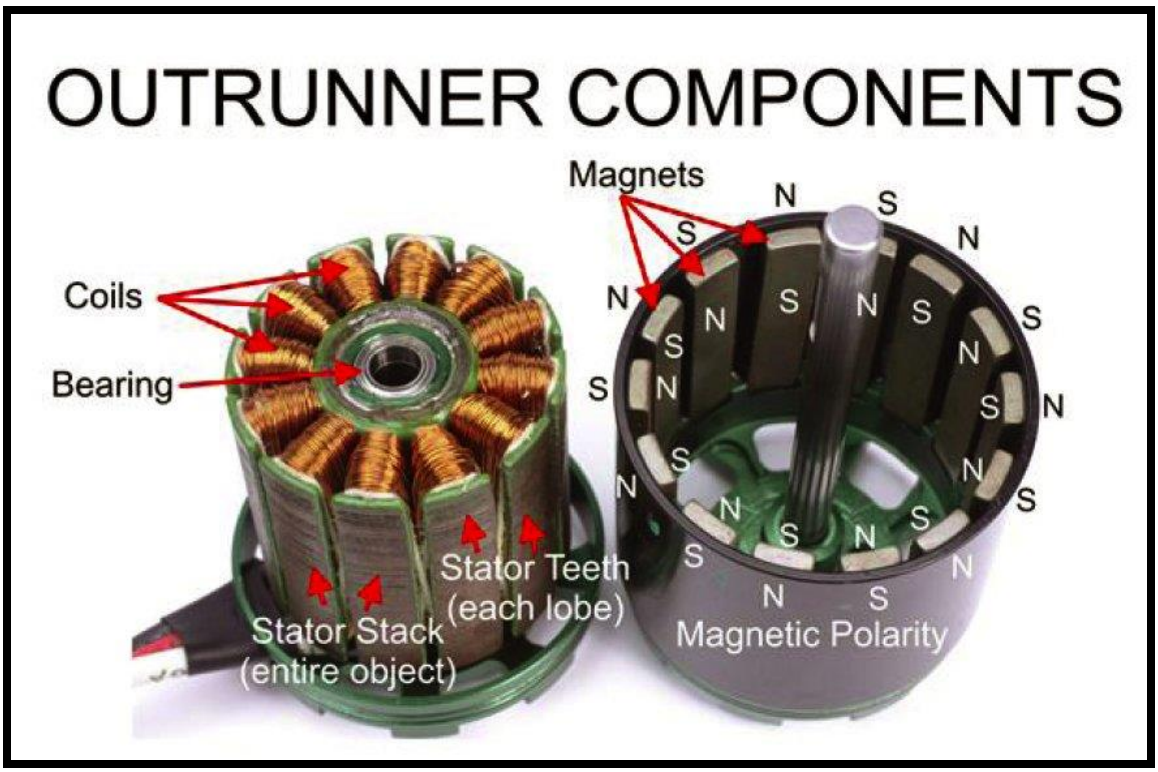
مشخصات موتور به این صورت است:

- جرم هر موتور 54 گرم است.
- تعداد سل های باتری: 3 تا 4.
- مقاومت داخلی 132 میلی اهم است.
- جریان ماکسیمم 18 امپر است.
- جریان آیدل (در جا حرکت کردن) برای 10 ولت تقریبا 0.5 امپر است.

شکل 5: بروشور شرکت T-Motor برای موتور مورد نظر

جدول 2: مشخصات مکاترونیکی موتور از طرف شرکت T-Motor

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	RPM	Efficiency (g/W)
AIR 2213 KV920	11.1	T 9545	50%	2	22.2	240	4400	10.81
			65%	3.8	42.18	386	5900	9.15
			75%	5.5	61.05	490	6900	8.03
			85%	7.2	79.92	594	7800	7.43
			100%	9.8	108.78	722	8300	6.64
	12		50%	2.3	27.6	278	4800	10.07
			65%	4.4	52.8	445	6300	8.43
			75%	6.2	74.4	568	2200	7.63
			85%	8.1	97.2	679	8100	6.99
			100%	10.9	130.8	813	8900	6.22
	14.8		50%	3.3	48.84	403	5700	8.25
			65%	6.2	91.76	636	7600	6.93
			75%	8.4	124.32	786	8600	6.32
			85%	10.7	158.36	907	9500	5.73
			100%	14.3	211.64	1084	10200	5.12



شکل 6: شماتیک و قطعات موتورهای براشلس

III. باطری:

باطری های LiPo (Lithium Polymer) در این کاربردها استفاده می شوند زیرا جرم کمی دارند. باطریهای NiMH (Nickel Metal Hydride) هم ممکن است استفاده شوند زیرا قیمت کمتری دارند ولی جرمی بزرگتر از باتریهای لیپو دارند.

مهمترین مشخصات باطری های لیپو ظرفیت تخلیه (C rating) و نرخ قدرت یا نرخ جریان دهی (mAh or milliamps per hour) است. نرخ قدرت نشانگر آن است که باطری چقدر می تواند دوام بیاورد و قدرت را تامین کند. هر 1 mAh نشان دهندهٔ 1 ساعت برای حالتی که 0.001 آمپر از باطری کشیده می شود، می باشد. ظرفیت تخلیه نشانگر نرخی است که به صورت ایمن می توان در آن از باتری mAh کشید. اگر بیشتر از آن قدرت کشیده شود، باطری باد کرده ومنفجر می شود.

بدیهی است که هرچه تعداد باطری ها زیاد شود، جرم هم زیاد می شود، ودر نتیجه همیشه یک چالش وحالت کشمکش بین جرم کل و زمان مداومت پروازی وجود دارد؛ به عبارتی، تعداد باطری ها باید بهینه باشد واین طور نیست که اگر تعداد آنها زیاد شود، مداومت پروازی بیشتری خواهد بود، زیرا موتورها جریان بیشتری خواهند کشید تا بر نیروی جرم اضافه شده غلبه کرده ولیفت لازم را تولید کنند. هر باطری لیتیوم از تعداد سل تشکیل می شود که هر سل 3.7 ولت دارد.

شکل 7: مشخصات باتری های لیتیوم-پلیمر

باطری استفاده شده در این پروژه 3 سل دارد. بنا بر این 11.1 ولت می دهد. همچنین ظرفیت تخلیه آن 30 بوده، ظرفیت شارژ شدن (وقتی دوباره می خواهد شارژ شود) 5 بوده، و نرخ قدرت *2800*

mAh است. ملاحظه می شود که ثابت زمانی شارژ شدن به مراتب بیشتر از ثابت زمانی شارژدهی (تخلیه) می باشد.

شکل 8: باتری استفاده شده در پروژه

حداکثر جریان که می توان از باطری کشید برابر است با ظرفیت تخلیه ضرب در نرخ قدرت است. برای باطری پروژه، این مقدار 84 آمپر می باشد. دقت شود که حد اکثر جریان موتورها 18 آمپر بوده، که برای 4 موتور 72 آمپر می شود. بنابراین انتخاب باطری درست است.

IV. اسپید کنترلر:

Electronic Speed Controller یا ESC وظیفه کنترل کردن سرعت موتورها را دارد، آنها بهترین ابزاری هستند برای ایجاد سرعت های معین در موتورها است. در کواد، برای هر موتور یک اسپید کنترلر نیاز است. اسپید کنترلر از یک طرف به باتری (تغذیه + و-) و به کنترلر (میزان مدوله‌سازی پهنای پالس یا PWM: Pulse-width modulation برای تعیین مقدار قدرتی است که به موتور باید برسد و به تبع آن سرعت تعیین می شود)، از طرف دیگر به موتور توسط 3 سیم (+ و- وخروجی سنسور هال) متصل می شود.

بهتر است که فرکانس اسپید کنترلر نسبتا بزرگ باشد تا دستورات آن به موتور خیلی سریع باشد و لگ زمانی نداشته باشد. در نتیجه، سرعت موتورها می تواند به سرعت تنظیم شود تا پایداری کوادروتور محقق شود.

سفت افزار (Firmware) تعبیه شده در ESC می تواند نرخ تازه سازی (Refresh rate) را تغییر دهد طوری که موتورها دستورات زیادی بر ثانیه از طرف اسپید کنترلر بگیرند. رفرش ریت همان

مقدار دستوراتی که بر ثانیه اسپید کنترلر می تواند به موتورها بدهد. در این پروژه رفرش ریت اسپید کنترلرهای استفاده شده 600 Hz می باشد.

اسپید کنترلر باید بتواند جریانی که موتورها را می کشند را تحمل کند ونسوزد، برای همین باید جریان قابل تحمل آنها بیشتر از حداکثر جزیان موتورها باشد. در این پروژه، جریان قابل تحمل اسپید کنترلرها 20 آمپر یوده که از حداکثر جریان موتورها (18 آمپر) بیشتر است.

شکل 9: اسپید کنترلر استفاده شده در پروژه از شرکت T-Motor

V. پره ها:

کوادروتور دارای چهار پره (به تعداد موتورها) است؛ دو تا از آنها در جهت عقربه ساعت می چرخند، و دو تا در خلاف عقربه ساعت می چرخند تا گشتاور اعمالی به بدنه خنثی شود و کواد حول خودش نچرخد. بنابراین دو نوع پره وجود دارد: دفع کننده (Pusher) که در جهت عقربه ساعت می چرخد، و کشنده (Puller) که خلاف عقربه ساعت می چرخد.

مهمترین مشخصات پره قطر و گام آن است. هرچه قدر قطر و گام آن بیشتر باشد، تراست تولید شده بیشتر می شود، و قدرت مطلوب (مصرف انرژی) هم بیشتر می شود، ودر نتیجه می توان جرم بیشتری حمل کرد. معمولا وقتی RPM کوچک با شد، از پره های با قطر وگام بیشتری ا ستفاده می شود، و برعکس. پره های استفاده شده در پروژه 4.5 اینچ گام و9.5 اینچ قطر دارند (9.5X4.5).

شکل 10: پره های استفاده شده در پروژه

VI. گیرنده و فرستانده رادیویی:

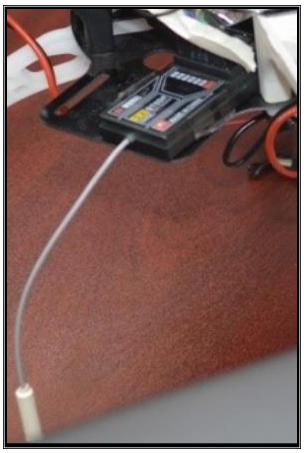
گیرنده وفرستانده رادیویی برای کنترل کوادروتور مهم هستند. فرستانده حداقل باید 4 کانال داشته باشد تا کار اساسی کوادروتور را کنترل کند. هر کانال می تواند یک کار انجام دهد؛ به عنوان مثال 4 کانال اصلی عبارت هستند از: Throttle, Yaw, Pitch, and Roll.

توصیه می شود که فرستانده 8 کانال داشته باشد تا از انعطاف پذیری مطلوب برخوردار باشد. کوادروتورها می توانند توسط خیلی از روش ها کنترل شوند، اما مرسوم ترین روش همان RC Transmitter در دو مود: Stable mode and Rate (acrobatic) mode.

تفاوت این دو مود در این است که کنترل چه فیدبکی را در نظر می گیرد. به عنوان مثال در Rate mode فقط داده های ژایروسکوپ در کنترل کواد در نظر گرفته می شوند، ودر نتیجه، فرستانده کنترل سرعت حول 3 محور را کنترل می کند، و بطور اتومات تعادل برقرار نخواهد بود. در مود دوم سرعت موتورها به طور اتومات تنظیم می شوند تا کوادروتور پایدار ومتعادل بماند.

گیرنده رادیویی روی کواد نصب می شود ودستورات فرستاده شده را به کنترلر ارسال می کند.

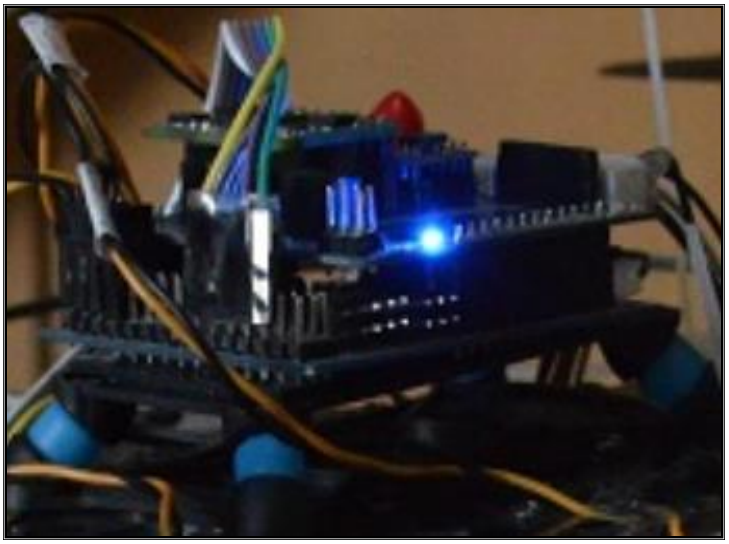
شکل 11: فرستانده رادیویی استفاده شده در پروژه



شکل 12: گیرنده رادیویی نصب شده بر کواد در پروژه

VII. کنترلر:

فلایت کنترلر مغز کوادروتور است. این مغز دارای بورد ناوبری (IMU: inertial measurement unit) که حاوی سنسورهای ژیروسکوپ، شتاب سنج ومگنتومتر است، می باشد. این بورد در تعیین سرعت هر یک از موتورها نقش اول واساسی را بازی می کند. این فلایت کنترلر می تواند ساده ویا پیچیده باشد. فلایت کنترلی که قیمتی مناسب داشته باشد، نصب آن آسان باشد، و کارآیی خوب داشته باشد، مطلوب است. در این پروژه فلایت کنترلر توسط شرکت صدرا ساخته شده است.



شکل 13: فلایت کنترلر استفاده شده در پروژه

این فلایت کنترلر به طور کلی از دو قطعه اساسی تشکیل می شود: IMU و میکروکنترلر. میکروکنترلر قابل برنامه ریزی است و با استفاده از زبان ویژول بیسیک سی برنامه ریزی می شود.

IMU جهت، سرعت و نیروهای جاذبه را اندازه گیری می کند. جهت را حساب می کند و زاویه های Yaw, Pitch, and Roll تعیین می شوند. این زاویه ها که تعیین شد، به کنترلر فرستاده می شوند، تا کنترلر براساس برنامه ای که در آن نوشته شد، دستورات لازم را به موتورها ارسال کند. IMU معمولا 6 درجه آزادی دارد: 3 درجه آزادی شتاب سنج، و 3 درجه آزادی ژایروسکوپ. البته بهتر است که به اینها 3 درجه آزادی مگنتومتر اضافه شود تا پایداری Yaw بهتر شود. شتاب سنج می تواند شتاب و نیرو را اندازه گیری کند، ژایروسکوپ سرعت زاویه ای را حساب می کند. داده های این دو سنسور در کنترلر (میکروکنترلر) با هم ترکیب می شوند وبا استفاده از فیلتر کالمان خروجی مطلوب (دستورات) ارسال می شوند.

قطعاتی دیگر مثل GPS، بارومتر، دوربین وغیره می توانند به کواد اضافه شوند که در این پروژه مد نظر نیست.

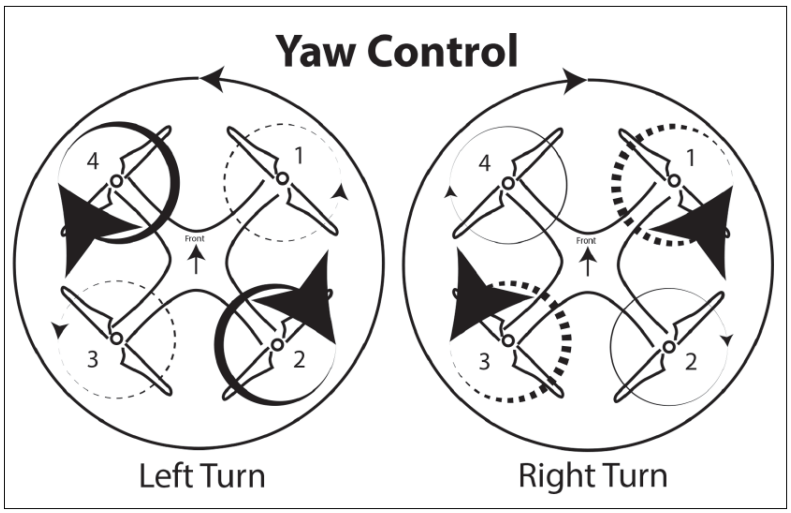
2-2 . دینامیک کوادروتور

قانون سوم نیوتن دینامیک حاکم بر کوادروتور را تشکیل می دهد. وقتی که دو موتور در یک جهت، و دو موتور دیگر در جهت مخالف بچرخند، تورک اعمالی بر فریم خنثی شده وکوادروتور حول خود نمی

چرخد. با وجود نیروی تراتست (لیفت)، اگر آن نیرو بر نیروی وزن غلبه کند به پرواز عمودی در می آید و Hovering (معلق شدن در هوا) می کند. حالا 3 نوع حرکت وجود دارد:

i. <u>Yaw:</u>

اگر از بالا به کوادروتور نگاه شود، Yaw همان حرکت به سمت راست ویا چپ است.

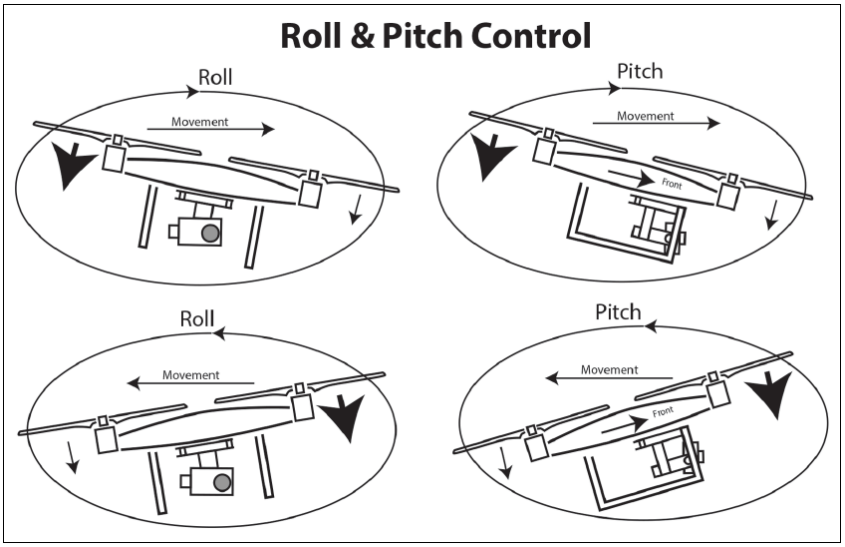


شکل 14: حرکت Yaw

همان طور که ملاحظه می شود، پره های 1 و3 در یک جهت، وپره های 2 و4 در خلاف آن جهت می چرخند. اگر سرعت موتورهای 1 و3 کم بشود، وسرعت موتورهای 2 و4 زیاد شود، حرکت Yaw به سمت چپ صورت می گیرد زیرا تورک موتورهای 2 و4 به سمت راست بیشتر بوده، وبراساس قانون سوم نیوتن عکس العمل تورک اعمال شده بر بدنه به جهت چپ خواهد بود. عکس این امر منجر به چرخیدن کواد به سمت راست می شود.

ii. <u>Roll & Pitch:</u>

وقتی سرعت یک موتور افزایش یابد، هوای بیشتری به سمت پایین کشیده می شود، و در نتیجه لیفت آن موتور نسبت به بقیه زیاد می شود، و کوادروتور انحنا پیدا می کند. در نتیجه، نیروی لیفت کج می شود، ومولفه افقی پیدا می کند وباعث حرکت در سمت این مولفه می شود. حالا اگر از جلو به کوادروتور نگاه شود، اگر موتور یا موتورهای سمت چپ سرعت بگیرند، وسرعت موتورهای سمت چپ کمتر شود، کواد به سمت راست کج شده وبه آن سمت حرکت می کند. این حرکت Roll نامیده می شود. اگر از سمت جانبی بع کواد نگاه شود، حرکت Pitch تولید می شود.



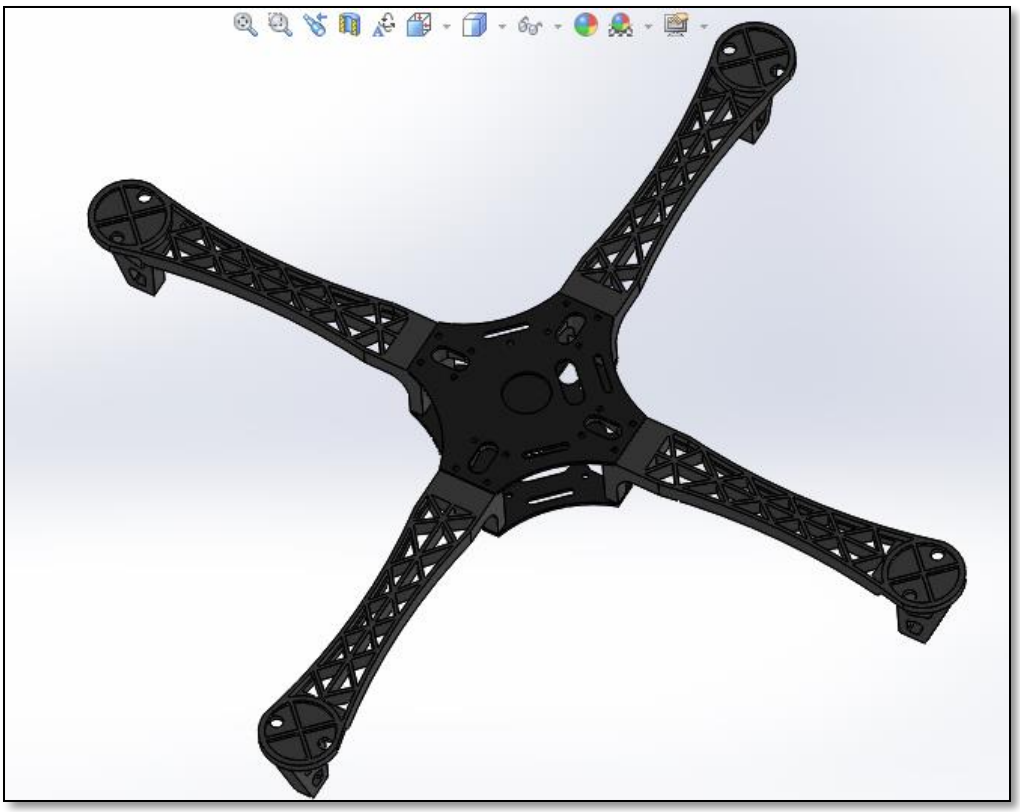
شکل 15: حرکت Pitch و Yaw

نکته قابل توجه این است که دو پیکربندی یا Configuration برای کنترل کواد وجود دارد: + مود و X مود. + مود یعنی محور x یا سمت جلویی IMU به سمت یک از بازوها باشد. در حالی که X مود یعنی محور x به سمت بین بازوها باشد. این دو مود در نوشتن معادلات دینامیک حرکت متفاوت می باشند زیرا حرکت Pitch & Roll در این دو مود کاملا متفاوت است.

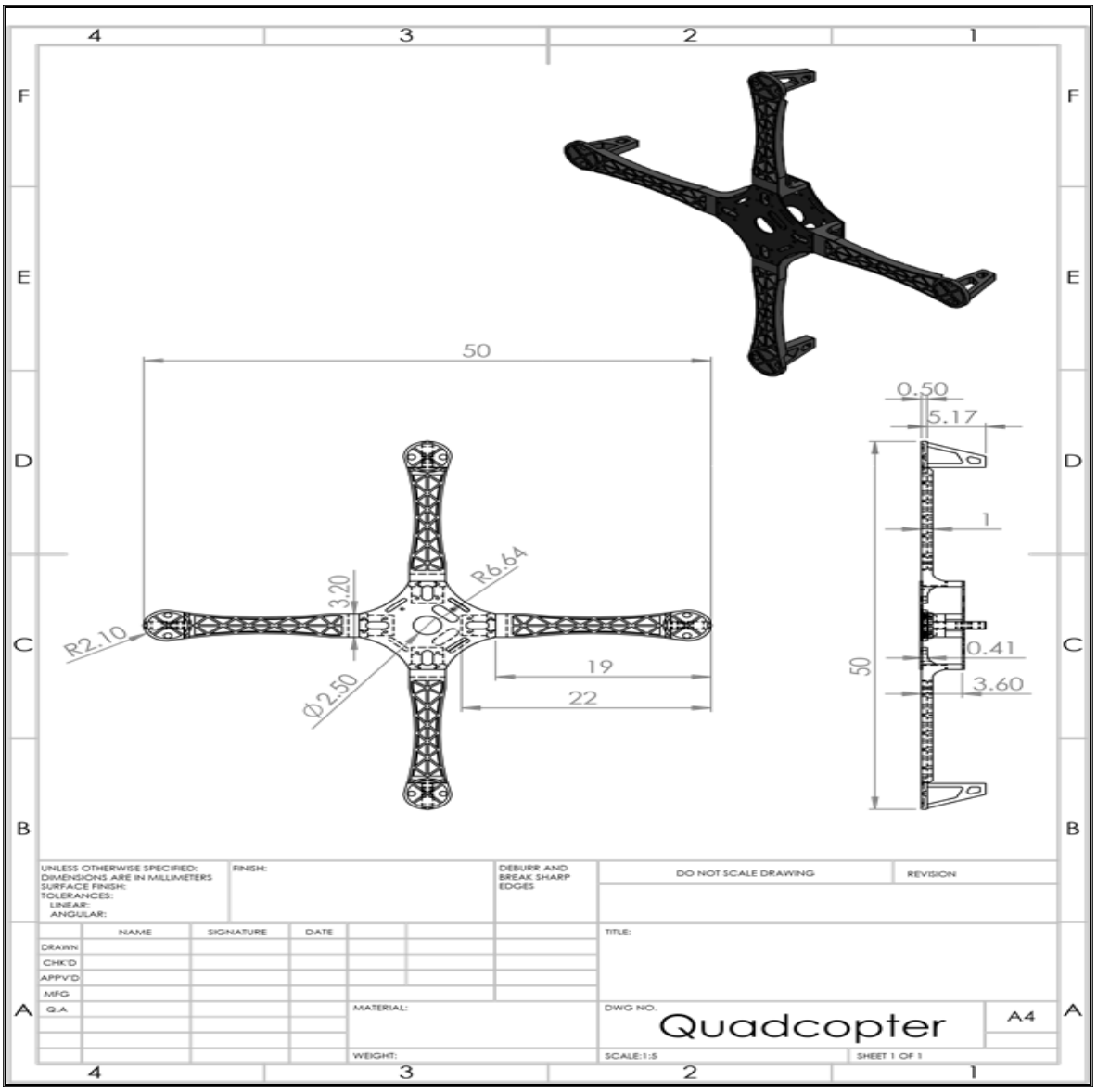
3-2 . بررسی ارتعاشات بدنه

A. فرکانس های طبیعی سازه

در ابتدا، بهتر است که گام اول تعیین فرکانس های طبیعی بدنه یا فریم کوداروتور مورد نظر باشد. برای این کار، ابعاد کوادروتور با تلرانس 1 ملم اندازه گرفته شدند. سپس کواد در نرم افزار SolidWorks مدل شده، وسپس در نرم افزار ANSYS آنالیز ارتعاشاتی، تنش وغیره صورت می گیرد.

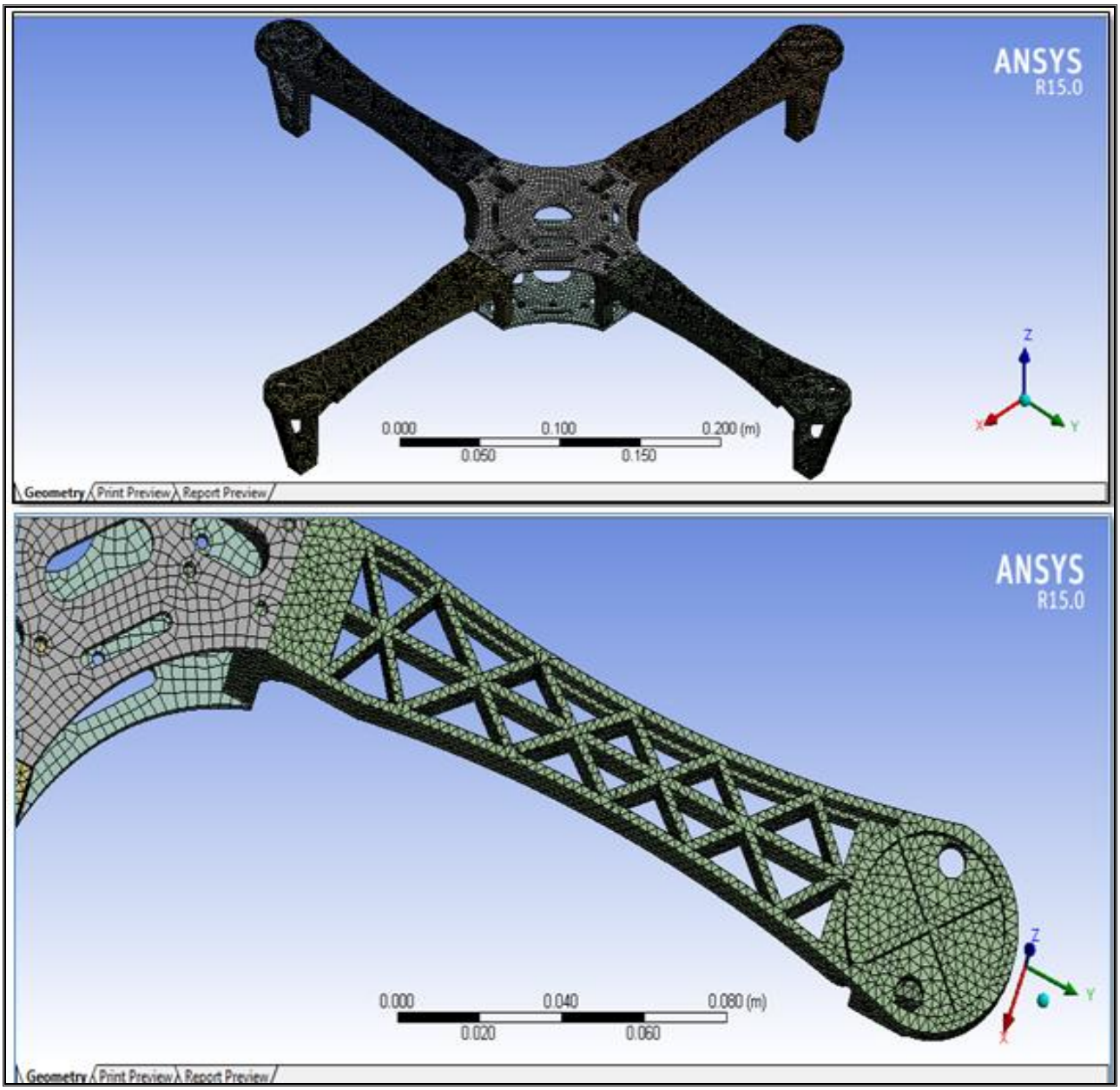


شکل 16: شبیه سازی 3-بعدی کوادروتور هدف در SolidWorks



شکل 17: تصویر 2-بعدی کواد

نرم افزار *ANSYS* براساس المان محدود (*Finite Element Method-FEM*) کار می کند؛ روش المان محدود روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی ونیز حل معادله‌های انتگرالی. اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی، که با روشهای عددی مانند اویلر حل می‌شوند، است. بنابراین سازه به تعداد قطعات کوچکتر (از اسم روش پیداست) تقسیم می شوند یه به اصطلاح *Meshing* (مش بندی) می شود، اما تعداد معادلات بر اثر شرایط مرزی (محل اتصال دو پارت – *Nodes*) زیاد می شوند. هرچه تعداد این معادلات بیشتر شود، دقت بالاتر رفته، ولی *CPU* قوی تر نیاز دارد.



شکل 18: مش بندی سازه کواد در نرم افزار ANSYS

جدول 3 : اطلاعات مش بندی. به تعداد المان ها و گره ها توجه شود

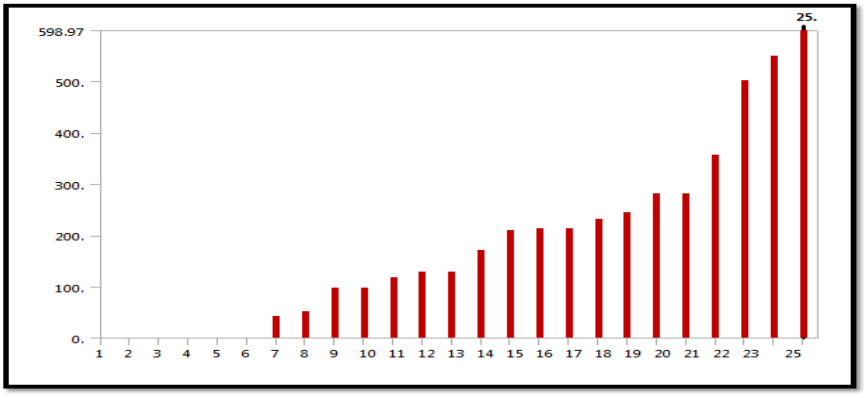
Object Name	Mesh
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Centre	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Centre	Coarse
Minimum Edge Length	1.4014e-004 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	Yes
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	219587
Elements	116326
Mesh Metric	None

اما برای حل این معادلات می بایستی مشخصات جنس مادهٔ سازهٔ کواد به *ANSYS* داده شود. همان طور که قبلا گفته شد، بازوها از جنس پلاستیک *ABS* بوده، و دو صفحه یا پلیت مرکزی از جنس فیبر گلاس هستند. با وارد کردن این اطلاعات، جرم، ابعاد هندسی وممانهای انرسی قطعات به دست می آید.

جدول 4 : مشخصات هندسی، ممانهای انرسی و جرم قطعات کواد

Object Name	UpperFrame-1	Quad Arm-1	QuadArm-4	QuadArm-2	UpperFrame-2	QuadArm-3
State	Meshed					
Visible	Yes					
Transparency	1					
Suppressed	No					
Stiffness Behavior	Flexible					
Coordinate System	Default Coordinate System					
Reference Temperature	By Environment					
Material						
Assignment	Fiber Glass	ABS			Fiber Glass	ABS
Nonlinear Effects	Yes					
Thermal Strain Effects	Yes					
Length X	0.152 m	4.2e-002 m		0.22 m	0.152 m	0.22 m
Length Y (m)	0.152	0.22		4.2e-002	0.152	4.2e-002
Length Z	2.e-003 m	5.6683e-002 m			2.e-003 m	5.6683e-002 m
Properties						
Volume	1.4733e-005 m^3	4.3165e-005 m^3			1.4733e-005 m^3	4.3165e-005 m^3
Mass	3.6832e-002 kg	4.4891e-002 kg			3.6832e-002 kg	4.4891e-002 kg
Centroid X (m)	6.7812e-002	6.8668e-002	6.8673e-002	-6.8439e-002	6.7721e-002	0.20578
Centroid Y	0.24884 m	0.11268 m	0.3869 m	0.24979 m	0.25065 m	0.24979 m
Centroid Z	0.20677 m	0.1959 m			0.16977 m	0.1959 m
Moment of Inertia Ip1	2.9966e-005 $kg{\cdot}m^2$	2.358e-004 $kg{\cdot}m^2$			2.9966e-005 $kg{\cdot}m^2$	2.358e-004 $kg{\cdot}m^2$
Moment of Inertia Ip2	2.9919e-005 $kg{\cdot}m^2$	9.966e-006 $kg{\cdot}m^2$			2.9919e-005 $kg{\cdot}m^2$	9.966e-006 $kg{\cdot}m^2$
Moment of Inertia Ip3	5.986e-005 $kg{\cdot}m^2$	2.3289e-004 $kg{\cdot}m^2$			5.986e-005 $kg{\cdot}m^2$	2.3289e-004 $kg{\cdot}m^2$
Statistics						
Nodes	9551	50326	50206	50015	9474	50015
Elements	1203	28617	28532	28391	1192	28391

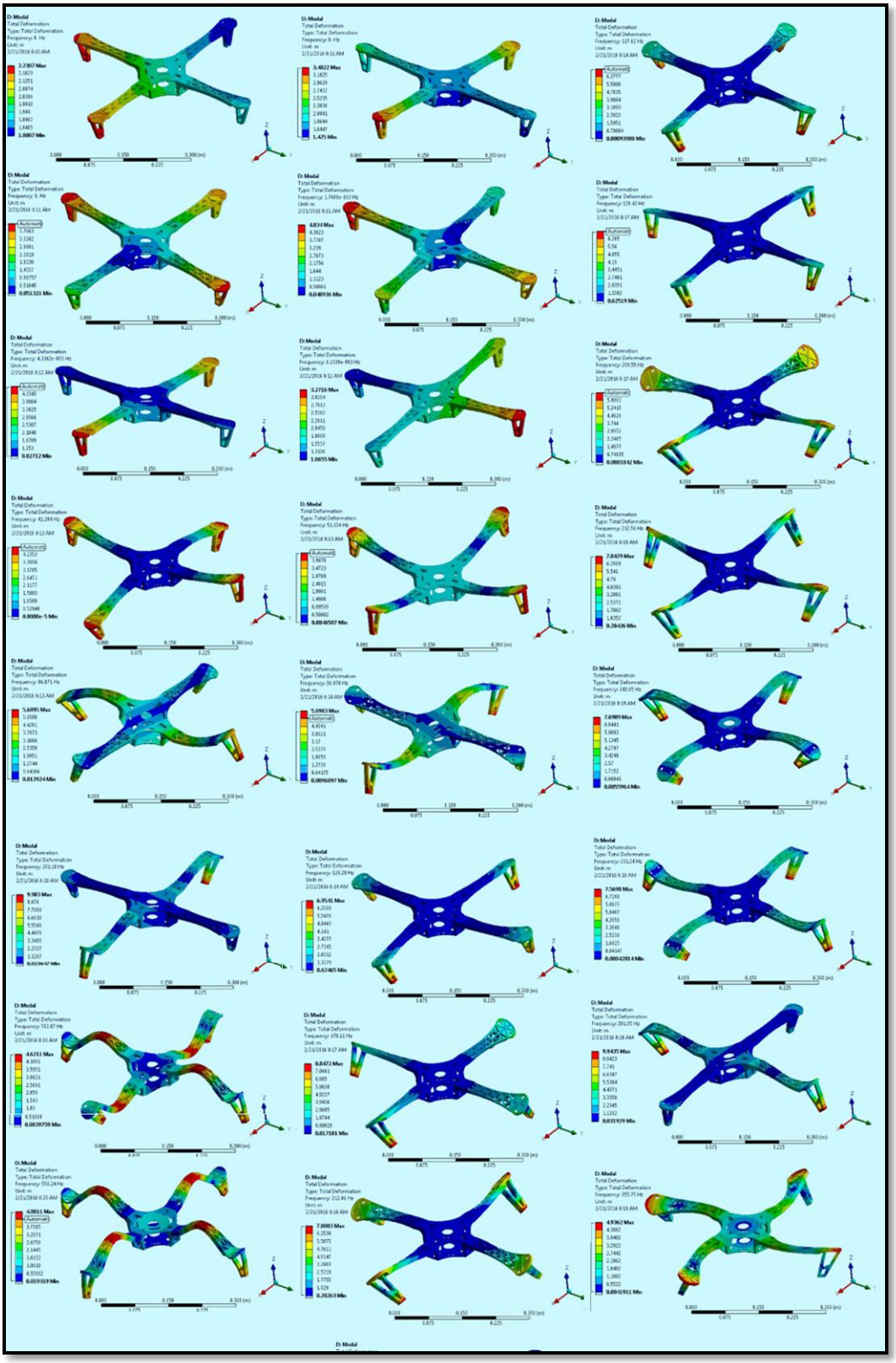
با این مقدمات، فرکانس ها ومودهای طبیعی سازه به دست می آید. بدیهی است که 6 فرکانس اول صفر خواهند بود زیرا این فرکانس ها نشانگر حرکت دینامیکی یک جسم صلب (سازه) در فضاست؛ به عبارتی، نشانگر 6 درجهٔ آزادی سیستم است: 3 درجه انتقالی و 3 درجه دورانی.



شکل 19: فرکانس های طبیعی کوادروتور

جدول 5 : فرکانسهای طبیعی سازه

Mode	Frequency [Hz]
1.	0
2.	
3.	
4.	1.7609e-003 ≈ 0
5.	4.3362e-003 ≈ 0
6.	8.2338e-003 ≈ 0
7.	42.284
8.	51.134
9.	96.971
10.	96.978
11.	117.62
12.	128.29
13.	128.42
14.	170.11
15.	208.55
16.	212.41
17.	212.56
18.	231.24
19.	243.85
20.	281.05
21.	281.18
22.	355.75
23.	502.07
24.	550.24
25.	598.97



شکل 20: مودهای فرکانسی سازه کوادروتور

B. فرکانس ارتعاشات وارد شده از طرف موتورها

با داشتن فرکانسهای طبیعی سازه، می توان با دانستن فرکانسهای قطعات دیگر (موتور، نیروی معکوس شونده باد وغیره) ارتعاشات را بررسی کرد؛ البته در اینجا از نیروهای هوا و اغتشاش صرف نظر می شود وفقط بر روی موتورها تمرکز می شود. هرچه مقدار فرکانسهای موتور از فرکانسهای طبیعی دورتر باشد، ارتعاشات تقریبا ناچیز خواهد بود. همچنین از بخش قبل ملاحظه می شود که فرکانسهای طبیعی تقریبا نزدیک به هم هستند، و فرصتی برای بازی با فرکانسهای ارتعاشات در بازه های طولانی وجود ندارد. واین در حقیقت کنترل کوادکوپترهای با فریم پلاستیکی را سخت تر می کند.

ذکر این نکته خالی از لطف نیست که فرکانس اسپید کنترلر ربطی به ارتعاشات ندارد. در واقع این فرکانس بیشترین فرکانسی است که اسپید کنترلر می تواند داده پردازی را تحمل بکند. به عبارتی، در هر ثانیه این دستگاه می تواند 600 بار داده بگیرد و بفرستد. دقیقا مثل فرکانس CPU لاپتوب است: وقتی گفته می‌شود قدرت CPU 2.4 میلیارد هرتز است یعنی این CPU قادر است در هر ثانیه 2.4 میلیارد دستورالعمل را پردازش کند.

با داشتن سرعت دورانی موتور، فرکانسها توسط رابطه زیر حساب می شوند:

$$\begin{cases} \boldsymbol{HZ = rev/s} \\ \boldsymbol{RPM = \dfrac{rev}{min}} \xrightarrow{\boldsymbol{yields}} \boldsymbol{f[hZ] = \dfrac{\omega[rpm]}{60}} \\ \boldsymbol{min = 60\ s} \end{cases} \qquad (1)$$

در نتیجه،

جدول 6: فرکانس ارتعاشات وارد شده از طرف موتورها

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	RPM	Efficiency (g/W)	Mechanical Vibration
	11.1		50%	2	22.2	240	4400	10.81	73.3 (HZ)
			65%	3.8	42.18	386	5900	9.15	98.3
			75%	5.5	61.05	490	6900	8.03	115
			85%	7.2	79.92	594	7800	7.43	130
			100%	9.8	108.78	722	8300	6.64	138.3

بالاترین فرکانس اعمالی *138.3 Hz* است. از بخش قبل، ملاحظه می شود که سازه 7 بار تحت فرکانس تشدید (42.3، 51.2، 96.971، 96.978، 117.62، 128.29 و 128.42 هرتز) قرار می گیرد. این نشان دهندهٔ وضعیت بد فریم است.

C. راه حل های تغییر جنس سازه

اگر فرض شود که فریم کاملا فیبر گلاس باشد، ملاحظه می شود که تعداد فرکانس های طبیعی در محدودهٔ کمتر از 600 Hz (محدوده ای که در بخش A مورد نظر بود ودر آن 25 فرکانس طبیعی وجود داشت) 63.2 ٪ کاهش یافت.

جدول 7 : فرکانس های طبیعی فریم فیبر گلاسی

Mode	Frequency [Hz]
1.	0
2.	
3.	
4.	6.0178e-003
5.	9.9714e-003
6.	1.3884e-002
7.	148.13
8.	196.59
9.	358.03
10.	358.22
11.	385.18
12.	433.01
13.	442.37
14.	613.74
15.	694.12
16.	724.76
17.	725.76
18.	729.34
19.	900.85
20.	967.63
21.	970.67
22.	1055.9
23.	1263.8
24.	1416.8
25.	1710.1

از طرفی، چون دانسیته پلاستیک *ABS 1.04 g.cm^-3* بوده، ودانسیتهٔ فیبرگلاس *2.5 g.cm^3* است، جرم سازه حداقل دوبرابر می شود. واین به نوبه خود، اقتضا می کند که موتورهای قوی تر، باطری های قویتر و... استفاده شوند.

اما از لحاظ ارتعاشاتی، اگر سازه کاملا فایبرگلاس باشد، وچون اولین فرکانس طبیعی 148.2 هرتز است، نتیجه می شود که سازه با ضریب اطمینان 1.07 اصلا به تشدید نخواهد رسید.

جدول 8: مشخصات فیبر گلاس و پلاستیک ABS

Fiber Glass

Fiber Glass > Constants

Density	2500 kg m^-3

Fiber Glass > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
20	7.7e+010	0.22	4.5833e+010	3.1557e+010

ABS

ABS > Constants

Density	1040 kg m^-3

ABS > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
20	2.3442e+009	0.35	2.6047e+009	8.6823e+008

ABS به طول کلی در دماهای بین *-20 to +80 C°* قابل استفاده است، وخواص مکانیکی آن با حرارت تغییر می کند. این پلاستیک ضربه را تحمل می کند.

حالا فرض می شود که فریم کواد کاملا فیبر کربن باشد. دانسیتهٔ وزنی ومدول کششی فیبر کربن بستگی به درصد الیاف کربن در آن دارد؛ هرچه این تعداد بیشتر شود، این دو پارامتر بیشتر می شوند. "گروه صنعتی آرشین" در جواب یک نامه اظهار داشتند که دانسیتهٔ فیبر کربن به طور میانگین *1.5* $g.cm^{-3}$است. از طرفی، در یک مقاله از شرکت ایرانی "کامپوزیت کار" ذکر شده که مدول کششی فیبر کربن معمولا 138 گیگا پاسکال است.

Carbon fiber is extremely strong. It is typical in engineering to measure the benefit of a material in terms of strength to weight ratio and stiffness to weight ratio, particularly in structural design, where added weight may translate into increased lifecycle costs or unsatisfactory performance. The stiffness of a material is measured by its modulus of elasticity. The modulus of carbon fiber is typically 20 msi (138 Gpa) and its ultimate tensile strength is typically 500 ksi (3.5 Gpa). High stiffness and strength carbon fiber materials are also available through specialized heat treatment processes with much higher values.

شکل 21: بخشی از مقاله ای درباره صنعت کامپوزیت فیبر کربن در ایران

با حل این مساله، نتیجه می شود که تعداد فرکانس های طبیعی در محدودهٔ کمتر از 500 Hz نسبت به بدنه پلاستیک 89.5٪ کاهش یافت. همچنین فرکانس طبیعی کوادروتور به 255.9 هرتز رسید، پس می توان گفت که سازه با ضریب اطمینان 1.85 هرگز به فرکانس تشدید نخواهد رسید.

جدول 9 : فرکانس های طبیعی سازه فیبر کربنی

Mode	Frequency [Hz]
1.	0
2.	
3.	
4.	1.1906e-002
5.	1.7653e-002
6.	2.3282e-002
7.	255.9
8.	339.74
9.	618.99
10.	619.28
11.	663.9
12.	746.77
13.	762.84
14.	1051.9
15.	1206.6
16.	1245.
17.	1246.5
18.	1253.1
19.	1561.9
20.	1679.9
21.	1685.3
22.	1839.4
23.	2182.9
24.	2471.6

با توجه به اینکه دانسیتهٔ فیبر کربن تقریبا 1.5 برابر دانسیتهٔ پلاستیک ABS 1.5 می باشد، بایستی بررسی کرد که آیا قطعات کوادروتور موجود به جرم جدید جوابگو هستند یا نه.

جدول10 : جرم سازه داده شده با استفاده از نرم افزار ANSYS

Properties	
Volume	2.0212e-004 m³
Mass	0.34361 kg
Scale Factor Value	1.

در نتیجه، فرض می شود وزن فریم 350 گرم باشد. همچنین وزن همه قطعات سواره شده بر کوادکوپتر تقریبا 800 گرم می باشد. پس کل جرم 1150 گرم خواهد بود. با بالا بردن ضریب اطمینان کل جرم 1200 گرم در نظر گرفته شد. با تقسیم این جرم بر 4 تراست مطلوب از هر موتور به دست می آید:

$$\boldsymbol{Thrust = \frac{1200}{4} = 300\ g} \qquad (2)$$

موتورها برای کوادهای با جرم بین 1200 و 1500 گرم بهترین پرفورمنس را دارند. در واقع بهترین راه حل این شد که سازه فیبر کربن باشد، ولی در ابتدا سعی خواهد شد که مشکل ارتعاشات با فریم پلاستیکی-فایبر گلاسی حل شود، که اگر جواب نداد فریم فیبرکربن استفاده خواهد شد.

جدول 11: مشخصات موتورها- به تراست توجه شود

Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	RPM	Efficiency (g/W)
11.1		50%	2	22.2	240	4400	10.81
		65%	3.8	42.18	386	5900	9.15
		75%	5.5	61.05	490	6900	8.03
		85%	7.2	79.92	594	7800	7.43
		100%	9.8	108.78	722	8300	6.64

D. بررسی تنش وکرنش فریم کوادروتور

بر کوادروتور دو نیرو علاوه بر نیروی جاذبه وارد می شود: تراتست پره ها و تورک موتورها. برای بررسی تنش وکرنش سازه بهتر است بدترین حالت (ماکسیمم تورک ونیرو) در نظر گرفته شود.

با استفاده از جدول 11، ماکسیمم نیروی تراست 722 گرم است که برابر با 7.083 نیوتن است. از طرفی، محاسبه تورک یک موتور براشلس خیلی راحت نیست ورابطه آن ضرایب تصحیح دارد

که باید به صورت تجربی تعیین شوند. البته این تورک متغیر می باشد، وبه ملخ ها (مصرف) بستگی دارد. با استفاده از جدول اطلاعات داده شده از طرف سازنده موتور و ملخ (جدول 11)، می توان تورک ها را به صورت واقعی حساب کرد.

$$\boldsymbol{T[N.m] = \frac{P[W]}{\omega\left[\frac{Rad}{s}\right]}} \qquad (3)$$

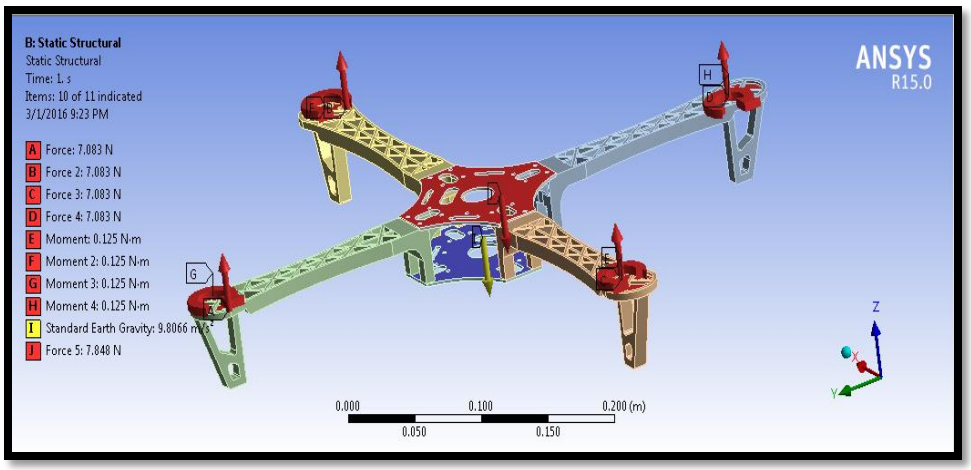
جدول 12: تورک وارد شده بر سازه توسط موتورها

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	RPM	Efficiency (g/W)	Torque (N.m)
	11.1		50%	2	22.2	240	4400	10.81	0.0482
			65%	3.8	42.18	386	5900	9.15	0.06827
			75%	5.5	61.05	490	6900	8.03	0.085
			85%	7.2	79.92	594	7800	7.43	0.098
			100%	9.8	108.78	722	8300	6.64	0.125

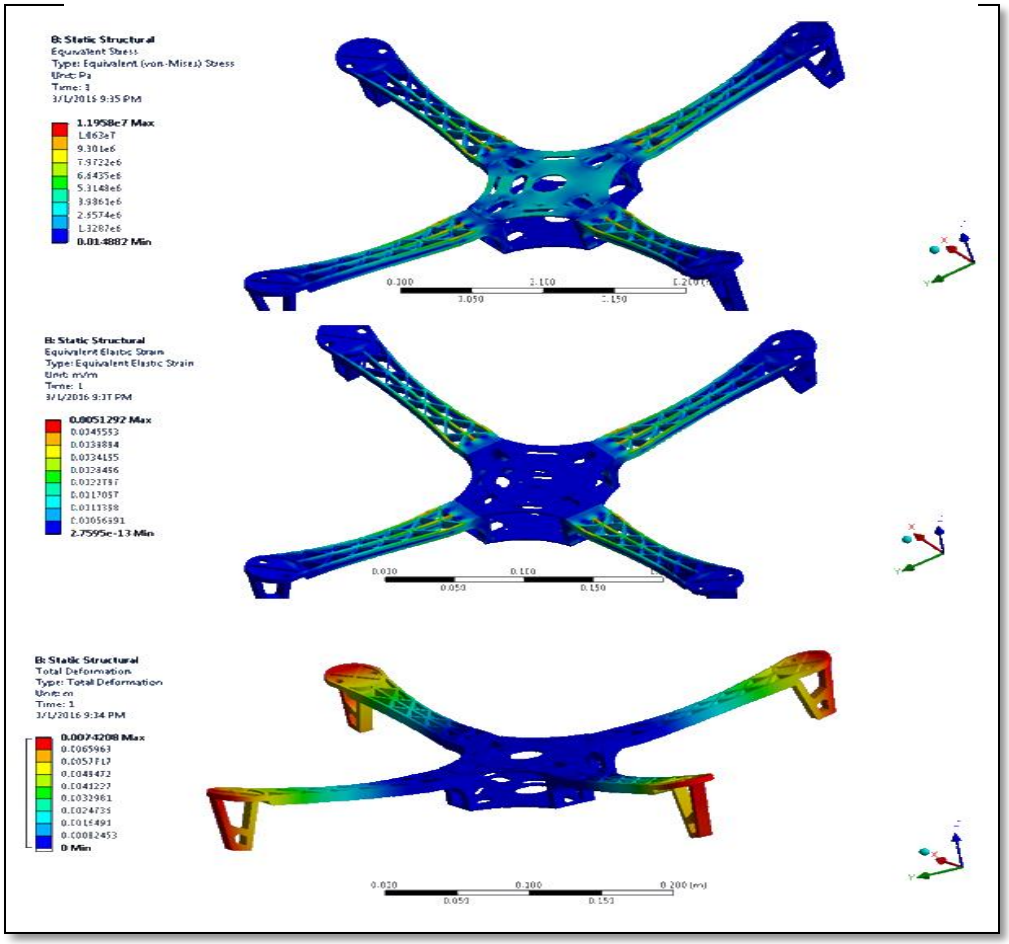
توجه شود که باید مقدار تورک ماکسیمم (0.125) در نظر گرفته شود. همچنین هر دو موتور متقابل جهت تورک یکسانی دارند که با جهت تورک بقیه موتورها برعکس می باشد. همچنین باید نیرو رانش ونیروی وارده از وزن قطعات سوار شده روی فریم کواد در محاسبات ومدلسازی وارد شوند.

جرم قطعات سوارد شده بر کوادکوپتر اندازه گیری شد، با کمی احتیاط، 800 گرم می باشد. بدترین حالت هم از لحاظ استاتیکی وقتی اتفاق می افتد که فریم پایینی ثابت نگه داشته شود؛ این حالت درست همان وضعیت کوادکوپتر در حین انجام تست که در آنجا اجازه داده نمی شود پرواز کند.

حالا می توان نیروها و گشتاورها را بر سازه با استفاده از نرم افزار *ANSYS* اعمال کرد.



شکل 22: تحلیل تنش و کرنش فریم کوادروتور



شکل 23: نمودار آزاد یا نمودار نیرو فریم کواد

جدول 13 : اطلاعات آنالیز تنش وکرنش سازه

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress	Equivalent Elastic Strain
State	Solved		
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	All Bodies		
Definition			
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress	Equivalent Elastic Strain
By	Time		
Display Time	Last		
Calculate Time History	Yes		
Identifier			
Suppressed	No		
Results			
Minimum	0. m	1.4882e-002 Pa	2.7595e-013 m/m
Maximum	7.4208e-003 m	1.1958e+007 Pa	5.1292e-003 m/m
Minimum Occurs On	UpperFrame-2		
Maximum Occurs On	QuadArm-4		
Minimum Value Over Time			
Minimum	0. m	1.4882e-002 Pa	2.7595e-013 m/m
Maximum	0. m	1.4882e-002 Pa	2.7595e-013 m/m
Maximum Value Over Time			
Minimum	7.4208e-003 m	1.1958e+007 Pa	5.1292e-003 m/m
Maximum	7.4208e-003 m	1.1958e+007 Pa	5.1292e-003 m/m
Information			
Time	1. s		
Load Step	1		
Substep	1		
Iteration Number	1		
Integration Point Results			
Display Option		Averaged	
Average Across Bodies		No	

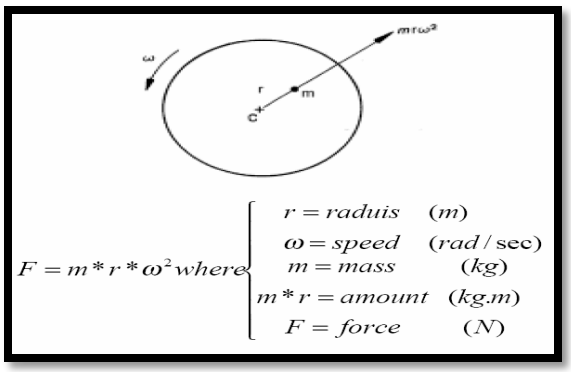
از جدول 13 نتیجه می شود که سازه دچار مشکل نمی شود زیرا تنش مجاز پلاستیک *ABS* تقریبا 40 مگاپاسکال است، ودر این آنالیز ملاحظه شد که ماکسیمم تنش وارد شده به سازه تقریبا 12 مگاپاسکال است.

4-2 . بالانسینگ پره ها

بالانس کردن ملخهای کوادکوپتر یک ضرورت است. همیشه هر ملخی را قبل از بستن بر روی کوادکوپتر باید بدرستی بالانس نمود. حتی بهترین و گرانترین ملخهای ساخت بهترین سازندگان نیز ممکن است بخوبی بالانس نباشند، وباید قبل از استفاده از آنها بالانس شوند. این کار به این منظور انجام می شود که تا حد ممکن بتوان لرزشهای ناخواسته را از موتور، که به کواد منتقل می شوند، حذف کرد.

برای درک اهمیت این موضوع می توان توربینهای باد را مثال زد: آنها با اینکه بهترین بازده را در تعداد ملخهای کمتری دارند، ولی ترجیح داده می شود که با 3 ملخ ساخته شوند چرا؟ تا اینکه ممان اینرسی در کل زاویای چرخش یکسان باشد. یعنی، مثلا در حالت دو ملخ، ممان اینرسی همیشه بین مقدار مینیمم ومقدار ماکسیمم خود بازی می کند (مقدار ماکسیمم وقتی دو ملخ افقی می شوند ومقاومت زیادی وجود دارد، مقدار مینیمم وقتی دو ملخ عمودی می شوند ومقاومت بر آنها ناچیز است). این باعث می شود که لرزشهای بزرگ وصدای وحشتناک به خصوص در سرعتهای بالا ایجاد شود. همچنین این پدیده یاتاقانها وسازه را به سرعت خراب می کند.

حالا در حالت کوادروتور، اگر تصور شود که یک ملخ از پروپلر دو ملخی سنگینتر باشد، ممان اینرسی آن زیاد خواهد بود، و وقتی سرعت اعمال می شود، ممانتوم این ملخ از ملخ دومی بزرگتر خواهد بود. همچنین نیروی گریز از مرکز بزرگتری خواهد داشت. در نتیجه، پروپلر در هر یک دفعه دوران بر موتور یک ممانتوم نوسانی اعمال می کند وباعث ایجاد لرزش شدید می شود.



شکل 24: نامیزانی دوار

همان طور که از شکل 24 پیداست، وقتی یکی از ملخ ها جرمی بیشتر از ملخ دوم داشته باشد، سازه همیشه بین دو نیروی متفاوت قرار می گیرد، که این نیروها به تناوب نوسان می کنند.

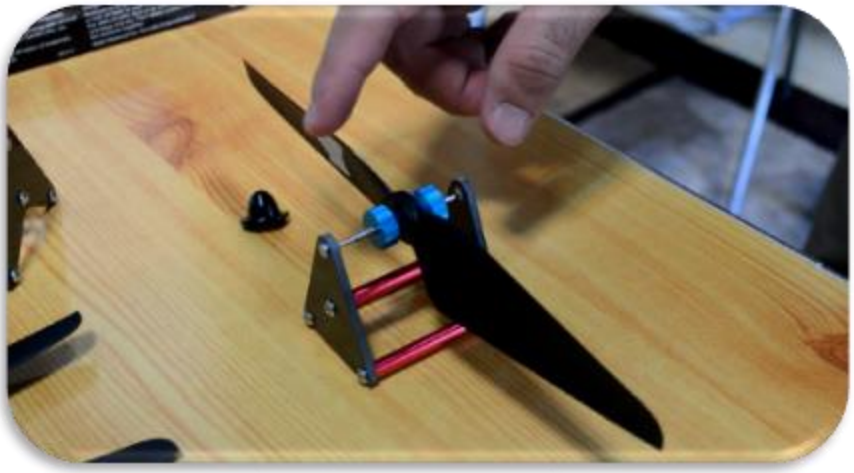
ملخها باید هم از لحاظ استاتیکی و هم از لحاظ دینامیکی بالانس شوند. البته بالانس دینامیکی ملخها خیلی پیچیدتر است ونیاز به دستگاهای پیشرفته تر دارد.

روشهای مختلفی برای بالانس استاتیکی ملخها وجود دارد. بهترین و دقیقترین روش، استفاده از یک بالانسر تجاری است که با دقت بالائی این کار را انجام میدهد. اما با روشهای ساده تر و بدون هزینه هم شاید بتوان این کار را با دقت کمتری انجام داد.

در ابتدای پروژه سعی شد با استفاده از روش های ساده و بدون هزینه بالانس استاتیکی انجام بگیرد، اما متاسفانه نتیجهٔ خوبی به دست نیامد. به خاطر همین از بالانسر تجاری حرفه ای مدل *ATG* استفاده کرده شد که محصول کشور چین است و نتایج قابل قبولی بدست می دهد

در ابتدا ملخ ها در پیچ مخروطی شکل (برای اینکه هر ملخی با هر قطری که داشته باشد جا بشود) ثابت نگه داشته می شود وبا اضافه کردن چسب به طرف سبکتر به تعادل استاتیکی ملخ صورت می گیرد. به عبارتی، ممانها یا گشتاورهای هر دو ملخ حول مرکز صفر می شوند.

شکل 25: بـالانـسر ATG است



شکل 26: اضافه کردن چسب برای بالانس کردن پره- گره در حالت تعادل استاتیکی قرار دارد

البته قبل از بالانسینگ پره ها، می بایستی از صاف و تراز بودن سطح مرجع اطمینان حاصل شود؛ برای این کار، از یک بالانسر حرفه ای دیگر استفاده شد که یک تراز سطح دارد. با استفاده از آن، سطح مرجع تراز صاف می شود.

شکل 27: تراز سطح تعبیه شده در یک بالانسر

برای بالانس دینامیکی، یک ایده مطرح هست که با استفاده از یک لیزر و آیینه چسبیده به بدن کواد، ودر حین فعال شدن آن، با اضافه کردن تقویت کننده به فریم کواد ارتعاشات نور لیزر را با سعی و خطا کاهش داده می شود؛ به عبارتی، هرچه قدر نوسانات لیزر کمتر شود، بالانس دینامیکی ملخ ها بهتر می شود. این بالانس با اضافه چسب یا رنگ به ملخ ها قابل انجام است.

2-5 . دمپر و ایزوله کردن ارتعاشات – فلایت کنترل

اغلب برای اتصال فلایت کنترلر به بدنه از چسب دو طرفه یا Velcro استفاده می شود، اما در اغلب موارد این دو جوابگوی ارتعاشات وارد برسیستم نیستند چرا که جرم برد خیلی کم است. یکی از راه حل ها است قرار دادن یک ژل با ضحامت 1 -2 سم در چهار گوشه برد فلایت کنترلی (این ژل می تواند چسب دو طرفه، سیلیکون ژل یا پد، ویا **Moon Gel** (در درام استفاده می شوند) باشد. البته این مورد آخر ممکن است در دمای بالای 100 ذوب شود.

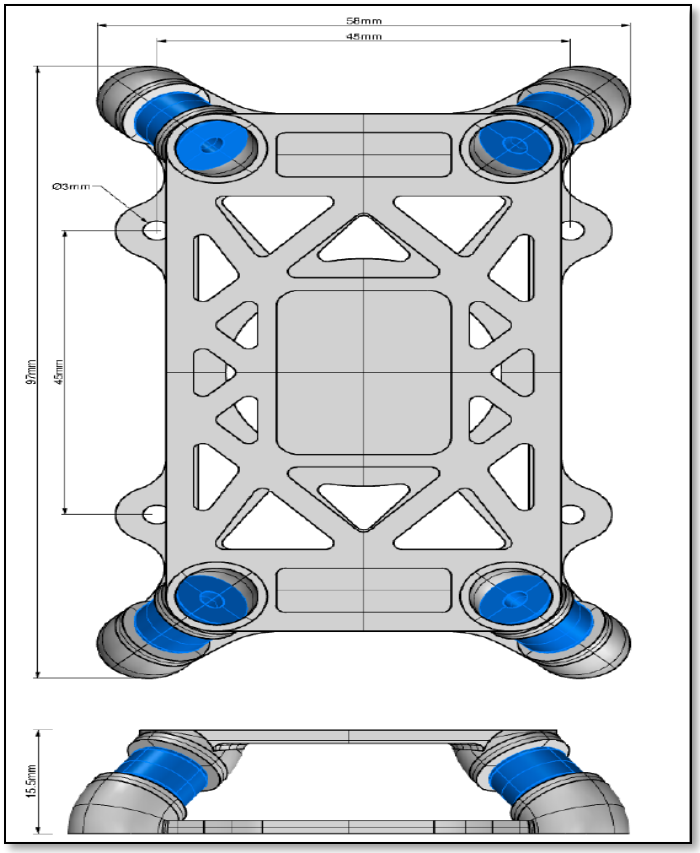
در اینجا دو مبحث مهم وجود دارد:

- دمپر کردن ارتعاشات (Vibration Damping): به این معنی است که انرژی وارد بر سیستم کاهش یابد، و انرژی جنبشی (ارتعاشاتی) تبدیل به انرژی دمایی بشود تا فرکانس ارتعاشات از فرکانس تحریک سیستم مورد نظر (فلایت کنترلر) دور باشد.
- ایزوله کردن ارتعاشات (Vibration Isolation): قرار دادن موادی برای جلوگیری از انتقال ارتعاشات به سیستم مورد نظر است. بعضی اتصالات ارتعاشات را به خوبی منتقل می کنند، اما بعضی دیگر این ارتعاشات را جذب و دمپ می کند. یعنیحرکت سیستم مستقل از جسم اصی می شود. Foam ها ایزوله کننده های خوبی هستند ولی طول عمر کمی دارند.

در واقع گاهی این دو ترم به جای یک دیگر استفاده می شوند.

مقدار و نوع واسط دمپر باید با جرم، فرکانس و دامنه ارتعاشات جسمی که قرار است ایزوله شود هماهنگ باشد. باید تناسبی بین وزن جسمی که قرار است ایزوله شود با مقدار و نوع دمپرکننده وجود داشته باشد. معمولا بردهای کنترلی کمتر از 2 انس (57 گرم) هستند که جرم بسیار ناچیزی است.

در این پروژه، از 4 تا پد استفاده شده که فلایت کنترلر روی صفحه بالایی آنها نصب شده، وصفحه پایینی آنها توسط پیچ به صفحه مرکزی کواد تثبیت می شود. این سیستم ارتعاشات را هم دمپ (زیرا پدها از نوع ژلی شبیه پد ایرفون هستند و با استفاده از مفهوم هسترزیس قسمتی از ارتعاشات را جذب وبه انرژی حرارتی تبدیل می کنند) وایزوله می کند.

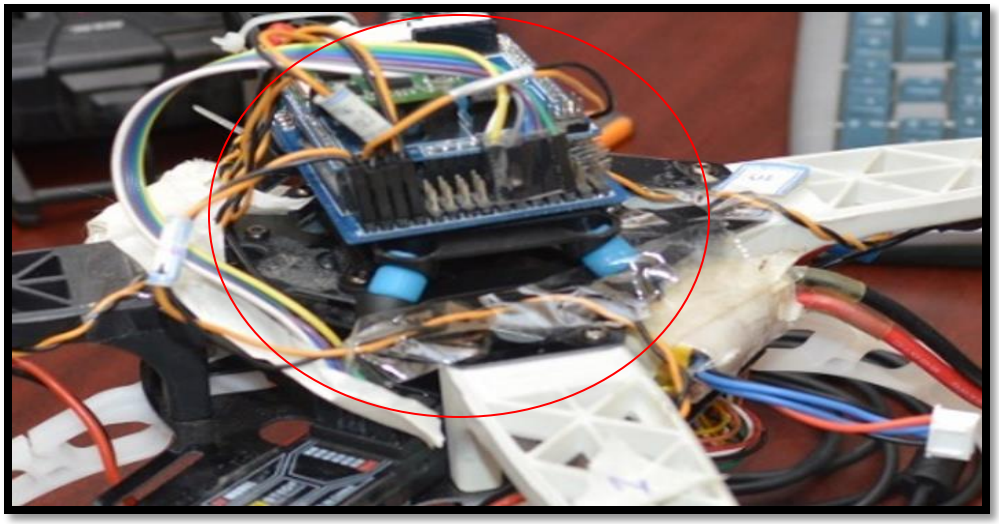


شکل 28: سیستم دمپینگ ارتعاشات استفاده شده در پروژه

این نوع دمپر توسط پرینتر 3-بعدی ساخته می شود.

شکل 29: دمپر استفاده شده

حالا برای اتصال فلایت کنترلر به دمپر، از چسپ دوطرفه استفاده شده، که این به نوبت خود ضریب دمپینگ را افزایش می دهد.



شکل 30: نصب دمپر، چسپ دوطرفه وفلایت کنترلر رو کوادروتور

6-2 . دمپر و ایزوله کردن ارتعاشات – موتورها

به منظور کاهش ارتعاشات وارده به فریم از طرف موتورها، از ایدهٔ عازل وجاذب پلی اورتان که دکتر سالاریه پیشنهاد دادند که یک ایده جدیدی هست و در اینترنت اطلاعاتی از این ایده بسیار کم است، استفاده شد.

پلی اورتان (Polyurethane) یک ماده است که در ایزوله کردن خانه ها به کار می رود. یعنی دیوارها را با این ماده پر می کنند و انرژی حرارتی هدر رفته را کم می کنند. همچنین این ماده را روی بام خانه ها اسپری می کنند تا از نفوذ تابش خورشید وآب به سطح بام جلوگیری شود. البته بالای این ماده باید توسط ماده حفاظتی پوشیده شود.

پلی اورتان توسط دو ماده تشکیل می شود: پلی ال (Polyol) و ایزوسیانات (Isocyanate). بسته به درصد ترکیبی این دو ماده، خواص مکانیکی پلی اورتان تعیین می شود. واکنش این دو ماده اگزوترمیک (گرمازا) است.

در این پروژه، خواص مطلوب برای پروژه با سعی وخطا و با مخلوط کردن حدودا 20 نمونه با درصدهای مختلف به دست آمد. هرچه قدر نسبت ایزوسیانات بیشتر شود، پلی اورتان سفت تر می شود، وبرعکس. در این پروژه، پلی اورتان باید نه خیلی سفت باشد، نه خیلی نرم (مثل خمیره).

این دو ماده در دمای محیط (25 درجه سانتی گراد) با هم مخلوط می شوند، بعداز 35 ± 3 ثانیه حالت خامه، وبعداز 90 ± 5 ثانیه حالت ژل به خود می گیرد. دانسیتهٔ این ماده حدودا 0.135 $g.cm^{-3}$ در می آید.

مخلوطی که در پروژه استفاده شد از 40٪ ایزوسیانات و 60٪ پلی ال دارد، ومحصول به دست آمده حالت دمپینگ با هسترزیس خوب دارد.

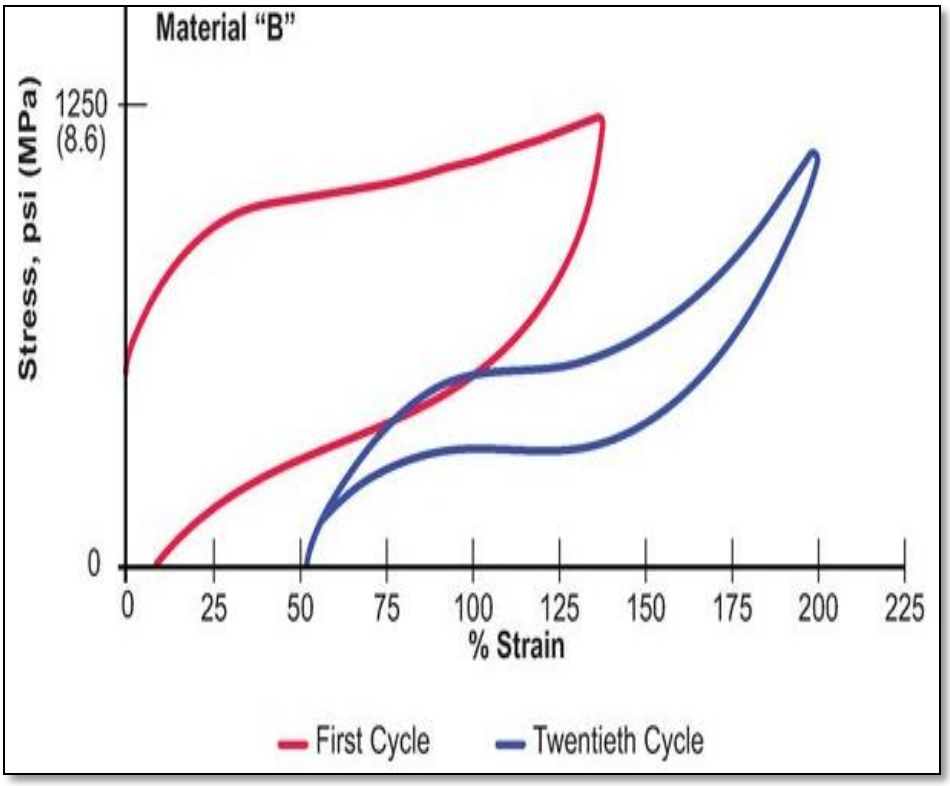
البته ذکر این نکته مهم است، که موتورها نباید بیش از حد به بدنه سفت شد، وپیچ آنها را تا آخر بست، تا حالت دمپینگ وایزوله حاصل شود.

شکل 31: پلی ال، ایزوسیانات و اسپری آماده پلی اورتان

شکل 32: پیشرفت واکنش مواد تشکیل دهنده پلی اورتان

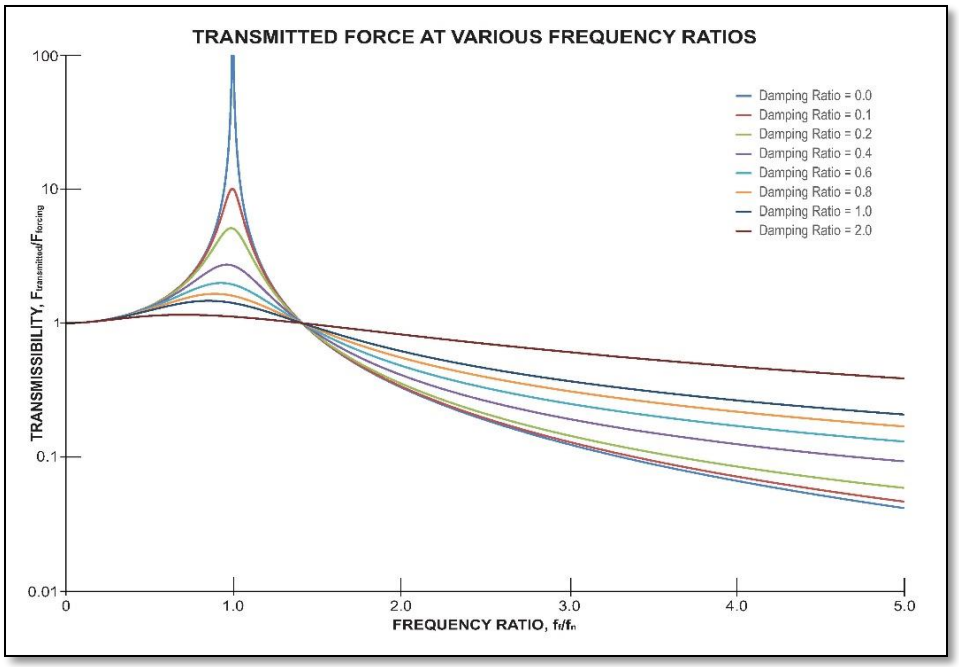
بعداز اینکه پلی اورتان آماده شد، باید آن با ضخامتی مناسب بین موتور وبازو نصب شود. پلی اورتان با قابلیت تحمل بار در وجود خواص دینامیکی خوب یک ایزوله کننده مناسب بین موتور وبدنه محسوب می شود. برای بررسی کارآیی ان باید نسبت فرکانس ارتعاشات (Forcing frequency or driving frequency) به فرکانس طبیعی معلوم باشد. فرکانس ارتعاشات تقریبا 138 هرتز (فرکانس موتور براشلس در حالت 100٪ Throttle) است.

از طرفی، پلی اورتان حالت ویسکوزیته (هیسترزیس) یا دمپینگ دارد که انرژی مکانیکی را به انرژی حرارتی تبدیل می کند، وارتعاشات را می میراند. اینجا باید یک نسبت میرایی در نظر گرفته شود، واین نسبت به دما وپیش بارگذاری (برای همین موتورها نباید خیلی سفت بسته شوند) دارد. معمولا نسبت میرایی برای پلی اورتان بین 0.05 (پلی اورتان سخت) و 0.15 (پلی اورتان نرم) می باشد.



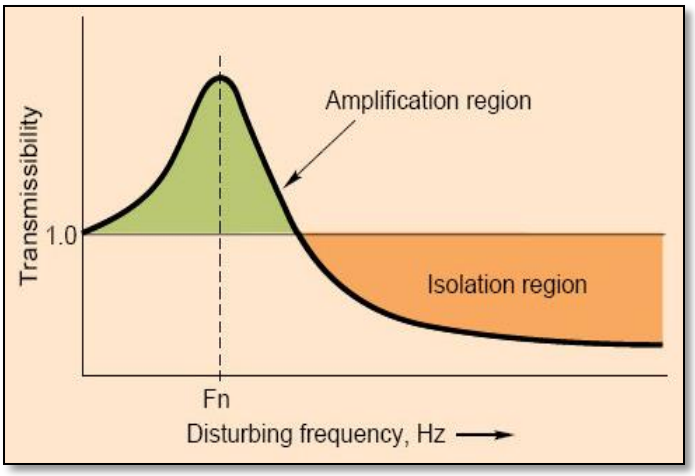
شکل 33: هیسترزیس در ماده پلی اورتان

وقتی پلی اورتان زیر بار قرار می گیرد، منحنی تغییر شکل آن رسم می شود. در برگشت، ملاحظه می شود که منحنی همان منحنی اولی نیست. مساحت زیر منحنی رفت انرژی ورودی است، وانرژی زیر منحنی برگشت انرژی حفظ شده، وانرژی بین این دو منحنی همان انرژی حرارتی که توسط هیسترزیس به هدر رفته است.



شکل 34: منحنی انتقال پذیری ارتعاشات برای الاستومرها (برای همه الاستومرها صادق است)

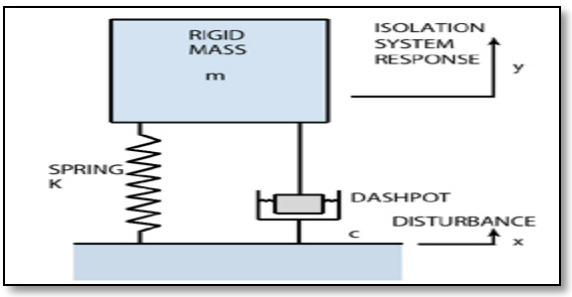
اگر فرض شود که نسبت میرایی 0.1 باشد، و اینکه 75٪ ارتعاشات دمپ شود، نسبت فرکانسها باید حداقل 2.5 باشد (توجه شود که نسبت انتقال پذیری ارتعاشات در شکل 34 بین 0 و1 قرار می گیرد، و در نسبت فرکانس یک چون خروجی تشدید می شود، انتقالپذیری ارتعاشات از 100٪ بالاتر می رود). بنابراین، برای 75٪ (در شکل بالا 0.25) دمپینگ، نسبت فرکانسها 2.5 فرض می شود



شکل 35: دمپینگ انتقال پذیری ارتعاشات از یک به پایین شروع می شود

$$Frequency\ ratio = 2.5 = \frac{f}{f_n} = \frac{138}{f_n} \xrightarrow{yields} f_n = 55.2\ Hz \quad (4)$$

پلی اورتان را می توان به سیستم جرم، فنر ودمپر شبیه سازی کرد.



شکل 36: شبیه سازی ایزوله کننده

با توجه به شکل 35، فرض می شود که جرم سختی بی نهایت داشته و فنر ودمپر جرم ندارند. با حل معادله دینامیکی سیستم فرکانس طبیعی آن به دست می آید. باید توجه شود که دمپر هیچ اثری بر روی فرکانس طبیعی ندارد، همچنین فرض می شود که رفتار نوسانی باشد ($X=Xe^{-it}$).

$$\boldsymbol{mx + k\ddot{x} = 0 \xrightarrow{yields} -\omega^2 mx = -kx \xrightarrow{yields} \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}} \quad (5)$$

از طرفی:

$$\begin{cases} \boldsymbol{m = \frac{W}{g}} \\ \boldsymbol{deflection = \frac{W}{K} \xrightarrow{yields} f_n = 3.13\sqrt{\frac{K}{W}} = 3.13\sqrt{\frac{1}{\underbrace{static\ deflection}_{inch}}}} \\ \boldsymbol{2\pi f_n = \omega} \\ \boldsymbol{g} = 386\ in/sec\ 2 \end{cases} \quad (6)$$

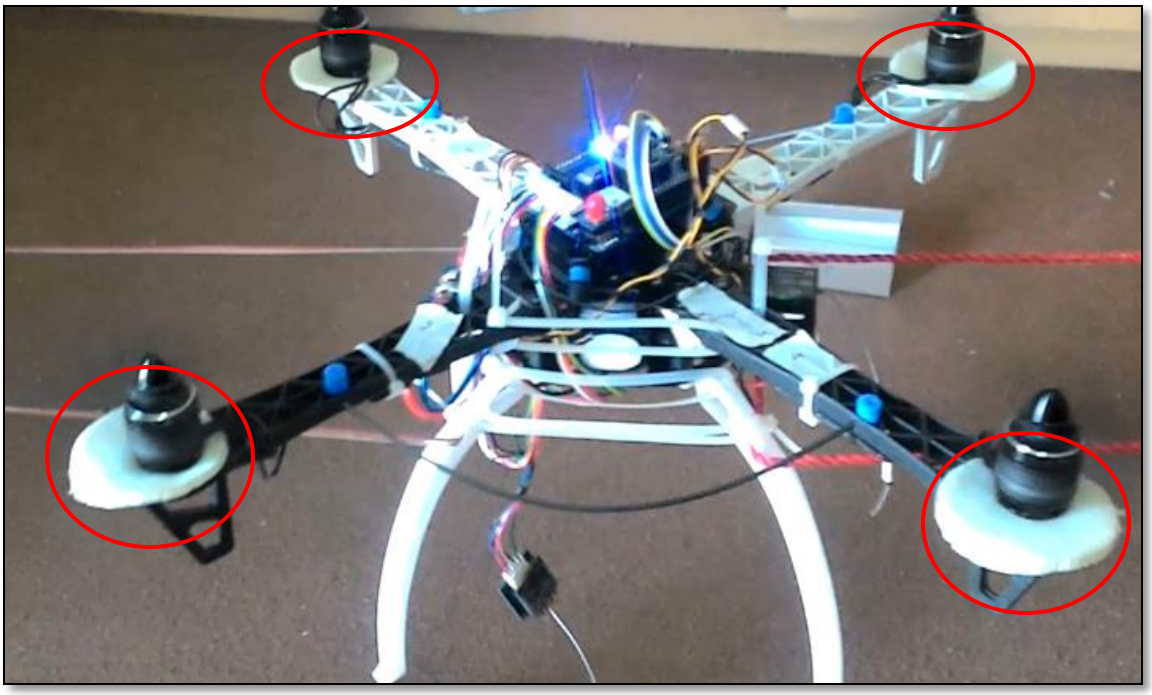
در نتیجه،

$$\boldsymbol{55.2 = 3.13\sqrt{\frac{1}{Static\ Deflection}} \xrightarrow{yields} Static\ Deflection = 0.0032\ in = 0.0817\ mm} \quad (7)$$

از طرفی، با درنظر گرفتن این که همیشه پلی اورتان زیر بار معینی قرار می گیرد، به علاوه ازدیاد دما در حین ارتعاشات به خاطر هیسرزیس، شرکت Gallagher توصیه می کند که تغییر شکل

استاتیکی (Static Deflection) 9٪ برابر ضخامت پلی اورتان باشد. به عبارتی، ضخامت پلی اورتان مورد نظر باید 0.91 ملم باشد. برای راحتی کار این ضخامت 1 ملم در نظر گرفته می شود.

نکتهٔ مهم این است که سختی این روش در تعیین ضریب دمپینگ پلی اورتان است، که باید در ضخامت 1 ملم، 0.1 ملم تغییر شکل دهد.



شکل 37: پلی اورتان نصب شده در زیر موتورها

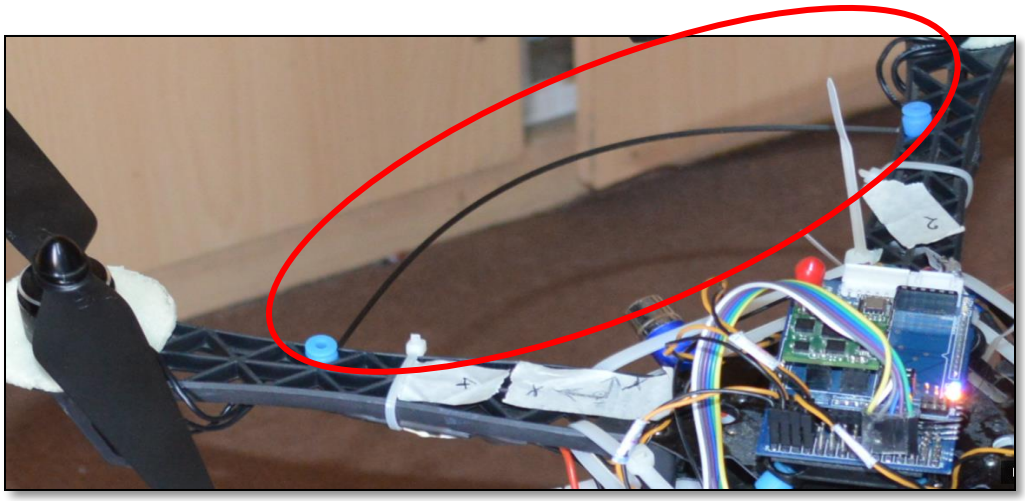
7-2 . سخت کردن فریم کوادروتور

بدنه کواد باید در حد امکان هرچه بیشتر سخت (rigid) باشد تا از انتقال لرزش به محل نصب برد جلوگیری کند. اگر بتوان مدول الاستیسیتهٔ فریم را بالا برد، فرکانس طبیعی سازه بیشتر شده، وانتقال فرکانس ارتعاشاتی سخت تر شده واثر آن کاهش می یابد.

راه هایی زیادی برای سفت تر کردن بدنه وجود دارد:

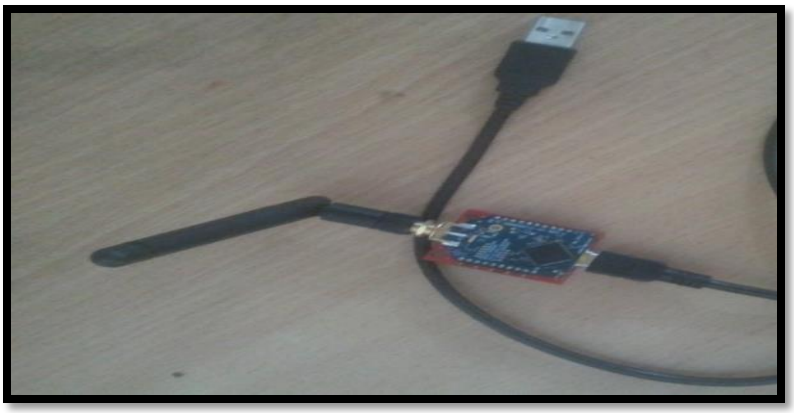
- بستن نخ و متصل کردن بازوها
- استفاده از بدنه کربنی (انعطاف پذیری بازوها می تواند خیلی بر افزایش ارتعاشات تاثیر داشته باشد)
- بهره گیری از یک سیم مفتولی.

در این پروژه، از این ایده استفاده شد که همزمان سختی فریم وضریب دمپینگ آن افزایش یابد. این هدف توسط استفاده از سیم های فیبر کربنی ومتصل کردن انتهای آنها یا ویط آنها به ماده ای که ارتعاشات را دمپ می کند (مثل پد، توپ اسفنجی وغیره) متحقق می شود.



شکل 38: استفاده از سیم فیبر کربن ودو پد برای افزایش دمپینگ وسختی فریم

کنترل کوادروتور توسط یک نرم افزاری که بر اساس نرم افزار Mission Planner نوشته شد، صورت می گیرد. برای اینکه ارتباط بین فرستانده رادیویی (RC) و کواد از یک طرف، واین نرم افزار از طرف دیگر برقرار شود، بایستی یک گیرنده رادیویی هم به لاپتوپ وصل شود، تا اطلاعات به طور مستقیم وسریع ارسال گردد.

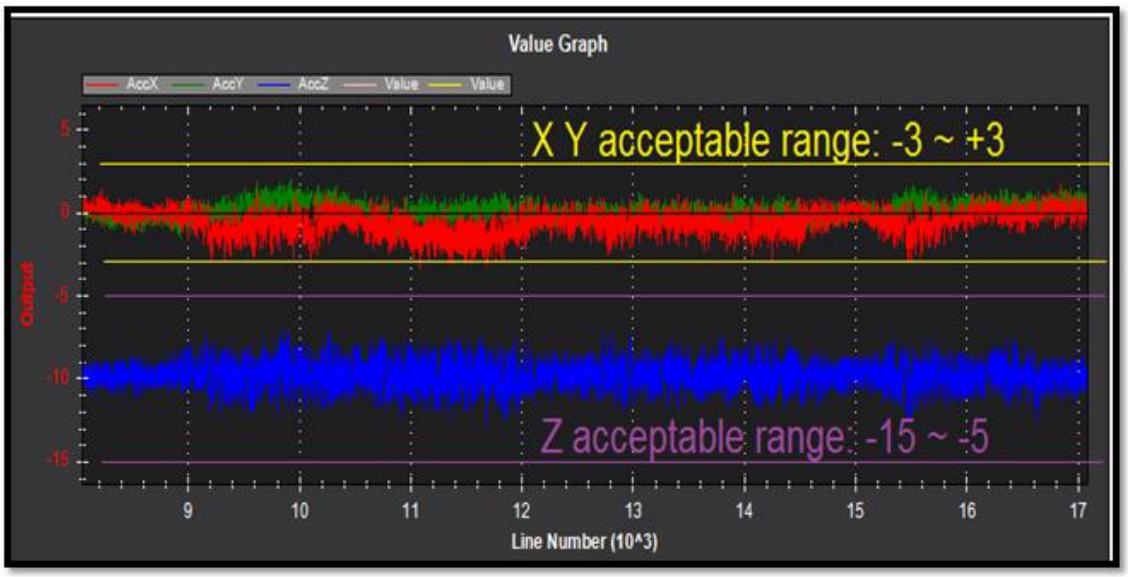


شکل 39: گیرنده رادیویی که به لاپتوپ متصل می شود

شکل 40: نرم افزار کنترل وهدایت کواد

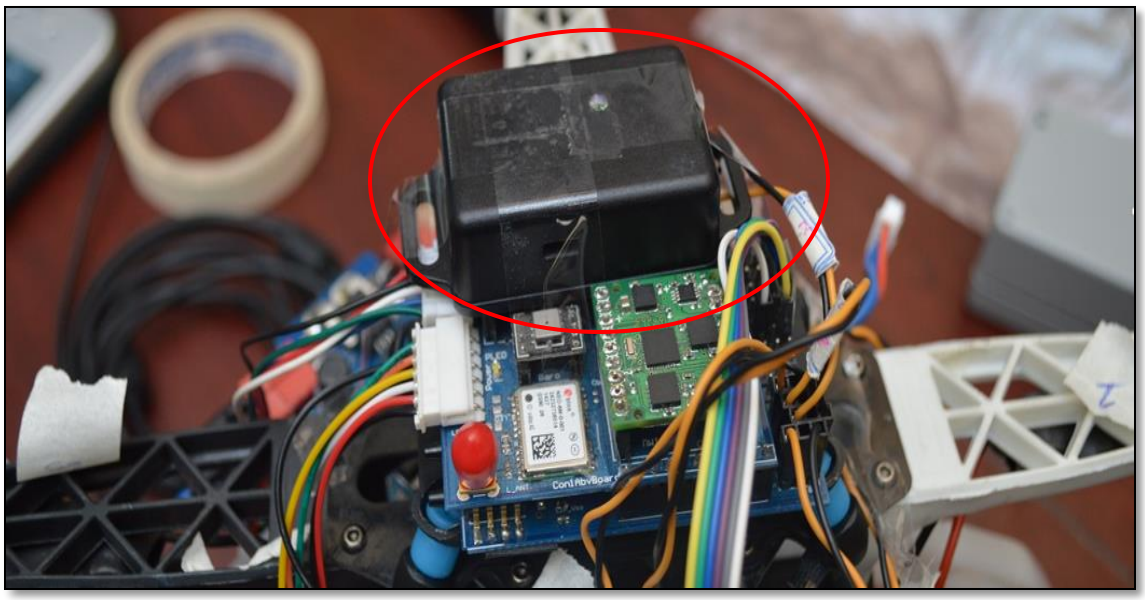
3. نتایج و بحث

حالت قبل از بهبود، همان طور که جدول 1 نشان می دهد، از لحاظ ارتعاشات خیلی بد بود. هدف این است که ارتعاشات به کمتر از حد مجاز کاهش یابد. برای ثبت ارتعاشات می توان از دستگاه داده برداری جداگانه استفاده کرد، ویا اینکه اطلاعات شتاب ها از سنسور شتاب سنج بورد ناوبری IMU در 3 محور (X, Y, Z) را خواند. در این پروژه از استاندارد اتوپیلوت برای تعیین حد مجاز ارتعاشات استفاده شد.

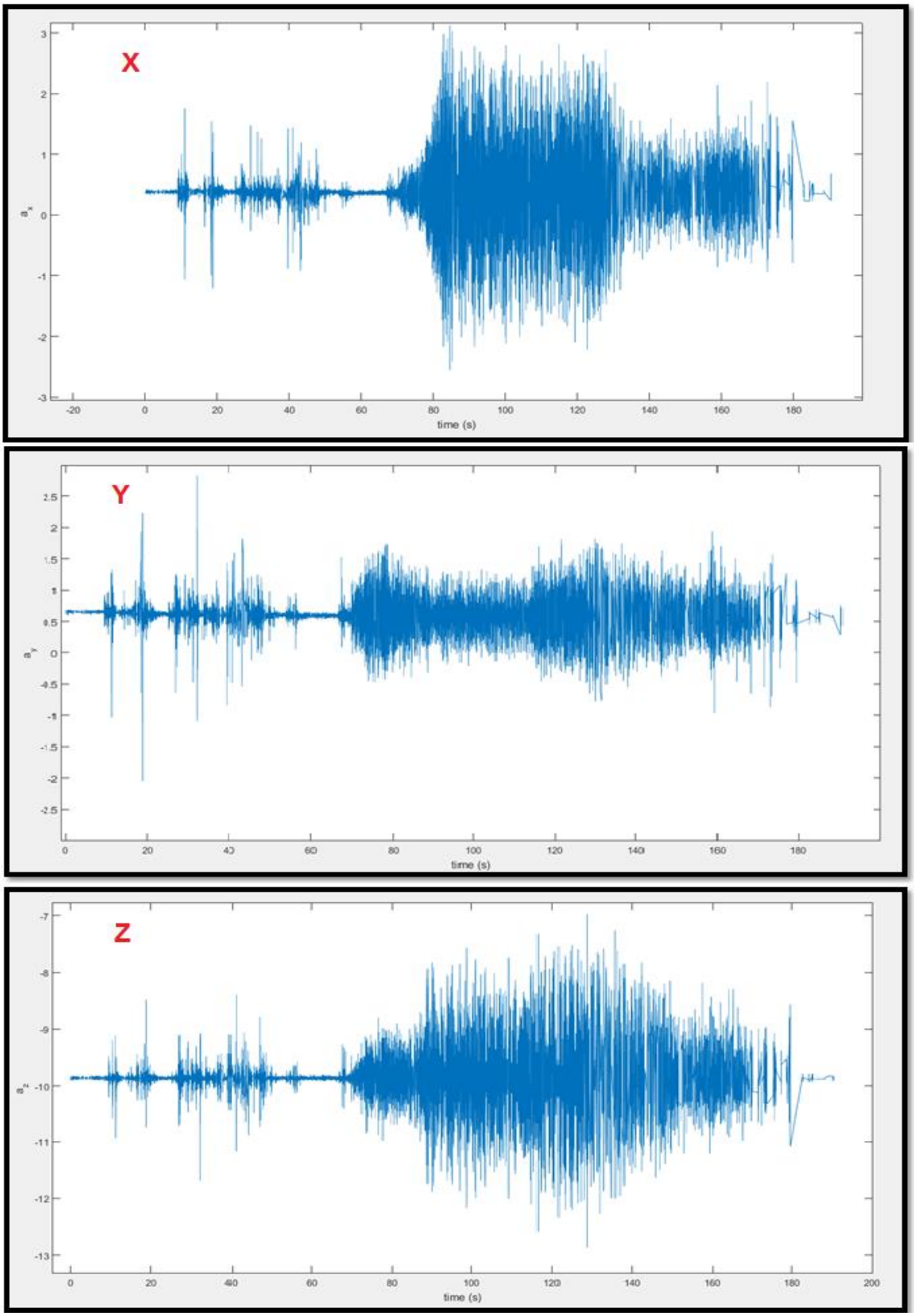


شکل 41: حد مجاز ارتعاشات در هر جهت بر حسب متر بر مجذور ثانیه

بعداز اینکه ملخ ها بالانس شده وبورد ایزوله کننده زیر فلایت کنترل با چسپ دوطرفه نصب شده، کواد تست ونتایج آن توسط یک دستگاه داده برداری شتاب سنج ثبت شد. این اطلاعات در یک فایلی از نوع متن (Text.txt) ذخیره می شود و با استفاده از یک تابع در نرم افزار MATLAB رسم می شوند. این تابع در پیوست پروژه، نوشته می شود.



شکل 42: دستگاه داده برداری شتاب سنج نصب شده بر فلایت کنترل در ین تست

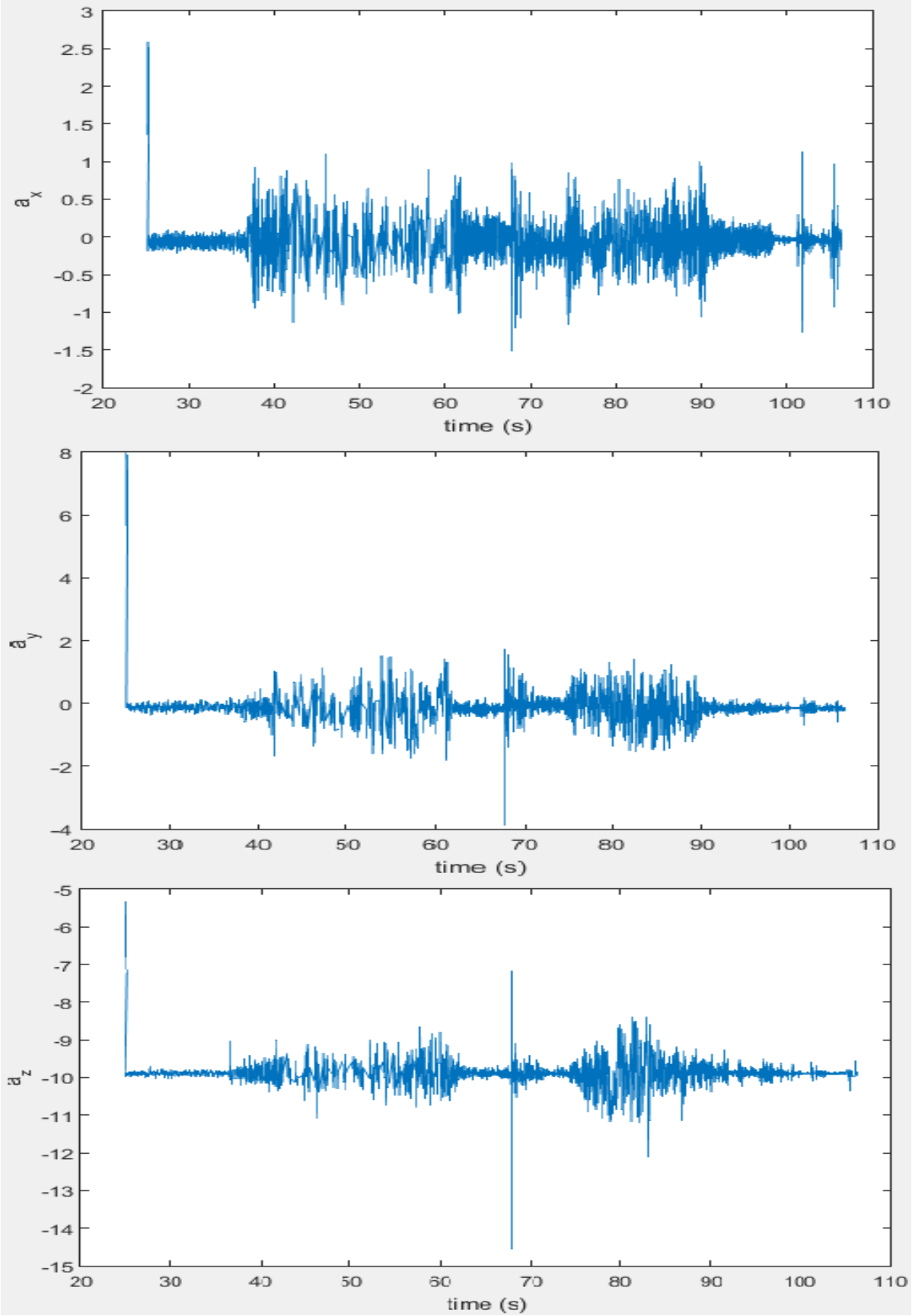


شکل 43: نتایج تست اول به دست آمده

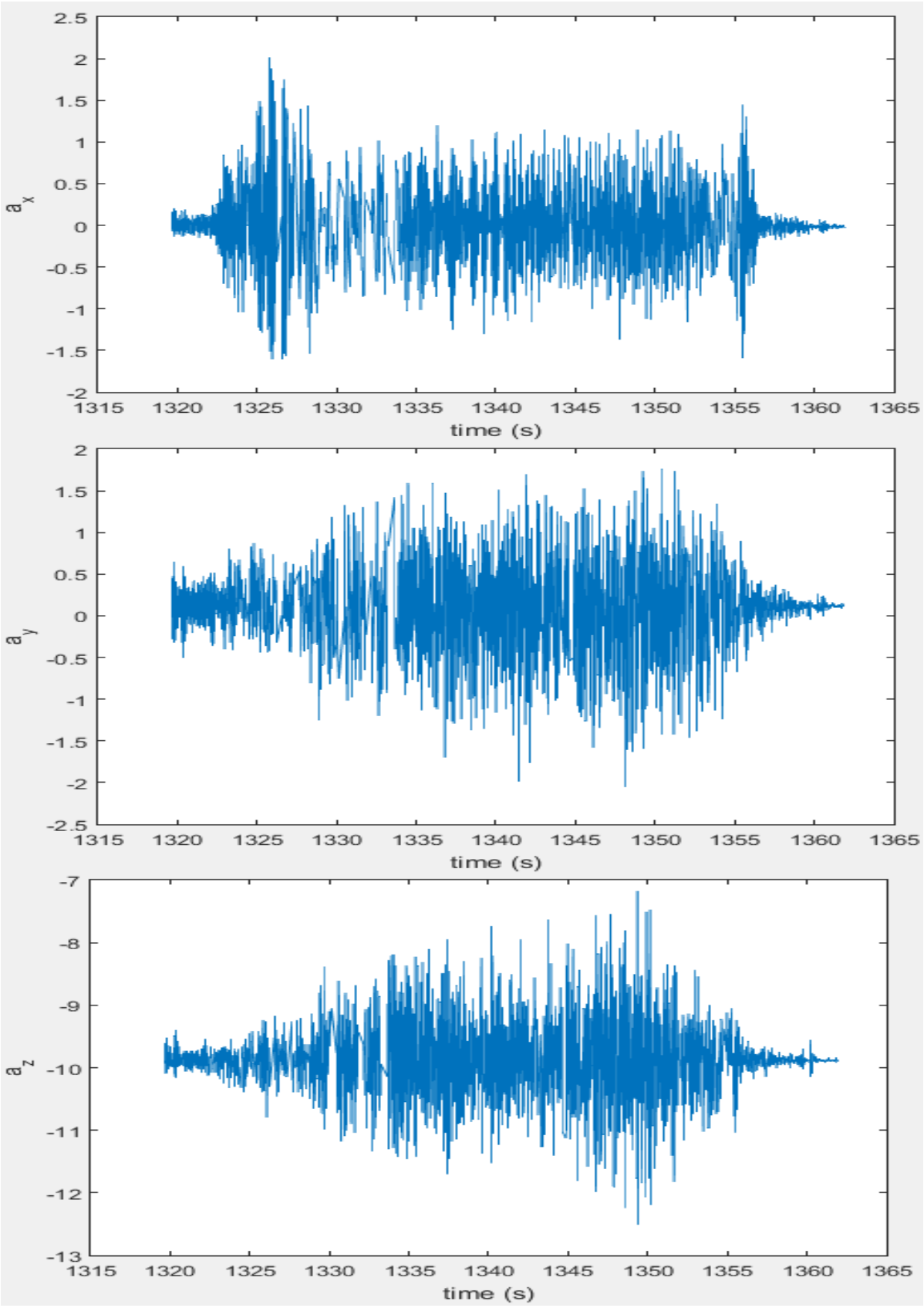
پس نتیجه می شود که کوادروتور در وضعیتی قابل قبول قرار گرفته وتغییرات اندازه گیری شده (اگرچه از چسب وغیره برای تثبیت دستگاه اندازه گیری استفاده شده که باعث ایجاد خطا وبدتر شدن نتایج می شود) در بازه ی مطلوب قرار دارند. اما این تست یک عیب داشت وآن این است که کوادروتور از پایین نگهداشته شد؛ این مساله می تواند فرکانس ارتعاشات را تغییر دهد. به خاطر همین یک استاند برای تست کوادروتور ساخته شده است.

شکل 44: استاند تست کوادروتور

بعداز این که پلی اورتان اضافه شد، و سختی سازه کوادروتور توسط سیمهای فیبر کربن زیاد شده، نتایج جدید ثبت شد. این دفعه هم کوادروتور بر روی یک میز توسط سیم نگهداشته شد. اما دفعهٔ بعد تر روی میز تست انجام می شود، وهمه نتایج نشان می دهند که ارتعاشات در بازه قابل قبولی بلکه حتی خوب قرار دارند. با این حال، از شرکت رهنوردان هلیای آسمان (رها) که یک شرکت بنیان مربوط به دانشگاه صنعتی شریف و کار آن همین مالتی کوپترها ومتعلقات آنها است، مشورت درخواست داده شد، و مهندسان فنی که در آنجا فعالیت می کنند تاکید کردند که 90٪ مشاکل که داشتند به خاطر ضرایب کنترلی و یا سنسورهای داده برداری بودند. همچنین یک کوادروتور را که شبیه کوادروتور پروژه است (بدنه پلاستیک، ابعاد یکسان، بدون ایزوله کننده برای موتورها وفلایت کنترل، ولی از فلایت کنترل خیلی خوب در آن استفاده شد) نشان دادند. بعداز این مساله تصمیم گرفته می شود که بر روی ضرایب کنترلی (PID) والگوریتم کنترلی آن کار انجام بشود.



شکل 45: تست نهایی کوادروتور با نگه داشتن پایه های آن



شکل 46: تست نهایی کواد بر روی استاند

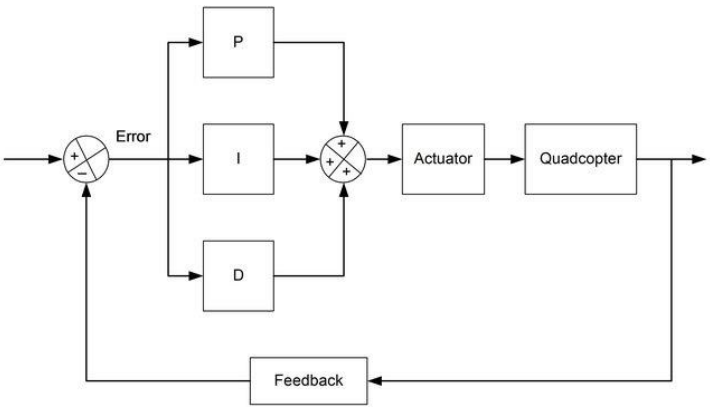
جدول 14: بعضی نتایج حاصل از تست های غیر ارتعاشاتی

نوع تست	مشاهده	نتیجه گیری
قرار دادن برد کنترلی بر روی میز کناری	- زوایا مناسب - نرخ زوایا در محدوده 5- تا 5	- جریان هوا لزوما مشکل ساز نیست .. چون در شرایط نیز سنسور در معرض باد بود
تست قرار دادن حفاظ بر روی برد کنترلی	-وضعیت نوسانات نرخ زوایا به نصف کاهش پیدا کرد.	- اسفاده از محافظ مناسب به طوری که به سیم ها فشار وارد نکند توصیه میشود
ساختار ساندویچی	-به نظر تغییر خاصی نداشت حتی شاید یکم بدتر می کرد.	- تو مراجع گفته شده بود لزوماً تاثیر نداره همیشه(به جنس پلیت و ... بستگی دارد)
تست سفت نگه داشتن بدنه با دست	- کمی بهتر بود	- بدنه ریجید تر بشود شرایط بهتر میشود

4. مباحث اضافه: بررسی ضرایب کنترلر

4-1 . تعریف کلی در مورد کنترلر PID در کوادکوپتر:

کنترلرهای مختلفی جهت کنترل سیستم های هوشمند مانند کوادکوپتر وجود دارند که از نظر کاربرد کنترلرهای *PID* نسبت به بقیه عمومی تر و کاربردی تر هستند. کنترلر پی آی دی *PID* یک سیستم کنترلی حلقه بسته مخفف سه کلمه *Proportional Integral Derivative* است که سعی می کند نتایج مورد انتظار مارا با توجه به مقادیر ورودی برآورده سازد. کنترلر *PID* به اساس سه زمان کار می کند: زمان کنونی، زمان گذشته و زمان آینده. یعنی کنترلر *PID* شرایط فعلی را بررسی می کند از اتفاقات گذشته استفاده کرده و نهایتا آینده را نیز پیش بینی می کند. کوادکوپتر ها و مولتی روتورها از این سیستم کنترلی جهت رسیدن به تعادل استفاده می کنند.



شکل 47: بلوک دیاگرام کنترلر PID در کوادکوپتر

سه الگوریتم در یک سیستم کنترلی *PID* به نام های *D, I, P* وجود دارد. *P* وابسته به خطای کنونی سیستم است، *I* حاصل جمع خطاهای قبلی و *D* تخمین خطای آینده است. این سه الگوریتم نهایتا بصورت کد در آمده و در سیستم مورد استفاده قرار می گیرند.

هدف این است که با ست کردن ثابت های این کنترلر، کنترل بهتری روی کوادکوپتر داشته باشیم و تا حد امکان خطا را صفر کنیم.

ویژگی *P:*

این ویژگی مهمترین ویژگی کنترلر است زیرا کوادکوپتر فقط با استفاده از این ویژگی میتواند پرواز کند. یعنی بدون استفاده از دیگر ویژگی ها و فقط با ای ویژگی میتواند در حالت تعادل قرار گیرد.

- اگر ثابت خیلی کوچک باشد:
  - کوادکوپتر خیلی دیر پاسخ می دهد. (در کوادکوپتر های نامتعادل ممکن است پاسخ ندهد).
  - کنترل کوادکوپتر مشکل می شود.
- اگر ثابت خیلی بزرگ باشد:
  - در حالی که کوادکوپتر در حالت تعادل قرار دارد نوسان زیادی خواهد داشت.
  - حساسیت کوادکوپتر نسبت به تغییرات زاویه زیاد می شود.
- اگر ثابت مقدار صحیح باشد:
  - کوادکوپتر سریع پاسخ می دهد
  - کوادکوپتر دقیقا در زاویه دلخواه قرار می گیرد.
  - کوادکوپتر نوسان جزیی دارد که قابل جبران است.

ویژگی I:

این ویژگی برای واکنش به تاثیرات محیطی مثل باد، عدم تعادل فریم و ... کاربرد دارد. مثلا ممکن است باد کوادکوپتر را 10 درجه منحرف کرده باشد. این ویژگی باعث می شود که کواد 10 درجه را جبران کرده و مجددا در زاویه ای که قبلا بود قرار گیرد. در واقع این ویژگی عامل های بیرونی را جبران می کند.

- اگر ثابت خیلی کوچک باشد:
  - عوامل بیرونی تاثیر زیادی در رفتار کوادکوپتر خواهند داشت.
- اگر ثابت خیلی بزرگ باشد:
  - پاسخ کوادکوپتر مقدار کند است (به دلیل اینکه با افزایش این ثابت تاثیر ثابت P کمتر می شود)
  - کوادکوپتر نوسان خواهد کرد ولی فرکانس نوسان نسبت به ویژگی P کمتر است.
- مقدار صحیح باشد:
  - کوادکوپتر به نرمی حرکت می کند در کنار اینکه پاسخ سریعی دارد.

از نظر مفهومی ویژگی I کنترلر همانند یک حافظه عمل می کند. مثلا 1000 حالت قبلی خود را در حافظه دارد و رفتار خود را با استفاده از اتفاقات گذشته تنظیم میکند. به عنوان مثال دیگر اگر فریم کوادکوپتر نامتعادل باشد باید موتوری که در قسمت سنگین تر قرار دارد با دور بیشتری بچرخد تا کوادکوپتر به تعادل برسد. این افزایش دور یک موتور در حافظه کوادکوپتر ثبت می شود تا در تصمیمات بعدی دخیل شود. همچنین هیچ دو موتوری دارای دور و ویژگی های یکسان نیستند لذا ویژگی I به کمک ا آمده تا این عوامل بیرونی که در رفتار کوادکوپتر تاثیر دارند را حذف کند.

ویژگی D:

این ویژگی به کوادکوپتر کمک می کند تا خیلی سریع از مقدار فعلی به مقدار مورد انتظار برسد. بعضی این ویژگی را به نام شتاب دهنده می شناسند به دلیل اینکه ورودی کاربر را چند برابر می کند. همچنین این ویژگی با کاهش سریع خطا سریعا کاهش پیدا می کند. به عنوان یک مثال وقتی شما شدیدا گرسنه هستید با سرعت بیشتری غذا می خورید تا وقتی که نسبتا سیر شوید و پس از آن سرعت غذا خوردن شما نیز کاهش می یابد. این ویژگی در عمل باعث افزایش سرعت پاسخ گویی کوادکوپتر می شود و بعضی مواقع تاثیر ویژگی P را افزایش می دهد.

اگه مقدار بزرگی برای ثابت این ویژگی انتخاب شود کوادکوپتر با فرکانس بالا نوسان می کند.

بصورت مفهومی این ثابت ها میزان تاثیر ویژگی های متناظر را مشخص می کنند. به عنون مثلا وقتی ثابت I زیاد است یعنی کوادکوپتر بیشتر تابع گذشته خود است تا حال و آینده *[8]*.

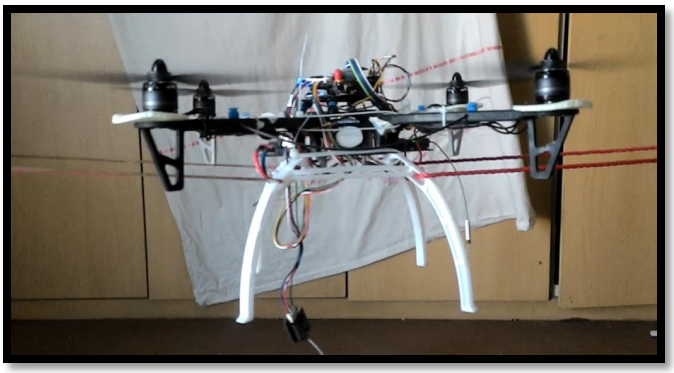
4-2 . روش تنظیم ثابت های کنترلر:

چند روش برای تنظیم قابت های کنترلر *PID* وجود دارد که سه تا از آنها را نام می بریم:

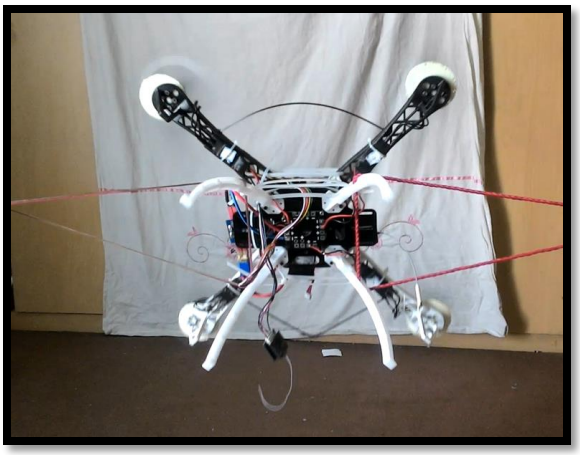
- روش سعی و خطا: این روش یکی از ساده ترین و عمومی ترین روشهای تنظیم ثابت های کنترلر می باشد که با سعی و خطا می توانیم به مقادیر نسبتا دقیقی برسیم.
- استفاده از الگوریتم های اکتشافی همانند الگوریتم های ژنتیک که با استفاده از تکامل داروین سعی در پیدا کردن این ثابت ها می کنند. در این الگوریتم اعداد نسبتا (و تا حدودی هوشمند) تصادفی برای ثابت ها در نظر گرفته می شود و هر بار خروجی مورد بررسی قرار می گیرد تا بهترین ثابت ها مشخص شوند.
- روش *Ziegler-Nichols:* در این روش با استفاده از محاسبات ریاضی ثابت ها محاسبه می شوند.

برای رفع مشکل کنترلر ما ابتدا از روش سعی وخطا استفاده کردیم برای سادگی وآسان بودن آن. مشکل اصلی این است که P و D رابطه مستقیم با هم دارند و رابطه عکس با I و لذا تغییر در ثابت ها یک روند حلقوی است یعنی پس از طی کردن ۳ مرحله فوق مجددا باید به مرحله ۱ برگشت و مقادیر را تغیر داد تا زمانی که بهترین نتیجه حاصل شود.

پس از بیشتر از بیست تا تست با ثابت های *PID* مختلف به نتایجی رسیدیم که در دور های پایین موتور (کمتر از 50٪), نتایج خیلی قابل قبولی هست وکوادکوپتر روی استاند تست می توانست خود را کنترل کند, ولی موقعی که دور موتور از 50٪ بالاتر برود, کوادکوپتر خیلی نوسان و وول می کند وبه اصلاح *wobbling* خیلی زیاد دارد.



شکل 48: کوادکوپتر در حالت روشن وکنترل شده (دور موتور 50%)



شکل 49: کوادکوپتر در حالت کنترل از دست داده (دور موتور 70%)

برای رفع این مشکل در قسمت پیشنهادات چند تا ایده مطرح شده که شاید بتواند وضعیت کنترلر را اصلاح کند.

5. جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات

5-1 . جمع بندی:

در این پروژه سازه یک کوادروتور سبک دست ساز مورد تحلیل ارتعاشات قرار گرفته است. شرایط قبلی به گونه ای بوده که در محل قرارگیری سنسورهای ناوبری در کوادروتور دامنه ارتعاشات سازه ای ناشی از تحریک پره ها زیاد است به گونه ای نویز زیادی روی سنسورها وارد می شد که عملکرد سیستم کنترل را به شدت کاهش می داد. از این رو به کمک مدل سازی توسط نرم افزارهای آنسیس و سالید تحلیل ارتعاشات انجام شده که به این نتیجه رسیدیم که جنس ماده استفاده شده در سازه کوادکوپتر خلیلی مساعد نیست زیرا که سازه 7 بار تحت فرکانس تشدید (42.3، 51.2، 96.971، 96.978، 117.62، 128.29 و 128.42 هرتز) قرار می گیرد. این نشان دهندۀ وضعیت بد فریم است. وبررسی ما نشان داده که استفاده از فریم فیبر گلاسی یا فیبر کربنی وضعیت فرکانسی سازه خیلی بهبود می کند.

برای رفع مشکل ارتعاشات سازه ما سعی کردیم ابتدا با استفاده از بالانسر حرفه ای *ATG* ملخ ها را بالانس کنیم. سپس با استفاده از دمپر پرینت شده با پرینتر 3 بعدی, برد کنترلری ما را ایزوله کردیم و با استفاده از ماده ی شیمیایی پلی اورتان ارتعاشات موتور ها را دمپ کردیم. علاوه بر آن, وبه کمک سیم های فیبر کربن, سیم مفتولی ونخ ها سازه را سخت کردیم. در نهایت به نتایج قابل قبولی رسیدیم که ارتعاشات سازه به کمتر از حد مجاز تعریف شده توسط بزرگان وشاهکاران صنعت کوادروتور نظیر آردوپایلوت کاهش یافت و ارتعاشات در بازه ی مجاز بین -3 و+3 متر بر مجذور ثانیه در راستای x و y و بازه ی -15 و-5 متر بر مجذور ثانیه در راستای z قرار گرفته است.

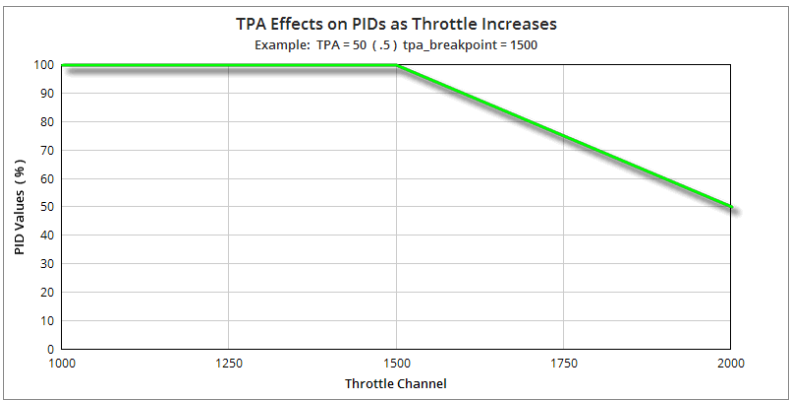
ولی با وجود این ، کوادروتور نتوانست به پرواز پایدار درآید. به خاطر همین، در کنار ارتعاشات، ضرایب والگوریتم کنترلی آن نیز مورد توجه قرار می گیرد و مباحث مربوط به داده برداری توسط سنسورها مثل شتاب سنج و ژیروسکوپ همچون نرخ تغییر زاویه، فیلتر کردن آن وغیره بررسی می شود. همچنین بالانس کردن اسپید کنترلر موتورهای براشلس و درست کردن جوشهای برد توزیع ولتاژ واتصالات انجام می شود. در نهایت نتیجه می شود که مشکل در دو امر اساسی وجود دارد: بورد ناوبری

حاوی سنسورها به خاطر وزن زیادی و قدیمی بودن آن است که در بازار دیگر موجود نیست واین علت اصلی ناپایداری است، و عدم بهینه وخوب بودن الگوریتم کنترلی بورد کنترلر است.

5-2 . پیشنهادات:

- اضافه کردن (*TPA Breakpoint*)

TPA کمک می کند که کوادکوپتر های که مشکل از دست دادن کنترل در *throttle* بالا را حل کند. کاری که *TPA* می کند این است که با زیاد شدن *throttle*, ضرایب *PID* را کم می کند که این باعث می شود حرکت های عنیف که به از دست دادن کنترل منجر می شوند را از بین برده شوند. این خاصیت در برخی از سیستم های کوادکوپتر معروف مانند *multiwii* موجود است وبرای حل مشکل های وول خوردن (*wobbling*) استفاده می شود.



شکل 50: نمودار نمونه از تاثیر TPA روی ضرایب PID

در این شکل می بینیم چه جوری سیستم *TPA* کار می کند وملاحظه می شود که اگر برای مثال نقطه *TPA Breakpoint* 0.5 را بگیریم, ضرایب *PID* در حالت *full throttle* حدود 50٪ کاهش پیدا می کنند.

- هم زمین کردن *IMU* با موتورها

با اینکه این پیشنهاد خیلی ساده به نظر می رسد اما در بسیاری از سایت های مخصوص از این راه حل برای رفع مشکل از دست دادن کنترل توصیه می شود. مشکل اصلی این است که ژیروسکوپ "حس" می کند که خودش بالاتر از موتور هاست وبه خاطر همین همیشه سعی می کند موقعیت

کوادکوپتر را تصحیح کند واین باعث اختلال آن می باشد. شاید از طریق تغییر کود برنامه این مشکل حل شود اما بهتر است به صورت دستی این کار را انجام شود.

- عوض کردن *IMU*

زیرا *IMU* مورد نظر در کوادکوپتر خیلی قدیمی است وبه درد نمی خورد بهتر است آن را عوض کرد تا به نتایج بهتری رسید. یک جستجو در اینترنت نشان می دهد که امروزه تعداد خیلی زیاد از برد های کنترلری پر قدرت با قیمت های خیلی پایین می شود خرید و خود سنسورهای مورد استفاده در برد های کوادکوپتر بسیار فروان وارزان هستند ومی شود با استفاده از آن یک برد خوب درست کرد.

فهرست مراجع

(1) Leishman, J.G. (2000). Principles of Helicopter Aerodynamics. New York, NY: Cambridge University Press.
(2) Büchi, Roland (2011). Fascination Quadrocopter. ISBN 978-3-8423-6731-9.
(3) K.Munson "Helicopters And Other Rotorcraft Since 1907", 1968
(4) http://ardupilot.com/ardupilot/docs/common-history-of-ardupilot.html
(5) Building Multicopter Video Drones, Ty Audronis
(6) An article by Rheana Murray on 8th August 2014, headlined, "How Drones will Replace Humans in the Workplace" (www.abcnews.com)
(7) An article headlined "Farming Takes Flight Drones save IL Farmers Time and Money" (www.farmingdrones.com)
(8) Weblog negare.net, Ahmed Ganj Sabet, PID controller in Quadcopters

پیوست‌ها:

MATLAB Function for plotting acceleration from accelerometer out of IMU:

```
function
[ID,MsgID,time,ax,ay,az,wx,wy,wz,mx,my,mz,phi_ins,theta_ins,psi_ins,phi
_meas,theta_meas,psi_meas,phi_fus,theta_fus,psi_fus,status] =
importMocap(filename, startRow, endRow)
%IMPORTFILE Import numeric data from a text file as column vectors.
%
[ID,MSGID,TIME,AX,AY,AZ,WX,WY,WZ,MX,MY,MZ,PHI_INS,THETA_INS,PSI_INS,PHI
_MEAS,THETA_MEAS,PSI_MEAS,PHI_FUS,THETA_FUS,PSI_FUS,STATUS]
%    = IMPORTFILE(FILENAME) Reads data from text file FILENAME for the
%    default selection.
%
%
[ID,MSGID,TIME,AX,AY,AZ,WX,WY,WZ,MX,MY,MZ,PHI_INS,THETA_INS,PSI_INS,PHI
_MEAS,THETA_MEAS,PSI_MEAS,PHI_FUS,THETA_FUS,PSI_FUS,STATUS]
%    = IMPORTFILE(FILENAME, STARTROW, ENDROW) Reads data from rows
STARTROW
%    through ENDROW of text file FILENAME.
%
% Example:
%
[ID,MsgID,time,ax,ay,az,wx,wy,wz,mx,my,mz,phi_ins,theta_ins,psi_ins,phi
_meas,theta_meas,psi_meas,phi_fus,theta_fus,psi_fus,status]
%    = importfile('A_12_2.txt',1, 13562);
%
%     See also TEXTSCAN.

% Auto-generated by MATLAB on 2016/03/02 12:22:11

%% Initialize variables.
delimiter = ',';
if nargin<=2
    startRow = 1;
    endRow = inf;
end

%% Format string for each line of text:
%   column1: double (%f)
%   column2: double (%f)
%   column3: double (%f)
%   column4: double (%f)
%   column5: double (%f)
%   column6: double (%f)
%   column7: double (%f)
%   column8: double (%f)
%   column9: double (%f)
%   column10: double (%f)
%   column11: double (%f)
%   column12: double (%f)
%   column13: double (%f)
```

```
%   column14: double (%f)
%   column15: double (%f)
%   column16: double (%f)
%   column17: double (%f)
%   column18: double (%f)
%   column19: double (%f)
%   column20: double (%f)
%   column21: double (%f)
%   column22: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%[^\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to format string.
% This call is based on the structure of the file used to generate this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating the
code
% from the Import Tool.
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue' ,NaN,'HeaderLines', startRow(1)-1,
'ReturnOnError', false);
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue'
,NaN,'HeaderLines', startRow(block)-1, 'ReturnOnError', false);
    for col=1:length(dataArray)
        dataArray{col} = [dataArray{col};dataArrayBlock{col}];
    end
end

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Post processing for unimportable data.
% No unimportable data rules were applied during the import, so no post
% processing code is included. To generate code which works for
% unimportable data, select unimportable cells in a file and regenerate
the
% script.

%% Allocate imported array to column variable names
ID = dataArray{:, 1};
MsgID = dataArray{:, 2};
time = dataArray{:, 3};
ax = dataArray{:, 4};
ay = dataArray{:, 5};
az = dataArray{:, 6};
wx = dataArray{:, 7};
wy = dataArray{:, 8};
wz = dataArray{:, 9};
mx = dataArray{:, 10};
my = dataArray{:, 11};
mz = dataArray{:, 12};
phi_ins = dataArray{:, 13};
theta_ins = dataArray{:, 14};
```

```
psi_ins = dataArray{:, 15};
phi_meas = dataArray{:, 16};
theta_meas = dataArray{:, 17};
psi_meas = dataArray{:, 18};
phi_fus = dataArray{:, 19};
theta_fus = dataArray{:, 20};
psi_fus = dataArray{:, 21};
status = dataArray{:, 22};
```

MATLAB code to plot the data:

```
clc
clear
close all

[ID,MsgID,time,ax,ay,az,wx,wy,wz,mx,my,mz,phi_ins,theta_ins,psi_ins,phi
_meas,theta_meas,psi_meas,phi_fus,theta_fus,psi_fus,status] =
importMocap('A_18_53.txt');


figure
plot(time*100)

figure
plot(time, ax)
xlabel('time (s)')
ylabel('a_x')

figure
plot(time, ay)
xlabel('time (s)')
ylabel('a_y')

figure
plot(time, az)
xlabel('time (s)')
ylabel('a_z')
```