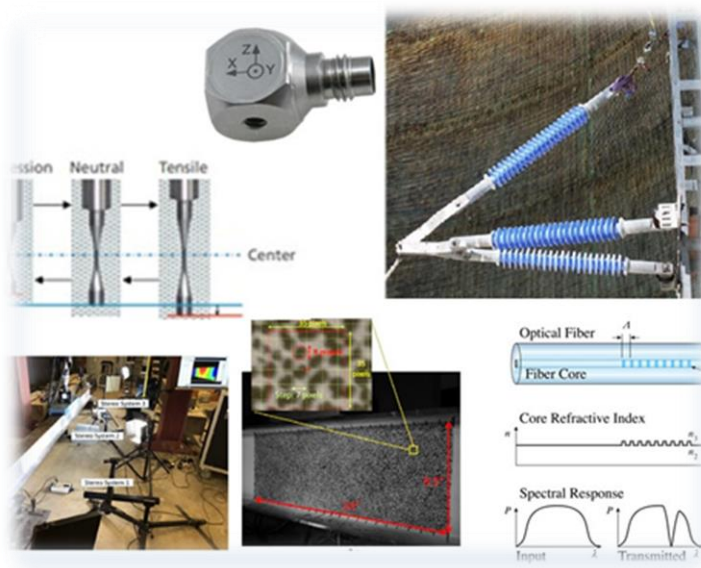


بکارگیری فناوری‌های نوین آزمایشگاهی در ارزیابی سازه‌های صنعت برق



مدیر پروژه:

آرش یگانه فلاح

واحد مجری:

گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بکارگیری فناوری‌های نوین آزمایشگاهی در ارزیابی سازه‌های صنعت برق

مدیر پروژه: آرش یگانه فلاح

گروه پژوهشی پشتیبان: گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

همکاران پروژه: پگاه نادرپور شاد

واحد مجری: گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

انتشارات پژوهشگاه نیرو

مرداد ۱۴۰۱

کد ثبت گزارش: NRI-ER-920-PCVPN19-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.348

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق
بکارگیری فناوری‌های نوین آزمایشگاهی در ارزیابی سازه‌های صنعت برق / مدیر پروژه: یگانه فلاح، آرش.
کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۲۴۳ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. نادرپور شاد، نگار، همکار پروژه. ۲. رهنورد، علی‌رضا، مدیر واحد مجری. ۳. گروه
پژوهشی سازه‌های صنعت برق. ۴. تکنیک‌های نوین ارزیابی و بهبود عملکرد سازه‌ها



انتشارات پژوهشگاه نیرو
گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود
متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دامن، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب آرش یگانه فلاح ، مدیر پروژه بکارگیری فناوری‌های نوین آزمایشگاهی در ارزیابی سازه‌های صنعت برق و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

□ گزارش حاصل انجام مرحله از مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. پگاه نادرپور شاد

۲.

۳.

۴.

پیشگفتار:

همواره ارزیابی عملکردی سازه‌های صنعت برق به سبب تعیین قابلیت اطمینان آن‌ها و در عین حال بهینه شدن هزینه‌های تولید، نگهداری و افزایش عمر آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. روش‌های ارزیابی عملکرد سازه‌ها بطور کلی به سه دسته اصلی تقسیم می‌گردد: روش‌های عددی، روش‌های مبتنی بر آزمایش و روش‌های ترکیبی (و یا اصطلاحاً هیبرید). با استفاده از این روش‌ها و یا ترکیب آن‌ها می‌توان عملکرد سازه‌های صنعت برق را تحت انواع مختلف الگوهای بارگذاری آیین‌نامه‌ای و یا بارهای نهایی مورد بررسی قرار داد. هر یک از روش‌های ارزیابی رفتار سازه‌ها دارای مزایا و معایبی به شرح زیر می‌باشند که با توجه به نوع پروژه و امکانات در دسترس می‌توان نسبت به انتخاب روش مناسب اقدام نمود: روش‌های عددی، دارای بیشترین کارایی برای ارزیابی رفتار سازه‌ها با صرف زمان و هزینه نسبتاً پایین می‌باشد؛ ولی به دلیل ساده‌سازی‌های روش‌های عددی بسیاری از شرایط مکانیکی مصالح و سازه در مدل‌سازی، به خصوص مدلسازی رفتارهای پیچیده سازه‌ای، دیده نمی‌شود. از طرفی آزمون‌های آزمایشگاهی واقع‌گرایانه‌ترین روش برای کسب اطمینان از نحوه عملکرد سازه‌ها خصوصاً مصالح و سیستم‌های نوین سازه‌ای می‌باشد، ولی مهمترین ضعف آزمون‌های آزمایشگاهی، هزینه بالای آن و محدود بودن تعداد آزمون-هایی که می‌توان انجام داد می‌باشد. به علاوه حتی در بزرگترین آزمایشگاه‌های دنیا محدودیت‌های زیادی از نظر نوع و سایز آزمایش‌های قابل انجام وجود دارد. در مقابل این دو روش، روش شبیه‌سازی هیبرید با امکان ارزیابی سازه در دو یا چند بخش مجزا سبب شده تا در سال‌های اخیر توجه زیادی را بخود جلب کند. روش هیبرید که امکان استفاده موازی از امکانات چندین آزمایشگاه و نرم‌افزار را فراهم می‌آورد، به صورت هیبرید آزمایشگاهی-آزمایشگاهی، آزمایشگاهی-عددی و عددی-عددی دسته‌بندی می‌گردد. هرچند روش‌های هیبریدی امکان سنجش عملکرد سازه را بصورت دقیق‌تر از روش‌های عددی و ارزان‌تر از روش‌های آزمایشگاهی فراهم می‌آورند، اما بسته به نوع آن زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری اولیه خاصی را می‌طلبد که نیاز به دقت و هزینه بالایی دارد. اهداف اصلی این پژوهش به صورت زیر می‌باشد:

- شناسایی و مطالعه ادبیات فنی، سوابق موضوعی در مورد فناوری‌های نوین جهت ارزیابی عملکرد سازه‌ها، بخصوص سازه‌های صنعت برق، شناخت آزمایشگاه‌ها و شرکت‌های فعال در این زمینه
- جمع‌آوری اطلاعات در مورد فناوری‌های مورد استفاده در آزمایشگاه‌های مرجع سازه‌های صنعت برق دنیا
- بررسی امکان سنجی استفاده از این فناوری‌های نوین در صنعت برق کشور
- ارزیابی آزمایشگاه سازه‌های صنعت برق اراک از لحاظ پتانسیل‌های موجود و ارائه رویکردهای پیشنهادی در ارتباط با افزایش بهره‌وری این آزمایشگاه

این گزارش مربوط به مراحل اول، دوم و سوم از پروژه بکارگیری فناوری‌های نوین آزمایشگاهی در ارزیابی سازه‌های صنعت برق است که پشتیبانی آن، بر عهده گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق و نظارت بر/داوری آن، بر عهده جناب آقای دکتر تورج تقی‌خانی بوده است.

فهرست مطالب

مقدمه:	۲۰
فصل اول:	۲۰
مطالعه ادبیات فنی موجود در راستای شناسایی فناوری‌های نوین جهت ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق	۲۲
مقدمه فصل اول:	۲۲
۱-۱ بررسی ادبیات فنی و سوابق موضوعی در رابطه با فناوری‌های نوین آزمایشگاهی جهت ارزیابی عملکرد سازه‌ها	۲۲
۱-۱-۱ آزمایش	۲۳
۱-۱-۲ حسگر	۲۶
۱-۱-۲-۱ حسگر فیبر نوری (OFS)	۲۶
۱-۱-۲-۲ حسگر تداخل سنج	۲۷
۱-۱-۲-۳ حسگر توری براگ فیبری (FBG)	۲۸
۱-۱-۲-۴ حسگر توری فیبر پرپود طولانی	۳۷
۱-۱-۳ حسگرهای	۳۸
۱-۳-۱-۱ حسگر فشار پیزوالکتریک	۳۸
۱-۳-۱-۲ حسگر فشار پیزومقاومتی	۳۸
۱-۳-۱-۳ حسگرهای فشار پیزو-نوری	۳۹
۱-۳-۱-۴ حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک جهت ارزیابی سلامت سازه	۴۱
۱-۳-۱-۵ حسگرهای میکروالکترومکانیک	۴۳
۱-۴-۱-۱ سنجش جابه‌جایی سازه مبنی بر دید	۴۴
۱-۴-۱-۲ ارتعاش سنج داپلر لیزری	۵۲
۱-۵-۱-۱ مشکلات تحلیل و طراحی سازه‌ها - مزایای رویکرد ارزیابی ترکیبی عددی و آزمایشگاهی سازه‌ها (مثال موردی دو سازه برج انتقال - سازه جداسازی شده)	۵۳
۱-۵-۱-۲ مشکلات مدل سازی، تحلیل برج و اختلاف آن با رفتار واقعی	۵۵
۱-۵-۱-۳ انتخاب اعضا	۵۵
۲-۱-۵-۱-۱ مدل کردن اتصالات	۵۶

۳-۱-۵-۱-۱ تحلیل	استاتیکی:
۵۷	
۴-۱-۵-۱-۱ تحلیل	دینامیکی:
۶۰	
۵-۱-۵-۱-۱ شبیه‌سازی	ترکیبی
۶۰	
۶-۱-۵-۱-۱ مثال	شبهه
۶-۱-۵-۱-۱ مثال	ساز
۶-۱-۵-۱-۱ مثال	ترکیبی
۶-۱-۵-۱-۱ مثال	جداشده
۶-۱-۵-۱-۱ مثال	لرزه‌ای:
۶۱	
فصل دوم	
۸۵	
۸۵	شناسایی آزمایشگاه‌ها فعال در زمینه ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق
۸۵	مقدمه فصل دوم:
۱۱-۲ اجزای اصلی	ایستگاه
۱۱-۲ اجزای اصلی	آزمون
۱۱-۲ اجزای اصلی	برج
۱۱-۲ اجزای اصلی	های
۱۱-۲ اجزای اصلی	انتقال
۱۱-۲ اجزای اصلی	نیرو
۸۵	
۱-۱-۲ ایستگاه	آزمایش
۱-۱-۲ ایستگاه	برجهای
۱-۱-۲ ایستگاه	انتقال
۱-۱-۲ ایستگاه	نیرو
۱-۱-۲ ایستگاه	در
۱-۱-۲ ایستگاه	هند
۸۹	
۱-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال نیرو
۸۹	
۲-۱-۲ ایستگاه	آزمایش و تحقیق برجهای انتقال قدرت پالوارام (چنای)
۹۱	
۳-۱-۲ ایستگاه	آزمایش مرکز تحقیق و گسترش برجهای انتقال قدرت کالپا-تارو
۹۴	
۴-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال قدرت قوتی
۹۵	
۵-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال قدرت گامون
۹۶	
۶-۱-۲ ایستگاه	آزمایش و تحقیق خط انتقال لارسن و توبرو (L & T)
۹۶	
۲-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال
۲-۱-۲ ایستگاه	نیرو
۲-۱-۲ ایستگاه	برزیل
۱۰۰	
۳-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال
۳-۱-۲ ایستگاه	نیرو
۳-۱-۲ ایستگاه	اسپانیا
۱۰۱	
۴-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال
۴-۱-۲ ایستگاه	نیرو
۴-۱-۲ ایستگاه	چین
۱۰۳	
۵-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال
۵-۱-۲ ایستگاه	نیرو
۵-۱-۲ ایستگاه	ژاپن
۱۰۵	
۶-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال
۶-۱-۲ ایستگاه	نیرو
۶-۱-۲ ایستگاه	عربستان
۶-۱-۲ ایستگاه	صعودی
۱۰۶	
۷-۱-۲ ایستگاه	آزمایش برجهای انتقال
۷-۱-۲ ایستگاه	نیرو
۷-۱-۲ ایستگاه	رومانیا
۱۰۸	

۸-۱-۲ ایستگاه	آزمایش	برج‌های	انتقال	نیرو	سارایوو
۱۱۱					
۹-۱-۲ ایستگاه	آزمایش	برج‌های	انتقال	نیرو	اسکوم
۱۱۲					
۱۰-۱-۲ ایستگاه	آزمایش	برج‌های	انتقال	نیرو	اراک
۱۱۲					
۱۱-۱-۲ سایر	ایستگاه‌های	آزمایش	برج‌های	انتقال	نیرو
۱۱۶					
۲-۲ برخی از	آزمون‌های	متداول	در	حوزه	انتقال و توزیع نیرو
۱۱۶					
۱-۲-۲ آزمون	خزش	در	بازوی	مرکب	برج‌های خط انتقال
۱۱۶					
۲-۲-۲ آزمون	مکانیکی	اینزولا تورهای	پست	(مقره):	
۱۲۳					
۳-۲-۲ تست	مکانیکی	بازوهای	عایق	ساخته شده	از مواد غیر سرامیکی:
۱۲۵					
۴-۲-۲ آزمون‌های	مکانیکی	کراس	آرم‌های	توزیع:	
۱۳۲					
۵-۲-۲ آزمون	مکانیکی	پایه‌های	توزیع	و	روشنایی
۱۳۶					
۱۴۱					
فصل سوم					
شناخت روند تغییرات و توسعه روش‌های ارزیابی سازه‌های صنعت برق با توجه به رویکرد جدید دنیا نسبت به تولید انرژی					
۱۴۱					
مقدمه فصل سوم					
۱۴۱					
۱۱-۳ آزمایشگاه	ملی	انرژی‌های	تجدیدپذیر		
۱۴۲					
۱-۱-۳ ۱ تونل					
۱۵۱					
۱-۱-۳ ۱-۱-۳ مشخصات تونل باد ناسا:					
۱۵۳					
۱-۱-۳ ۲-۱-۳ دیگر تونل بادهای شاخص در دنیا					
۱۵۴					
۱-۳-۲ آزمون	مکانیکی	سلول‌های	خورشیدی		
۱۵۶					
۱-۳-۳ انرژی	زمین	گرمایی			
۱۶۰					

فصل چهارم.....	۱۶۳
بررسی فنی و اقتصادی فناوریهای نوین در ارزیابی عملکرد سازههای صنعت برق.....	۱۶۳
مقدمه فصل چهارم.....	۱۶۳
4-1 بررسی فنی و اقتصادی آزمایش خستگی دینامیکی در ارزیابی عملکرد سازههای صنعت برق.....	۱۶۳
4-1-1 کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:.....	۱۶۳
4-1-2 بررسی اقتصادی	فناوری:
.....	۱۶۵
4-2 بررسی فنی و اقتصادی حسگر فیبر نوری در ارزیابی عملکرد سازههای صنعت برق.....	۱۶۶
4-2-1 کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:.....	۱۶۷
4-2-2 بررسی اقتصادی	فناوری:
.....	۱۶۹
4-3 بررسی فنی و اقتصادی حسگرهای توری براگ فیبری در ارزیابی عملکرد سازههای صنعت برق.....	۱۶۹
4-3-1 کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:.....	۱۶۹
4-3-2 بررسی اقتصادی	فناوری:
.....	۱۷۴
4-4 بررسی فنی و اقتصادی سنجش جابه‌جایی سازه مبنی بر دید در ارزیابی عملکرد سازههای صنعت برق.....	۱۷۴
4-4-1 کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:.....	۱۷۶
4-4-2 بررسی اقتصادی	فناوری:
.....	۱۷۷
4-5 بررسی فنی و اقتصادی ارتعاش‌سنج داپلر لیزری در ارزیابی عملکرد سازههای صنعت برق.....	۱۷۷
4-5-1 کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:.....	۱۷۸
4-5-2 بررسی اقتصادی	فناوری:
.....	۱۷۹

۴-۶ بررسی فنی و اقتصادی حسگر جابجایی سنج لیزری در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق	۱۷۹
۴-۶-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:	۱۸۰
۴-۶-۲ بررسی اقتصادی فناوری:	۱۸۱
۴-۷ بررسی فنی و اقتصادی حسگرهای پیزو الکتریک در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق	۱۸۱
۴-۷-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:	۱۸۳
۴-۷-۲ بررسی اقتصادی فناوری:	۱۸۴
۴-۸ بررسی فنی و اقتصادی شبیه‌سازی ترکیبی در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق	۱۸۵
۴-۸-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:	۱۸۵
۴-۸-۲ بررسی اقتصادی فناوری:	۱۸۷
۴-۹ بررسی فنی و اقتصادی آزمون خزش در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق	۱۸۷
۴-۹-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:	۱۸۷
۴-۹-۲ بررسی اقتصادی فناوری:	۱۹۰
۴-۱۰ بررسی فنی و اقتصادی استفاده از تصویر دیجیتال همبسته برای سنجش میدان کرنش و تنش	۱۹۰
۴-۱۰-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:	۱۹۱
۴-۱۰-۲ بررسی اقتصادی فناوری:	۱۹۳
۴-۱۱ بررسی فنی و اقتصادی استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک جهت ارزیابی عملکرد سازه	۱۹۳
۴-۱۱-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:	۱۹۴

فناوری:	اقتصادی	۲-۱۱-۴ بررسی
۱۹۶.....		
۱۲-۴ بررسی	فنی و اقتصادی	آزمون تونل باد
۱۹۶.....		
۱-۱۲-۴ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:		
۱۹۷.....		
۲-۱۲-۴ بررسی	اقتصادی	فناوری:
۱۹۷.....		
فصل پنجم.....		
۱۹۸.....		
اولویت‌بندی فناوریهای نوین در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق.....		
۱۹۸.....		
مقدمه فصل پنجم:.....		
۱۹۸.....		
۵-۱ اولویت بندی فناوریهای نوین آزمایشگاهی بر اساس شاخصهای فنی، کاربردی-اجرایی و اقتصادی		
۱۹۸.....		
فصل ششم:.....		
۲۰۵.....		
ارزیابی آزمایشگاه سازه‌های صنعت برق اراک از لحاظ پتانسیلهای موجود و ارائه رویکردهای پیشنهادی در ارتباط با افزایش بهره‌وری این آزمایشگاه.....		
۲۰۵.....		
مقدمه فصل ششم:.....		
۲۰۵.....		
۶-۱ ارزیابی شرایط و پتانسیلهای موجود آزمایشگاه سازه اراک		
۲۰۵.....		
۶-۱-۱ اسسخدمات آزمایشگاهی که در حال حاضر در آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک ارائه میگردد		
۲۰۶.....		
۶-۱-۲ ظرفیتهای آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک		
۲۱۲.....		
فصل هفتم.....		
۲۲۱.....		
ارائه رویکردهای پیشنهادی جهت افزایش بهره‌وری آزمایشگاه سازه اراک.....		
۲۲۱.....		
مقدمه فصل هفتم:.....		
۲۲۱.....		
۷-۱ استفاده از جابجایی سنجهای لیزری به جای دوربین تئودولیت در آزمون نوعی برجهای انتقال نیرو		
۲۲۱.....		
۷-۲ ارتقاء سیستم اکتساب داده کنترل کننده جهت برداشت همزمان جابجاییها و نیروها		
۲۲۲.....		
۷-۳ ارتقاء سیستم اکتساب داده جهت ثبت داده کرنش از کرنش سنج و نیروهای اعمالی بصورت هم زمان		
۲۲۲.....		
۷-۴ ارتقاء ریلهای توزیع نیرو در جلوی اتاقهای وینچ و افزایش ظرفیت و تعداد وینچها		
۲۲۳.....		

۷-۵ ارتقاء رابط نصب بستر آزمون سوم جهت آزمون راحتتر برجهای تلسکوپی فلزی و بتنی	۲۲۴
۷-۶ فراهم آوردن بستری جهت انجام آزمون ضربه در پایههای روشنایی	۲۲۶
۷-۷ فراهم آوردن تجهیزات لازم جهت انجام آزمون خمش سه و چهار نقطهای	۲۲۶
۷-۸ تجهیز آزمایشگاه به دستگاه انتشار آکوستیک جهت تشخیص میدانهای کرنش و عیوب ایجاد شده در سازه	۲۲۷
۷-۹ توسعه آزمایشگاه برای استفاده از فناوری سنجش میدان کرنش و تنش با استفاده از دوربین و فناوری پردازش تصویر	۲۲۷
۷-۱۰ ارتقاء و به روز رسانی تجهیزات موجود در آزمایشگاه که کمتر مورد استفاده واقع میگردند، به منظور انجام آزمونهای مطالعاتی و صنعتی	۲۲۸
۷-۱۱ تهیه ارتعاش سنجهای پیزو یا فیبر نوری و یا غیر تماسی لیزری جهت انجام آزمونهای مطالعاتی	۲۲۸
۷-۱۲ تجهیز آزمایشگاه به شبیه ساز ترکیبی جهت انجام آزمونها سازههای بزرگ مقیاس	۲۲۸
نتیجهگیری:	۲۳۰
فهرست مراجع	
	۲۳۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ دستگاه آزمایش خستگی اولتراسونیک [۱]. ۲۳
- شکل ۲-۱ تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش فشاری چرخه‌ای بتن [۲]. ۲۵
- شکل ۳-۱ سنجش مدول یانگ دینامیکی [۱]. ۲۶
- شکل ۴-۱ هدایت و بازتاب نور در یک فیبر نوری [۳]. ۲۷
- شکل ۵-۱ بررسی اجمالی تکنولوژی حسگر فیبر نوری [۳]. ۲۷
- شکل ۶-۱: حسگر کرنش فیبر نوری P-F [۴]. ۲۸
- شکل ۷-۱ حسگر کرنش فیبر نوری گیج طولانی [۴]. ۲۸
- شکل ۸-۱ روش اتصال به پایه با CTE بالا [۵]. ۲۹
- شکل ۹-۱ روش دو فلزی [۵]. ۲۹
- شکل ۱۰-۱ روش دو فلزی با دامنه سنجش قابل تنظیم [۵]. ۳۰
- شکل ۱۱-۱ روش دو فلزی برای پایش دما پایین [۵]. ۳۰
- شکل ۱۲-۱ پایش همزمان دما و کرنش [۵]. ۳۱
- شکل ۱۳-۱ پایش کرنش به وسیله یک FBG با جبران خودکار دما [۵]. ۳۱
- شکل ۱۴-۱ پایش کرنش به وسیله یک FBG چرپ شده [۵]. ۳۲
- شکل ۱۵-۱ شیب‌سنج تک محوری [۵]. ۳۲
- شکل ۱۶-۱ نما بالا از شیب‌سنج دو محوری - صفحه‌ای [۵]. ۳۳
- شکل ۱۷-۱ شتاب‌سنج FBG مبنی بر پیوستن سرتاسری [۵]. ۳۳
- شکل ۱۸-۱ شتاب‌سنج FBG تک محوری [۵]. ۳۴
- شکل ۱۹-۱ شتاب‌سنج سه محوری FBG [۵]. ۳۴
- شکل ۲۰-۱ دسته بندی مازول کرنش FBG [۵]. ۳۵
- شکل ۲۱-۱ روش ماسک فاز [۷]. ۳۶
- شکل ۲۲-۱ سیستم سنجش کرنش FBG [۷]. ۳۶
- شکل ۲۳-۱ کاربرد حسگرهای LPFG [۸]. ۳۷
- شکل ۲۴-۱ تجهیزات حسگر فشار مبنی بر پیزوالکتریک [۱۱]. ۳۸
- شکل ۲۵-۱ قراردادی حسگر پیزو الکتریک در شبکه آرماتورها پیش از بتن ریزی، و مراحل شماتیک آزمون، [۱۳] ۳۹
- شکل ۲۶-۱ بلوک دیاگرام تجهیزات آزمایشگاهی حسگر فشار پیزو- نوری [۱۱]. ۴۰
- شکل ۲۷-۱ بلوک دیاگرام حسگر فشار پیزو- نوری [۱۱]. ۴۰

- شکل ۱-۲۸ عملکرد کلی حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک، [۱۹] ۴۱
- شکل ۱-۲۹ استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک بر روی بخش داخلی بتن پل صندوقهای، [۲۰] ۴۲
- شکل ۱-۳۰ استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک در آزمون خمش سه نقطه‌ای در آزمایشگاه، [۱۹] ۴۲
- شکل ۱-۳۱ شتابنگار پیزورزیستو [24] ۴۴
- شکل ۱-۳۲ پیکربندی متداول روش‌های سنجش جابه‌جایی مبنی بر دید: الف) سخت‌افزار، ب) نرم‌افزار [۲۶] ۴۶
- شکل ۱-۳۳ مثال تصویری انتقال همگرایی بین صفحات تصویر و نشانگر [۲۶] ۴۷
- شکل ۱-۳۴ جریان ROI تطبیقی [۲۶] ۴۸
- شکل ۱-۳۵ فلوجارت سنجش جابه‌جایی مبنی بر دید کامپیوتری [۲۶] ۴۸
- شکل ۱-۳۶ آزمایش مقیاس آزمایشگاهی [۲۶] ۴۹
- شکل ۱-۳۷ تجهیزات آزمایش: الف) دید کلی، ب) موارد آزمایش با موقعیت‌های مختلف برای دوربین [۲۶] ۵۰
- شکل ۱-۳۸: مشخصات سخت‌افزار Ribcage [۲۷] ۵۱
- شکل ۱-۳۹: آزمایش روی دهانه جنوبی پل Governors [۲۷] ۵۲
- شکل ۱-۴۰: تجهیزات آزمایش میدانی [۲۸] ۵۳
- شکل ۱-۴۱ رفتار تئوری اتصال پیچی تحت نیروی کششی [۴۴] ۵۷
- شکل ۱-۴۲ الف) شناسایی مد کمانش یک برج [۴۱]، ب) ارزیابی یک زیرسازه تجربی برای شبیه‌سازی ترکیبی [۴۸]، ج) تنظیمات آزمایش برای شبیه‌سازی ترکیبی [۴۸] ۵۹
- شکل ۱-۴۳: تجهیزات آزمایش SRMD: الف) دید کلی و ب) تکیه‌گاه نصب شده [۵۵] ۶۲
- شکل ۱-۴۴: الگوریتم پیش‌بین-اصلاح‌کننده در مطلب [۶۷] ۶۵
- شکل ۱-۴۵: پیکربندی سخت‌افزار شبیه‌سازی ترکیبی [۵۵] ۶۶
- شکل ۱-۴۶: تنظیمات آزمایش شماتیک [۵۵] ۶۹
- شکل ۱-۴۷: پیکربندی کنترل‌گر ترکیبی در Simulink [۵۵] ۷۰
- شکل ۱-۴۸: دیاگرام بلوک Simulink برای جبران‌ساز سری زمانی تطبیقی [۵۸] ۷۲
- شکل ۱-۴۹: مدل شماتیک اصلاح اصطکاک، اینرسی و انحراف [۵۵] ۷۵
- شکل ۱-۵۰: سطوح تماس دستگاه: الف) عملگرهای قائم زیر صفحه، ب) تکیه‌گاه‌های بالا و پایین و ج) سطح لغزش پایه [۵۵] ۷۵
- شکل ۱-۵۱: اصلاح نمونه نیرو بازخورد (جهت طولی): الف) بازخورد نیروی خام، ب) نیروهای اصطکاک و خطای باقی‌مانده بین اصطکاک واقعی و پیش‌بینی‌شده [۵۵] ۷۶

- شکل ۵۲-۱ (الف) تکیه‌گاه‌های LPRB، (ب) EQSB و (ج) TPFB مورد استفاده در این برنامه آزمایشی [۵۵].
۷۷
- شکل ۵۳-۱ مقایسه شبیه‌سازی ترکیبی (زمان واقعی) و تحلیل عددی مطلق با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و پاسخ دو بعدی تحریک - هیسترتیک [۵۵].
۷۹
- شکل ۵۴-۱ مقایسه شبیه‌سازی ترکیبی (زمان واقعی) و تحلیل عددی مطلق با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و طیف پاسخ دو بعدی طبقه تحریک - در - سازه [۵۵].
۸۰
- شکل ۵۵-۱ جابه‌جایی نرمالیزه شده و خطای RMS برای شبیه‌سازی ترکیبی (زمان واقعی) با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و تحریک دو بعدی [۵۵].
۸۱
- شکل ۵۶-۱ مقایسه شبیه‌سازی ترکیبی (ده برابر کندتر) و تحلیل عددی مطلق با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و پاسخ سه بعدی تحریک - هیسترتیک [۵۵].
۸۲
- شکل ۵۷-۱ مقایسه شبیه‌سازی ترکیبی (ده برابر کندتر) و تحلیل عددی مطلق با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و طیف پاسخ سه بعدی طبقه تحریک - در - سازه [۵۵].
۸۳
- شکل ۱-۲: بستر آزمون، جهت برپایی برجهای -آزمایشگاه سازههای انتقال و توزیع نیرو اراک.....
۸۶
- شکل ۲-۲: برجهای کمکی عرضی و طولی -آزمایشگاه سازههای انتقال و توزیع نیرو اراک.....
۸۷
- شکل ۳-۲: عملگرهای اعمال نیرو
۸۸
- شکل ۴-۲: سلول های بار
۸۸
- شکل ۵-۲: دستگاه کشش یونیورسال جهت کالیبره نمودن سلول های بار
۸۸
- شکل ۶-۲: ایستگاه آزمایش برج نگپور [۷۴].
۹۰
- شکل ۷-۲: آزمایش برج ۲۲۰ کیلو ولت [۷۶].
۹۲
- شکل ۸-۲: ایستگاه ram، (الف) ایستگاه ram طولی، (ب) ایستگاه ram قائم [۷۶].
۹۴
- شکل ۹-۲: ایستگاه آزمایش L & T [۷۹].
۹۷
- شکل ۱۰-۲: اتاق کنترل، (الف) خارج اتاق کنترل، (ب) داخل اتاق کنترل [۷۹].
۹۸
- شکل ۱۱-۲: ایستگاه آزمایش برج اسپانیا [۷۴].
۱۰۲
- شکل ۱۲-۲: ایستگاه آزمایش برج چین، (الف) برج فولادی، (ب) ستون فولادی، (ج) آزمایش بارگذاری [۷۴].
۱۰۵
- شکل ۱۳-۲: ایستگاه آزمایش برج در ژاپن، شرکت AG آجیکاوا [۷۴].
۱۰۵
- شکل ۱۴-۲: ایستگاه آزمایش عربستان سعودی [۷۴].
۱۰۷
- شکل ۱۵-۲: وینچ‌های الکتریکی [۸۰].
۱۰۸
- شکل ۱۶-۲: اتاق کنترل [۸۰].
۱۰۹
- شکل ۱۷-۲: آزمایش بارگذاری [۸۰].
۱۰۹
- شکل ۱۸-۲: نمای آزمایشگاه سازه های انتقال و توزیع (اراک).....
۱۱۳
- شکل ۱۹-۲: بستر آزمون شماره ۱، ۲ و ۳.....
۱۱۴

- شکل ۲-۲۰: وینچهای اعمال نیرو ۱۱۵
- شکل ۲-۲۱: نمای روبروی اتاق وینچهای اعمال نیرو ۱۱۵
- شکل ۲-۲۲: آزمایش تیر طره [۸۷] ۱۱۸
- شکل ۲-۲۳: نمودار خزش [۸۴] ۱۱۹
- شکل ۲-۲۴: تسهیلات آزمایش خزش کششی [۸۴] ۱۲۰
- شکل ۲-۲۵: نماینده شماتیک دستگاه آزمایشگاهی خمشی خزش [۱۲۴] ۱۲۱
- شکل ۲-۲۶: دستگاه آزمایش خزش متداول [۱۲۴] ۱۲۱
- شکل ۲-۲۷: تسهیلات آزمایش کششی خزش [۸۴] ۱۲۲
- شکل ۲-۲۸: تنظیمات آزمایشگاهی برای آزمایش کشش تک‌محوری [۸۴] ۱۲۲
- شکل ۲-۲۹: قاب آزمایش جهت اعمال نیرو ۱۲۴
- شکل ۲-۳۰: سیستم هیدرولیک برای تولید نیرو ۱۲۴
- شکل ۲-۳۱: سلول بار جهت اندازه‌گیری نیرو ۱۲۴
- شکل ۲-۳۲: فک های آزمایش ۱۲۵
- شکل ۲-۳۳: هندسه عضو بازوی مرکب مورد بررسی [۱۳۶] ۱۲۶
- شکل ۲-۳۴: رفتار نیرو- کرنش میله FRP با گیره‌های فلزی [۱۳۶] ۱۲۷
- شکل ۲-۳۵: بازوی مرکب برای خط ۶۶ کیلوولتی [۱۳۶] ۱۲۸
- شکل ۲-۳۶: نمای بازوی مرکب متصل شده به بدنه برج [۱۳۶] ۱۲۹
- شکل ۲-۳۷: مدل اجزا محدود با شرایط مرزی و نیروها [۱۳۶] ۱۲۹
- شکل ۲-۳۸: نمای شماتیک کرنش‌سنج‌ها روی اعضای بازو حین آزمایش مکانیکی [۱۳۶] ۱۳۰
- شکل ۲-۳۹: نمای شماتیک آزمایش مکانیکی بازو [۱۳۶] ۱۳۰
- شکل ۲-۴۰: عکس بازو تحت آزمایش مکانیکی [۱۳۶] ۱۳۱
- شکل ۲-۴۱: نمودار آزمون ۳ نقطه ای ۱۳۲
- شکل ۲-۴۲: نمای برپایی آزمون سه نقطه‌ای، پیش از انجام آزمون ۱۳۳
- شکل ۲-۴۳: نمای آزمون سه نقطه‌ای، پس از انجام آزمون و گسیختگی طولی ۱۳۳
- شکل ۲-۴۴: نمای آزمون سه نقطه‌ای غیرمتقارن ۱۳۳
- شکل ۲-۴۵: آزمون کراس آرم به همراه یراق آلات، تحت بار غیر بلانس ۱۳۴
- شکل ۲-۴۶: برپایی آزمون کراس آرم به همراه یراق آلات، تحت بار غیر بلانس ۱۳۴
- شکل ۲-۴۷: انجام آزمون کراس آرم به همراه یراق آلات، تحت بار غیر بلانس و مود شکست مربوطه ۱۳۵
- شکل ۲-۴۸: آزمون کراس آرم تحت بار قائم ۱۳۵
- شکل ۲-۴۹: آزمون کراس آرم تحت بار جانبی ۱۳۵
- شکل ۲-۵۰: شکست یراق در آزمون بار قائم و جانبی کراس آرم ۱۳۶
- شکل ۲-۵۱: آزمون خمش سه نقطه برای دیواره کراس آرم ۱۳۶

- شکل ۲-۵۲ استفاده از پایش براساس لرزش پایه‌های توزیع، برای بررسی وضعیت پایه، [۱۴۲] ۱۳۷
- شکل ۲-۵۳ استفاده از گیرگاه بتنی با مقطع کاملاً مشابه به مقطع هشت وجهی پایه بتنی، و انجام آزمون مکانیکال، [۱۴۰] ۱۳۸
- شکل ۲-۵۴ نمای شماتیک استفاده از گیرگاه بتنی و قراردهی الوار جهت مهار پایه توزیع، [۱۴۱] ۱۳۸
- شکل ۲-۵۵ استفاده از گیرگاه بتنی و قراردهی الوار جهت مهار پایه توزیع، [۱۴۱] ۱۳۹
- شکل ۲-۵۶ نمای شماتیک استفاده از گیرگاه بتنی و قراردهی الوار به همراه جک جهت مهار پایه توزیع، [۱۴۱] ۱۳۹
- شکل ۲-۵۷ نحوه مهار پایه کامپوزیت در قاب فولادی با کمک بندهای بافته شده، و تعبیه گاری برای راس پایه، [۱۴۳] ۱۴۰
- شکل ۲-۵۸ آزمون کشیدن اتصالات پیچی متصل به پایه‌های کامپوزیت به منظور ارزیابی توانایی مصالح پایه کامپوزیت به نیروهای وارد شده از پیچها، [۱۴۳] ۱۴۰
- شکل ۳-۱. انرژیهای تجدیدپذیر ۱۴۱
- شکل ۳-۲. آزمون بارگذاری استاتیکی بر روی پره توربین بادی ۱۴۳
- شکل ۳-۳. ارزیابی خستگی پره توربین بادی ۱۴۳
- شکل ۳-۴. تجهیزات شماتیک آزمایشگاه ملی انرژیهای تجدیدپذیر ۱۴۴
- شکل ۳-۵. استفاده از حسگرهای انتشار صوتی نصب شده بر روی پره توربین بادی ۱۴۵
- شکل ۳-۶. حمل پره های توربین بادی از جنس الیاف شیشه و کربن به آزمایشگاه ۱۴۶
- شکل ۳-۷. نمایش شماتیک برپایی فیزیکی پره توربین بادی جهت انجام آزمون لنگر در انتها، میانه و ساق ابتدایی پره، و پاسخها حاصل از انجام آزمون فوق ۱۴۷
- شکل ۳-۸. نمایش شماتیک اجزای برپایی فیزیکی پره توربین بادی جهت انجام آزمون لنگر ۱۴۷
- شکل ۳-۹. رابط اتصال پره توربین بادی به گیرگاه با زاویه متغیر و نمایش اتصال کرنش سنج بر روی پره توربین بادی ۱۴۸
- شکل ۳-۱۰. نمای کلی از برپایی پره توربین بادی جهت انجام آزمون لنگر با اعمال نیرو توسط عملگر هیدرولیک در انتهای پره ۱۴۹
- شکل ۳-۱۱. دو روش متفاوت اتصال عملگر به پره توربین بادی، سمت راست روش اتصال زینی، و سمت چپ روش اتصال مستقیم ۱۴۹
- شکل ۳-۱۲. مهار متحرک در فاصله ۶ متری از تکیهگاه، اعمال نیرو در انتهای پره، و دستگاه همبسته ساز تصویر دیجیتال به منظور اندازهگیری میدان کرنش ۱۵۰
- شکل ۳-۱۳. چسباندن صفحات الگو جهت ثبت تصاویر دیجیتال ۱۵۱
- شکل ۳-۱۴. مرکز تحقیقاتی ناسا، مجموعه انجام آزمونهای آیرودینامیکی تمام مقیاس، [۱۴۴] ۱۵۳
- شکل ۳-۱۵. توربین بادی برپا شده در مقطع آزمون تونل باد ناسا، [۱۴۴] ۱۵۴
- شکل ۳-۱۶. لایه‌های مختلف یک پنل خورشیدی ۱۵۶

- شکل ۳-۱۷. خسارت ناشی از ضربه تگرگ بر روی صفحات سلولهای خورشیدی، ۱۵۷
- شکل ۳-۱۸. شامل آزمون مقاومت در مقابل پوسته شدن فیلم تدلار، [۱۴۵] ۱۵۸
- شکل ۳-۱۹. آزمون بیرون کشیده شدن کابل و جعبه اتصال، [۱۴۵] ۱۵۸
- شکل ۳-۲۰. تست پانچ بر روی شیشه ایمنی، [۱۴۵] ۱۵۹
- شکل ۳-۲۱. آزمون خمش ۴ نقطه‌ای، [۱۴۵] ۱۵۹
- شکل ۳-۲۲. سایت یک نیروگاه زمین گرمایی با استفاده از منابع آب داغ، در نزدیکی کالیفرنیا، [۱۴۶] ۱۶۰
- شکل ۳-۲۳. دستگاه آزمون سه محوری تحت فشار و دمای بالا به همراه نمای داخلی دستگاه، [۱۴۷] ۱۶۱
- شکل ۳-۲۴. نمایش استفاده از شمعهای انرژی در زیر یک مجتمع، [۱۴۸] ۱۶۲
- شکل ۳-۲۵. نمایش شماتیک ابزار نصب شده بر روی یک شمع انرژی جهت پایش آن، [۱۵۰] ۱۶۲
- شکل ۴-۱. نمونه مورد استفاده در دستگاه آزمون خستگی التراسونیک مدل USF-۲۰۰۰A از شرکت شیمادزو، [۱] ۱۶۴
- شکل ۴-۲. تاثیر استفاده از دستگاه آزمون خستگی التراسونیک در کاهش زمان آزمایش، [۱] ۱۶۴
- شکل ۴-۳. ابعاد دستگاه آزمون خستگی التراسونیک، [۱] ۱۶۵
- شکل ۴-۴. شکل عمومی یک فیبر نوری ۱۶۶
- شکل ۴-۵. دو ساختار از حسگرهای کرنش فیبر نوری تداخل سنج ۱۶۷
- شکل ۴-۶. نمونه ای از استفاده فیبر نوری بصورت مدفون در بتن ۱۶۷
- شکل ۴-۷. عملکرد حسگر فیبر توری براگ براساس نور بازتاب شده ۱۷۰
- شکل ۴-۸. سه مدل از حسگر کرنش توری براگ فیبری [۲] ۱۷۱
- شکل ۴-۹. قرارگیری تعداد بالای حسگر کرنش FBG، [۳] ۱۷۱
- شکل ۴-۱۰. حسگر شتاب توری براگ فیبری، [۳] ۱۷۲
- شکل ۴-۱۱. حسگر انحراف سنج توری براگ فیبری، [۳] ۱۷۲
- شکل ۴-۱۲. حسگر فشار توری براگ فیبری، [۳] ۱۷۳
- شکل ۴-۱۳. چند نمونه از حسگر جابجایی سنج FBG، با قابلیت حذف اثر دما، [۳] ۱۷۳
- شکل ۴-۱۴. الگوریتم روش اندازه‌گیری جابجایی براساس تصویر ۱۷۵
- شکل ۴-۱۵. کاربرد عملی روش اندازه‌گیری جابجایی بر روی یک پل، [۴] ۱۷۶
- شکل ۴-۱۶. ارتعاش سنج داپلر ۱۷۸
- شکل ۴-۱۷. ساختار حسگر جابجایی سنج لیزری ۱۷۹
- شکل ۴-۱۸. حسگر جابجایی سنج لیزری ۱۸۰
- شکل ۴-۱۹. ساختار کلی حسگرهای پیزوالکتریک ۱۸۱
- شکل ۴-۲۰. حسگرهای شتاب پیزوالکتریک برند کیستلر ۱۸۱
- شکل ۴-۲۱. حسگرهای کرنش پیزوالکتریک برند کیستلر ۱۸۲

- شکل ۴-۲۲ حسگرهای سلول بار نیروی برشی پیزوالکتریک برند کیستلر ۱۸۲
- شکل ۴-۲۳ حسگرهای سلول بار نیروی پیزوالکتریک برند کیستلر ۱۸۲
- شکل ۴-۲۴ حسگرهای مختلف پیزوالکتریک ۱۸۳
- شکل ۴-۲۵ استفاده از حسگر کرنش پیزوالکتریک جهت اندازه‌گیری کرنش تیر طره، [۶] ۱۸۴
- شکل ۴-۲۶ مفهوم کلی شبیه سازی ترکیبی آزمایشگاهی-عددی ۱۸۵
- شکل ۴-۲۷ نمونه‌ای از آزمون ترکیبی آزمایشگاهی-عددی بر روی دو اینزولاتور که توسط کابل هادی در پست برق به هم متصلند، [۷] ۱۸۶
- شکل ۴-۲۸ دستگاه آزمایش خزش بلند مدت مطابق با استاندارد ASTM E۱۳۹، [۸] ۱۸۸
- شکل ۴-۲۹ دستگاه آزمایش خزش بلند مدت، [۹] ۱۸۹
- شکل ۴-۳۰ شمای کلی عملکرد فناوری DIC در تعیین میدان کرنش [۱۰] ۱۹۱
- شکل ۴-۳۱ نمونه آزمون خمش ساده بر روی تیر I شکل و برداشت کرنش بخشی از تیر که روی تکیه‌گاه میباشد، [۱۰] ۱۹۲
- شکل ۴-۳۲ تشخیص میدان تنش در ناحیه مشخص شده از تیر، [۱۰] ۱۹۲
- شکل ۴-۳۳ عملکرد کلی حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک، [۱۱] ۱۹۴
- شکل ۴-۳۴ استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک بر روی بخش داخلی بتن پل صندوقهای، [۱۲] ۱۹۵
- شکل ۴-۳۵ استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک بر روی کابل‌های پست‌نیدگی، [۱۲] ۱۹۵
- شکل ۴-۳۶ مرکز تحقیقاتی ناسا، مجموعه انجام آزمونهای آیرودینامیکی تمام مقیاس ۱۹۷
- شکل ۶-۱ برج مشبک ۲۳۰ کیلوولت چهار مداره ۲۰۷
- شکل ۶-۲ برج تلسکوپی ۱۳۲ کیلوولت دو مداره ۲۰۷
- شکل ۶-۳ برج تلسکوپی بتنی ۶۴ کیلوولت چهار مداره ۲۰۹
- شکل ۶-۴ پایه ۱۲ متری توزیع نیرو چدنی ۲۱۰
- شکل ۶-۵ آزمون مکانیکال مقره‌های انتقال نیرو ۲۱۱
- شکل ۶-۶ آزمون نوعی برج مخابراتی ۲۱۲
- شکل ۶-۷ تاور کرین ۸۵*۲۰ پتن و برجهای کمکی طولی و عرضی ۲۱۳
- شکل ۶-۸ برج کمکی عرضی ۲۱۴
- شکل ۶-۹ دستگاه کشش یونیورسال ۲۱۵
- شکل ۶-۱۰ اتاق وینچهای اعمال نیرو ۲۱۶
- شکل ۶-۱۱ اتاق کنترل ۲۱۷
- شکل ۶-۱۲ سلول های بار ۲۱۸
- شکل ۶-۱۳ بستر آزمون شماره ۱، ۲ و ۳ ۲۱۹
- شکل ۷-۱ اتاق وینچها و ریلها و انکرهای موجود ۲۲۳

- شکل ۲-۷ کابل‌های اعمال نیرو هدایت شده از ریل‌ها و انکرها به برج‌های کمکی ۲۲۴
- شکل ۳-۷ طرح پیشنهادی در خصوص افزایش ظرفیت ریل‌های موجود در جلوی اتاق وینچ‌ها ۲۲۴
- شکل ۴-۷ رابط نصب بستر آزمون شماره ۳ ۲۲۵
- شکل ۵-۷ مثال آزمون خمش سه نقطه‌ای کراس آرم کامپوزیت ۲۲۶

فهرست جداول

جدول ۱-۱	مشخصات دو حسگر پیزوالکتریک و حسگر خازنی بیسیم [25]	۴۴
جدول ۲-۱	ویژگی‌های فنی دستگاه SRMD [۶۲]	۶۳
جدول ۳-۱	خلاصه ویژگی‌های طراحی تکیه‌گاه‌های جداسازی لرزه‌ای [۵۵]	۷۷
جدول ۱-۲	ایستگاه‌های آزمایش دیگر متعلق به شرکت KEC [۷۳]	۹۱
جدول ۲-۲	اطلاعات فنی ایستگاه L & T [۷۹]	۹۹
جدول ۳-۲	ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آزمایش برزیل [۷۴]	۱۰۰
جدول ۴-۲	ویژگی‌های ایستگاه آزمایش متعلق به KEC [۷۳]	۱۰۰
جدول ۵-۲	ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آزمایش اسپانیا [۷۴]	۱۰۲
جدول ۶-۲	ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آزمایش چین [۷۴]	۱۰۳
جدول ۷-۲	ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه ژاپن [۷۴]	۱۰۶
جدول ۸-۲	ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه عربستان سعودی [۷۴]	۱۰۷
جدول ۹-۲	ویژگی‌های فنی ایستگاه آزمایش الکترومونتاز [۸۰]	۱۱۰
جدول ۱۰-۲	ابعاد و ظرفیت تسهیلات آزمایش [۷۹]	۱۱۱
جدول ۱۱-۲	ویژگی‌های مواد مقاطع FRP [۱۳۶]	۱۲۶
جدول ۱-۳	بزرگترین تونل‌های باد دنیا، [۱۴۴]	۱۵۵
جدول ۴-۱	مشخصات تجهیزات برای اندازه‌گیری جابجایی در یک آزمون آزمایشگاهی، [۵]	۱۷۶
جدول ۱-۵	شاخصه‌های فنی و وزن هر یک از شاخصه‌های فنی	۱۹۹
جدول ۲-۵	شاخصه‌های کاربردی اجرایی و وزن هر یک از شاخصه‌های اجرایی	۱۹۹
جدول ۳-۵	شاخصه‌های اقتصادی و وزن هر یک از شاخصه‌های اقتصادی	۲۰۰
جدول ۴-۵	امتیاز دهی به شاخصه‌های فنی هر یک از فناوری‌های معرفی شده	۲۰۱
جدول ۵-۵	امتیاز دهی به زیر شاخصه‌های کاربردی و اجرایی هر یک از فناوری‌های معرفی شده	۲۰۲
جدول ۶-۵	امتیاز دهی به زیر شاخصه‌های اقتصادی برای هر یک از فناوری‌های معرفی شده	۲۰۳
جدول ۷-۵	الویت بندی فناوری‌ها براساس مجمع امتیازهای فنی، کاربردی-اجرایی و اقتصادی	۲۰۴

مقدمه:

سازه‌های صنعت برق گستره وسیعی از سازه‌های مختلف نیروگاهی، انتقال و توزیع می‌باشند، که بسیاری از آنها در حوزه سازه‌های بزرگ مقیاس قرار دارند. نقص و خرابی هر یک از این سازه‌ها هزینه‌های هنگفت انسانی، زیست محیطی و اقتصادی را دربر خواهد داشت. به همین جهت و از دیدگاه توسعه پایدار سطح عملکرد و قابلیت اطمینانی که هر یک از این سازه‌ها تأمین خواهند کرد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. این موضع سبب شده است تا توجه ویژه‌ای به روش‌های آزمایشگاهی مختلف جهت ارزیابی عملکردی سازه‌های صنعت برق گردد؛ چرا که استفاده از این روش‌ها سبب افزایش قابلیت اطمینان سازه‌های صنعت برق و در عین حال بهینه شدن هزینه‌های تولید، نگهداری و افزایش عمر آنها می‌گردد.

روش‌های ارزیابی عملکرد سازه‌ها بطور کلی به سه دسته اصلی تقسیم می‌گردد: روش‌های عددی، روش‌های مبتنی بر آزمایش و روش‌های ترکیبی (و یا اصطلاحاً هیبرید). با استفاده از این روش‌ها و یا ترکیب آنها می‌توان عملکرد سازه‌های صنعت برق را تحت انواع مختلف الگوهای بارگذاری آیین نامه‌ای و یا بارهای نهایی مورد بررسی قرار داد.

در این پژوهش، به شناسایی و بررسی انواع روش‌ها و فناوری‌های نوین جهت ارزیابی عملکرد سازه‌ها، بخصوص سازه‌های صنعت برق، پرداخته خواهد شد. در این راستا با مطالعه و گردآوری ادبیات فنی، سوابق موضوعی و فناوری‌های روز جهان در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق مورد شناسایی و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت فهرستی از فناوری‌های نوین در ارزیابی عملکردی سازه‌های صنعت برق به همراه مزایا، معایب و محدودیت‌های استفاده از آنها و روش‌های توسعه‌ی بکارگیری آنها ارائه می‌شود. همچنین، فهرست طرح‌ها و پروژه‌های مرتبط با به کارگیری این فناوری‌ها در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق به منظور افزایش دقت و گستره ارزیابی‌های عملکرد سازه‌های صنعت برق، ارائه می‌شود. فناوری‌های نوین بیان شده از لحاظ فنی و اقتصادی و گستردگی استفاده آن برای ارزیابی سازه‌های صنعت برق در هر یک از حوزه‌های تولید، انتقال و توزیع مورد بررسی قرار می‌گیرد، بر اساس بررسی‌های انجام شده اولویت‌بندی هر یک از فناوری‌های بیان شده با استفاده از شاخصه‌های هر فناوری صورت می‌پذیرد. سپس شرایط حال حاضر آزمایشگاه اراک و پتانسیل‌های موجود در آن بطور دقیق بررسی می‌گردد و همچنین به همراه آن با استفاده از دانش کسب شده در فصل‌های قبلی و گزارش وضع موجود آزمایشگاه رویکردهای پیشنهادی برای ارتقاء بهره‌وری آزمایشگاه اراک ارائه می‌گردد.

براساس روند بیان شده مروری بر فصل‌های این گزارش خواهیم داشت: در فصل اول این گزارش به معرفی فناوری‌های نوین آزمایشگاهی که در حال حاضر بصورت کاربردی در دنیا از آنها برای ارزیابی عملکرد سازه‌ها استفاده می‌گردد پرداخته می‌شود، و سپس در فصل دوم گزارش به معرفی آزمایشگاه‌های سازه‌های انتقال دنیا پرداخته می‌شود و پس از آن در همین فصل برخی از آزمون‌های شاخص در زمینه اجزای سازه‌های انتقال و توزیع

نیرو که در حال حاضر در دنیا صورت می‌پذیرد ارائه می‌گردد، در نهایت در فصل سوم این گزارش با توجه به رویکرد دنیا در استفاده بیش از پیش از انرژی‌های تجدیدپذیر به معرفی یکی از بزرگترین آزمایشگاه‌های دنیا در این حوزه پرداخته شده است و پس از آن در همین فصل به معرفی بزرگترین تونل باد دنیا ارائه می‌گردد.

در فصل چهارم این گزارش به بیان ویژگی‌های فنی و اقتصادی هر یک از فناوری‌ها پرداخته می‌شود، و سپس در فصل پنجم گزارش اولویت بندی فناوری‌های بیان شده در این گزارش انجام می‌گردد، که با اختصاص شاخص‌های مختلف و وزن دهی به آن‌ها اولویت هر یک از فناوری‌ها تعیین می‌گردد.

در فصل ششم گزارش شرایط حال حاضر آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک مورد بررسی قرار می‌گیرد و تمامی امکانات موجود و آزمون‌هایی که در آن به انجام می‌رسد در این فصل ارائه می‌گردد و سپس در فصل هفتم گزارش رویکردهایی که سبب بهبود بهره‌وری آزمایشگاه از لحاظ فنی و مطالعاتی می‌گردد براساس دانش کسب شده ارائه می‌شود.

فصل اول

مطالعه ادبیات فنی موجود در راستای شناسایی فناوری‌های نوین جهت ارزیابی عملکرد سازه‌های

صنعت برق

مقدمه فصل اول:

اکثر سازه‌های عمرانی، سازه‌هایی با هزینه ساخت بالا و ارزش عملکردی ویژه می‌باشند، و بسیاری از این سازه‌ها بخشی از یک شریان حیاتی هستند و ارزش عملکردی آن‌ها جهت حفظ حیات آن شریان بسیار بالاتر از هزینه ساخت آن سازه است. از این رو ارزیابی عملکرد سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با وجود روش‌های پیشرفته تحلیل و طراحی باز هم بخشی مهمی از رفتار اینگونه سازه‌ها قابل شناسایی نیست، به همین سبب استفاده از آزمون‌های استاندارد می‌تواند به عنوان روشی مطمئن جهت ارزیابی عملکرد سازه‌ها مورد استفاده واقع گردد. در این بخش با بررسی سوابق موضوعی در رابطه با فناوری‌های آزمایشگاهی و آزمایشگاه‌های مختلف، فناوری‌های نوین ارزیابی عملکرد سازه‌ها بیان می‌گردد، تمامی روش‌ها و ابزار و فناوری‌هایی که معرفی می‌گردند فناوری‌هایی است که قابلیت استفاده به صورت فراگیر دارند.

فناوری‌های بیان شده در واقع فناوری‌هایی جهت افزایش اطمینان از عملکرد سازه‌ها می‌باشند که شامل شناسایی رفتار مصالح و سازه می‌باشند که در ادامه به آن می‌پردازیم.

۱-۱ بررسی ادبیات فنی و سوابق موضوعی در رابطه با فناوری‌های نوین آزمایشگاهی جهت ارزیابی عملکرد سازه‌ها

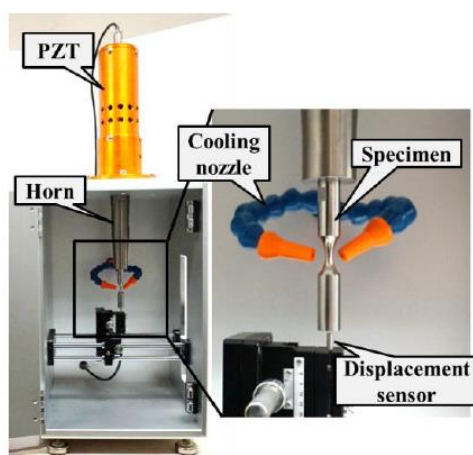
شناخت دقیق رفتار مصالح یکی از مهمترین پارامترها در ارزیابی رفتار سازه‌ها می‌باشد، از این رو برای دستیابی به یک عملکرد مناسب در سازه‌ها شناسایی رفتار مصالح بوسیله ارزیابی و آزمون‌های حین تولید مصالح بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر کیفیت ابتدایی مصالح که باید مورد آزمون واقع گردد عملکرد مصالح در دراز مدت و در سیکل‌ها طولانی محیطی و رفتاری از لحاظ دوام و خستگی باید مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. در ادامه به برخی از فناوری‌های نوینی که جهت ارزیابی مصالح از هنگام تولید تا زمان بهره‌برداری مورد توجه قراردارند اشاره می‌گردد، در این بررسی به حسگرها به دلیل کاربرد گسترده آن‌ها در ارزیابی عملکرد سازه‌ها و روش‌های متفاوت اندازه‌گیری نیز پرداخته می‌شود.

یکی از مهمترین رفتارهایی که مصالح در سیکل‌های بالای بهره‌برداری از خود نشان می‌دهند بحث خستگی می‌باشد که فناوری‌های نوین شناسایی این رفتار را در مصالح آسان نموده که به آن پرداخته خواهد شد.

در خصوص سازه‌ها نیز که با تلفیق هندسه و مصالح رفتاری پیچیده از خود نشان می‌دهند که گاهی روش‌های آزمایشگاهی با توجه به اندازه سازه بسیار هزینه‌بردار و غیر ممکن است که فناوریهای نوین آزمایشگاهی امکان ارزیابی عملکرد سازه‌های پیچیده را با روش‌های ترکیبی عددی آزمایشگاهی فراهم می‌آورد که به مثالهایی از این فناوری در این بخش بیان می‌گردد.

۱-۱-۱ آزمایش خستگی دینامیکی^۱

بتن به طور افزایشی در سازه‌های تحت بارگذاری دینامیکی استفاده می‌شود. بارهای چرخه‌ای می‌توانند باعث خستگی در باری کمتر از مقاومت استاتیکی مواد شوند. از این رو، فهم رفتار خستگی بتن در طول عمر آن نیاز است. از طرفی، گسترش صنعت منجر به افزایش نیاز به اعضا و قسمت‌های جوش شده که از فولاد مقاومت بالا ساخته شده‌اند، با طول عمر بهره‌برداری طولانی‌تر می‌شود. بنابراین آزمایش رفتار خستگی پر چرخه^۲ نیاز است و مقدار استاندارد قابل قبول برای طول عمر بهره‌برداری از 10^7 به 10^9 (۱ گیگا چرخه) افزایش یافته است. همچنین افزایش سرعت آزمایش ضروری است، شکل ۱-۱. معمولاً یک ماشین آزمایش خستگی هیدرولیکی در دامنه تقریبی ۲ الی ۱۵ هرتز کار می‌کند در حالی که دستگاه آزمایش خستگی الکترو-نیرو و خمشی دوار در دامنه تقریبی ۵۰ الی ۳۰۰ هرتز آزمایش می‌کند. تجهیزات آزمایش خستگی اولتراسونیک با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱-۱ دستگاه آزمایش خستگی اولتراسونیک [۱].

در آزمایش خستگی اولتراسونیک نمونه‌ها برای ارتعاش تشدید، به جای قرار گرفتن تحت تنش ناشی از نیروی خارجی، شبیه‌سازی می‌شوند. هر دو انتها نمونه در جهت مخالف نوسان می‌کنند و یک نود^۳ ارتعاش در مرکز شکل می‌گیرد. دامنه کرنش چرخه‌ای به مقدار حداکثر خود می‌رسد و می‌تواند باعث معضل خستگی، یعنی شروع ترک‌ها و گسترش آن‌ها تا شکست، شود. فرکانس چرخه حدود ۲۰ کیلوهرتز است که باعث کاهش چشمگیر زمان آزمایش در مقایسه با شیوه‌های قدیمی آزمایش خستگی با فرکانس زیر ۱۰۰ هرتز می‌شود [۲].

با شیوه آزمایش التراسونیک می‌توان آزمایش خستگی برای بتن انجام داد. این آزمایش می‌تواند به صورت چرخه کششی-فشاری یا چرخه کششی انجام شود در حالی که بتن در طول عمر بهره‌برداری خود تحت بارگذاری فشاری

¹ Dynamic Fatigue Test

² high-cycle fatigue behavior

³ Node: A node is a point along a [standing wave](#) where the wave has minimum [amplitude](#).

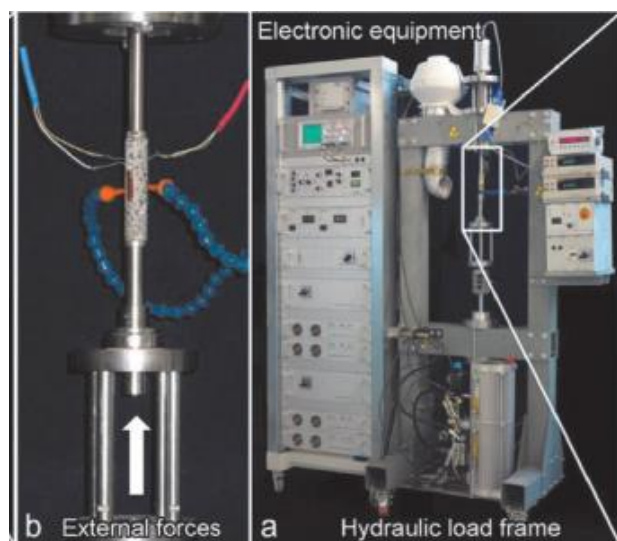
است. در روشی جدید، می‌توان آزمایش التراسونیک فشاری چرخه‌ای انجام داد و رفتار خستگی بتن را با تحلیل ویژگی‌های ارتعاشی نمونه دیده‌بانی کرد. شیوه انجام این آزمایش در زیر آمده است [۲].

با شیوه آزمایش خستگی اولتراسونیک می‌توان طول عمر، شروع ترک خوردگی و انتشار آن را در نمونه بتنی بررسی کرد. تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش فشاری چرخه‌ای بتن در شکل ۱-۲ قسمت الف نشان داده شده است که شامل تجهیزات الکترونیکی و یک قاب بارگذاری هیدرولیکی می‌شود. اجزا الکترونیکی شامل ژنراتور^۱ آزمایش اولتراسونیک، تقویت‌کننده قدرت اولتراسونیک، کرنش‌سنج و یک اسیلوسکوپ^۲ می‌شود. ژنراتور دامنه ارتعاش نمونه را تعیین و کنترل می‌کند. از آن جا که دامنه کرنش در مرکز نمونه و دامنه ارتعاش در آنتی ند^۳ متناسب هستند، انتخاب مقدار دامنه ارتعاش، کرنش در مرکز نمونه را تعیین می‌کند. دامنه ارتعاش در یک آنتی ند با یک گیج سنجیده می‌شود و با مقایسه سیگنال گیج و دامنه از پیش انتخاب شده کنترل می‌شود. این اختلاف در یک کنترل حلقه بسته پردازش می‌شود. بارگذاری نمونه به صورت یک دنباله پالس-مکث است و پیوسته نیست. طول پالس (معمولاً ۲۰۰ میلی ثانیه) و طول قطع (معمولاً ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی ثانیه) طوری انتخاب می‌شود که نمونه‌ها بیش از حد گرم نشوند. به علاوه، ژنراتور فرکانس تحریک را کنترل می‌کند. آسیب داخلی به عنوان نتیجه آزمایش خستگی باعث کاهش فرکانس تشدید نمونه می‌شود. کنترل فرکانس برای حفظ فرکانس تحریک در فرکانس تشدید واقعی است. سیگنال توان الکتریکی برای هدایت آزمایش‌ها توسط تقویت‌کننده اولتراسونیک فراهم می‌شود. کرنش‌سنج دامنه کرنش را می‌سنجد و اسیلوسکوپ سیگنال‌های مختلف از قبیل سیگنال ارتعاش، سیگنال‌های سنجش کرنش و سیگنال‌های توان را نمایش می‌دهد. قاب بارگذاری هیدرولیکی (شکل ۱-۲ قسمت ب) نیروهای فشاری استاتیکی در ارتعاش تشدید فرکانس بالا بر روی نمونه بتن قرار می‌دهد. هر جزء بیشترین دامنه جابه جایی را (آنتی ند) در انتها و جابه جایی ۰ را (ند) در مرکز نشان می‌دهد. تجهیزات بارگذاری شامل یک مبدل اولتراسونیک می‌شود که ارتعاش محوری فرکانس بالا تولید می‌کند. آن به یک میله استوانه‌ای به طول نصف طول موج تشدید ضمیمه شده است. یک لوله مخروطی به این میله استوانه‌ای وصل شده است و دامنه ارتعاش را افزایش می‌دهد. یک گیج ارتعاش دامنه ارتعاش را در انتها پایین لوله مخروطی می‌سنجد. دو نازل در شکل ۱-۲ قسمت ب در هر دو طرف بتن دیده می‌شوند که وظیفه خنک کردن را بر عهده دارند. دو کرنش‌سنج به ناحیه مرکز نمونه برای اندازه‌گیری کرنش‌های چرخه‌ای و استاتیکی وصل شده‌اند. میله‌هایی به هر دو انتها نمونه وصل شده‌اند. میله بالایی نمونه بتنی را از گیج ارتعاش جابه‌جا می‌کند. در غیر این صورت، در صورت خرابی فاجعه‌آمیز قطعات نمونه شکسته شده ممکن است به گیج آسیب برساند. نیروی فشاری استاتیکی به مرکز میله پایینی وارد می‌شود. در این گره ارتعاش، میله دارای تحذب است. یک تکیه‌گاه لغزشی یک نیروی فشاری را که از جمع آثار قوا لنگرهای خمشی ناخواسته جلوگیری می‌کند، اعمال می‌کند [۲].

¹ generator

² oscilloscope

³ anti-node: a point where the amplitude of the standing wave is at maximum.



(الف) (ب)

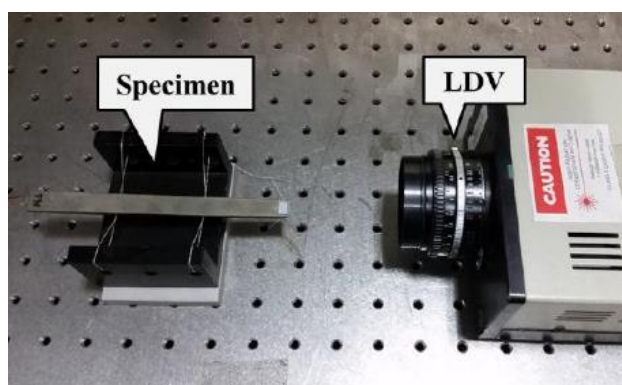
شکل ۱-۲ تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش فشاری چرخه‌ای بتن [۲].

گسیختگی نمونه می‌تواند به آسانی در آزمایش خستگی اولتراسونیک کشش-کشش یا فشار مشخص شود. تعداد چرخه‌ها تا شکست نمونه می‌تواند طول عمر خستگی را مشخص کند ولی این تعریف قابل اعمال برای آزمایش فشاری چرخه‌ای اولتراسونیک بتن نیست. آسیب خستگی در بتن شکل‌گیری ترک‌های جدید و رشد ترک‌های قبلی است. ترک‌ها باعث بدتر شدن خواص ارتعاشی نمونه‌های بتنی می‌شوند. از آن جا که آزمایش‌های اولتراسونیک جابه‌جایی کنترل هستند و دامنه کرنش و جابه‌جایی متناسب هستند، دامنه کرنش حین آزمایش ثابت نگه داشته می‌شود. اما، به دلیل شکل‌گیری و رشد ترک، دامنه تنش کاهش می‌یابد (سختی کاهش می‌یابد). از این‌رو، نمونه با شروع و انتشار ترک‌های خستگی شکسته نمی‌شود و یک ضابطه گسیختگی متفاوت برای مشخص کردن طول عمر در این آزمایش نیاز است. افزایش تعداد و طول ترک‌های خستگی در نمونه‌ها منجر به تغییر ویژگی‌های تشدید آن‌ها می‌شود که این ویژگی‌ها قابل تشخیص و اندازه‌گیری هستند. فرکانس تشدید به عنوان یک معیار برای مطابقت نمونه استفاده می‌شود. به مرور فرکانس تشدید نمونه کاهش می‌یابد و با مقایسه آن با فرکانس تشدید نمونه دست نخورده به ارزیابی آسیب خستگی پرداخته می‌شود. به علاوه، فرکانس تشدید به عنوان یک معیار برای گسیختگی نمونه است. اگر فرکانس تشدید ۱۵۰ هرتز از مقدار اولیه کاهش یابد فرض می‌شود نمونه گسیخته شده است. از طرفی، میرایی بیشتر ماده، به علت شکل‌گیری ترک‌ها، باعث افزایش توان اولتراسونیک مورد نیاز برای تشدید نمونه می‌شود. دامنه ارتعاش در ابتدا پالس افزایش می‌یابد. بعد از پایان پالس دامنه ارتعاش کاهش می‌یابد. افزایش دامنه ارتعاش تا مقدار انتخاب شده آرام‌تر است و زوال بعد از پایان پالس سریع‌تر است [۲].

در آزمایش خستگی برای ارزیابی طراحی نمونه‌های فولادی مورد آزمایش می‌توان از تحلیل اجزاء محدود روی مد تشدید آزاد بهره برد. مقدار دقیق مدول یانگ دینامیکی نمونه‌های آزمایش جهت اطمینان از فرکانس تشدید لازم است. همچنین این مقدار برای محاسبه نیروی مناسب اعمالی حین آزمایش خستگی نیاز است. شکل ۱-۳ تجهیزات آزمایشگاهی برای سنجش مدول یانگ دینامیکی را نشان می‌دهد. فرکانس تشدید نمونه با استفاده از یک عضو

پیزوالکتریک، یک لرزه‌سنج داپلر لیزر^۱ (LDV) و یک تحلیل‌گر سیگنال دیجیتالی^۲ (DSA) مطابق زیر قابل حصول است [۱]:

- (۱) نمونه‌ها برای حرکت آزاد آویزان می‌شوند.
 - (۲) عضو پیزوالکتریک به همراه موم برای ایجاد فرکانس تحریک در انتها نمونه قرار داده می‌شوند.
 - (۳) جابه‌جایی با استفاده از LDV در انتها دیگر نمونه سنجیده می‌شود.
 - (۴) فرکانس تشدید با تحلیل فرکانس تحریک و جابه‌جایی به وسیله DSA سنجیده می‌شود.
- با استفاده از فرکانس تشدید به دست آمده مدول یانگ دینامیکی قابل محاسبه است [۱].



شکل ۱-۳ سنجش مدول یانگ دینامیکی [۱].

۲-۱-۱ حسگر

حسگر وسیله‌ای است که می‌تواند وقایع مشاهده شده در محیط و تغییرات را تحلیل کند و خروجی متناظر با آن را فراهم کند. معمولاً خروجی حسگرها سیگنال‌های نوری یا الکتریکی هستند. یک حسگر مقاوم در واقع غیرحساس به هر ویژگی غیر مرتبط که در طول کاربرتش با آن مواجه می‌شود است، و تنها نسبت به تغییرات ویژگی اصلی که برای آن طراحی شده حساس می‌باشد [۳].

۱-۲-۱-۱ حسگر فیبر نوری^۳ (OFS)

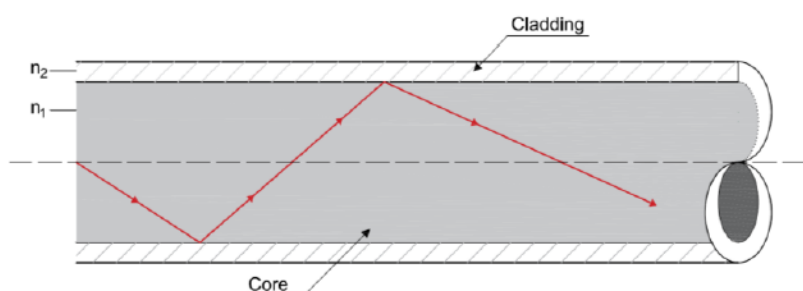
به طور ساده، یک فیبر نوری یک ساختار متقارن استوانه‌ای است که از یک هسته مرکزی با قطر بین ۴ تا ۶۰۰ میکرومتر و یک شاخص انعکاس یکنواخت ساخته می‌شود. سپس به وسیله یک غلاف با شاخص انعکاس کمتر پوشانده می‌شود (شکل ۱-۴). فیبر نوری به طور پیوسته در معرض اغتشاشات خارجی است از این رو دچار تغییرات نوری و هندسی می‌شود. در سنجش فیبر نوری، پاسخ به تحریکات خارجی عمداً بالا برده شده است. تغییر برخی از ویژگی‌های نور هدایت شده می‌تواند داخل یا خارج فیبر نوری ایجاد شود. حسگرهای فیبر نوری می‌توانند

¹ laser Doppler vibrometer, (LVD)

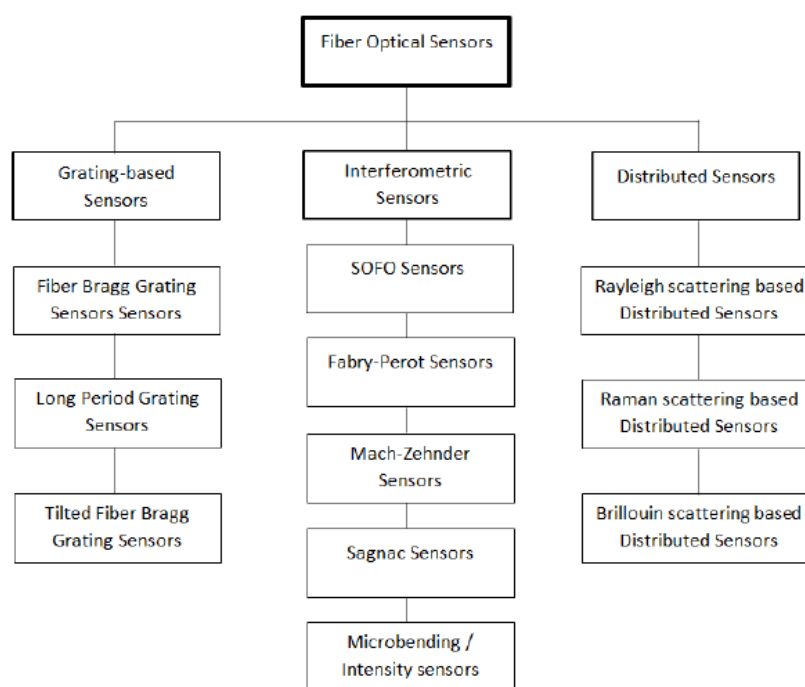
² digital signal analyzer, (DSA)

³ optical fiber sensors, (OFS)

به سه دسته مختلف تقسیم شوند: حسگرهای تداخل سنج، حسگرهای مبنی بر توری و حسگرهای توزیع شده (شکل ۱-۵) [۳].



شکل ۱-۴ هدایت و بازتاب نور در یک فیبر نوری [۳].



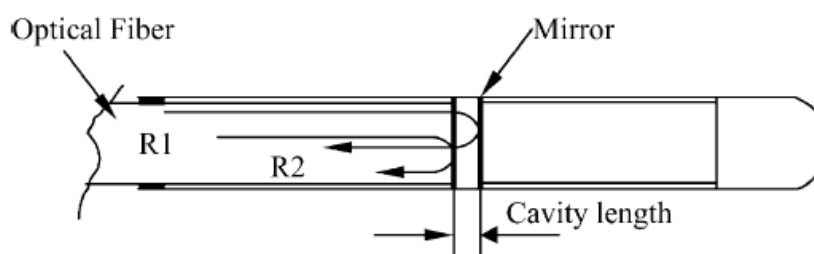
شکل ۱-۵ بررسی اجمالی تکنولوژی حسگر فیبر نوری [۳].

۱-۲-۲ حسگر تداخل سنج^۱

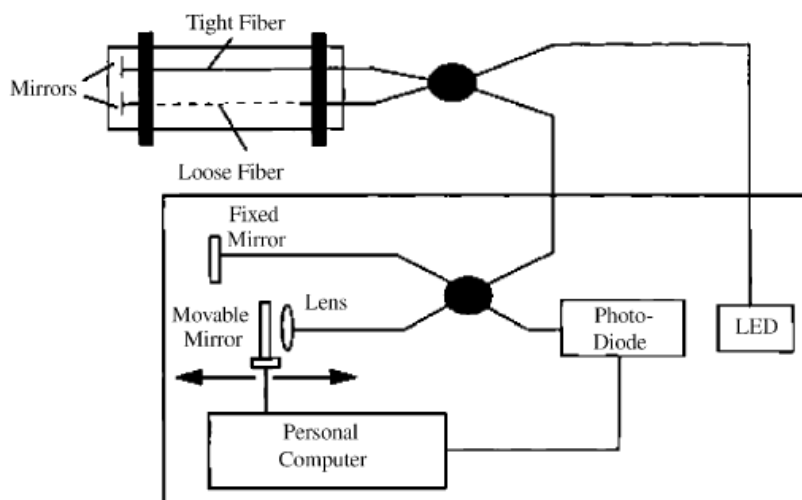
خیلی از حسگرهای مبنی بر چگالی، مانند حسگرهای میکروبانده، و بیشتر *OFS* تداخل سنج حسگرهای موضعی هستند که می‌توانند تغییرات در نقاط موضعی مشخص یک سازه را بسنجند. *OFS* تداخل سنج رایج‌ترین حسگرهای موضعی استفاده شده هستند زیرا بهترین حساسیت را دارند. این شیوه سنجش بر پایه شناسایی تغییر فاز نوری القا شده در نور به دلیل انتشار آن در طول فیبر نوری است. نور از یک منبع به طور یکسان به دو مسیر تقسیم می‌شود

¹ Interferometric

که یکی مسیر مرجع است. دسته نور دوباره ترکیب می‌شود تا اختلاف فاز نوری بین دو دسته نور حاصل شود. رایج‌ترین شکل‌گیری چنین حسگرهای تداخل‌سنجی *Michelson, Zehnder-Mach* و *Fabry-Perot (F-P)* هستند. در میان آن‌ها، *P-F* و *OFS* گیج طولانی^۱ دو نوع از حسگرهای موضعی هستند که به طور رایج در مهندسی عمران استفاده می‌شوند. *P-F* (شکل ۶-۱) بر مبنای اصول همبستگی متقاطع نور سفید است و علاوه بر توانایی سنجش کرنش، می‌تواند فشار، جابه‌جایی و دما را نیز اندازه‌گیری کند. *LGOFS* بر مبنای دو تداخل‌سنج *Michelson* (شکل ۷-۱). هر دو حسگر میانگین کرنش بین دو نقطه ثابت در امتداد گیج را با جبران دما می‌سنجند. طول حسگرهای گیج طولانی بین ۰/۲ تا ۵۰ متر است [۴].



شکل ۶-۱: حسگر کرنش فیبر نوری *P-F* [۴].



شکل ۷-۱: حسگر کرنش فیبر نوری گیج طولانی [۴].

۱-۲-۳ حسگر توری براگ فیبری^۲ (FBG)

با استفاده از *FBG* می‌توان تغییر حساسیت دما، کرنش/ جابه‌جایی، شیب، شتاب، فشار، میدان مغناطیسی و دوران را پایش نمود [۵].

تغییر حساسیت دمایی:

¹ Long gage *OFS*, (*LGOFS*)

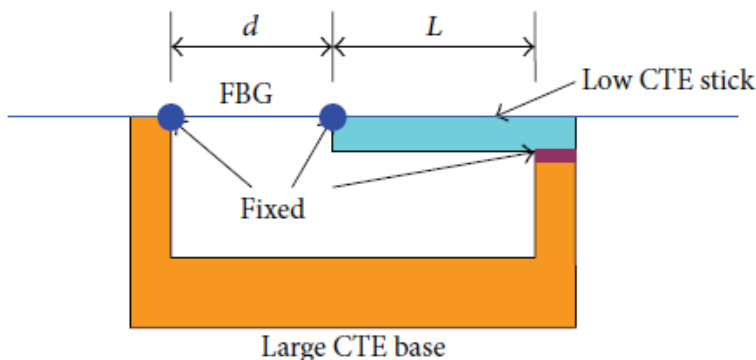
² Fiber Bragg Grating, (*FBG*)

روش اتصال به پایه با ضریب انبساط حرارتی بالا^۱: جهت افزایش حساسیت دمایی، ابتدا یک *FBG* را به یک پایه با *CTE* بالا مطابق شکل ۸-۱ وصل می‌کنند. زمانی که دما تغییر می‌کند، کرنش *FBG* به اندازه پایه با *CTE* بالا تغییر می‌کند. پس *FBG* به دما حساس‌تر می‌شود [۵].



شکل ۸-۱ روش اتصال به پایه با *CTE* بالا [۵].

روش دو فلزی اولیه^۲: به هر حال، حساسیت به دست آمده در روش بالا با *CTE* پایه محدود شده است. روش دو فلزی برای غلبه بر این محدودیت معرفی شده است (شکل ۹-۱). یک دسته با *CTE* کم به پایه با *CTE* بالا متصل می‌شود. با تغییر دما، تغییر طول پایه به *FBG* منتقل می‌شود. برای تخمین تغییر طول *FBG*، تغییر طول کوچک دسته با *CTE* پایین می‌تواند صرف نظر شود. تغییر طول *FBG* فقط متأثر از *CTE* پایه نیست و حساسیت به دمای محیط هم می‌تواند تأثیر گذار باشد [۵].



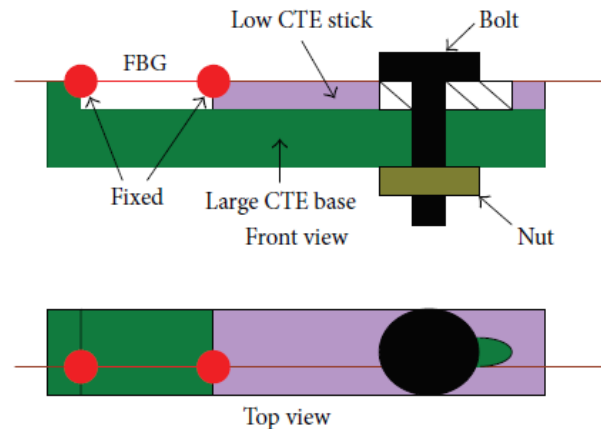
شکل ۹-۱ روش دو فلزی [۵].

روش دو فلزی با دامنه سنجش قابل تنظیم^۳: برای استفاده کامل از دامنه محدود تغییر کرنش *FBG* برای به دست آوردن بالاترین حساسیت ممکن برای پایش دمای بالا، *FBG* باید در دمای اتاق استراحت کند (شکل ۱۰-۱). شکل ۱۰-۱ مکانیزم این روش را نشان می‌دهد. دسته با *CTE* کم یک شکاف دارد. با تنظیم موقعیت این دسته، *FBG* می‌تواند برای یک طول مشخص پیش آزاد شود طوری که شروع به منبسط شدن در حد پایین می‌کند. با طراحی مناسب این حساسیت، کرنش *FBG* می‌تواند به طور کامل استفاده شود [۵].

1 Large _ Coefficient of Thermal Expansion (*CTE*) - Base Bonding Method

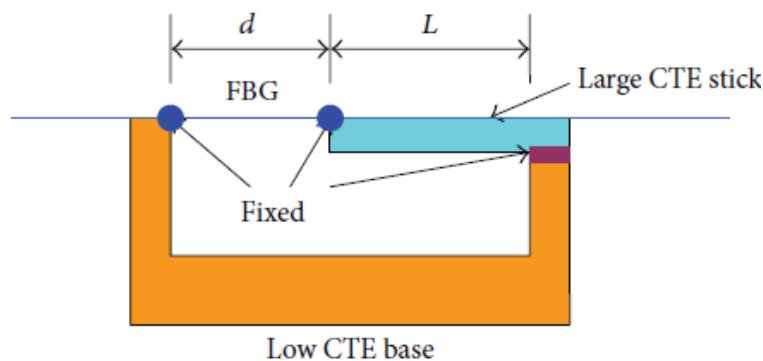
2 Initial Bimetal Method

3 Bimetal Method with Adjustable Measurement Range



شکل 10-1 روش دو فلزی با دامنه سنجش قابل تنظیم [۵].

روش دو فلزی برای پایش دما پایین^۱: به هر حال، فقط روش اتصال به پایه با CTE بالا برای پایش دمای برودتی استفاده شده است، به این دلیل که روش دو فلزی اولیه با کاهش دما و نه کشش FBG ، آن را آزاد می‌کند. یک حسگر FBG دو فلزی با ضریب دمای منفی برای به دست آوردن حساسیت محیط در دمای پایین با تغییر موقعیت دو فلز (شکل 11-1) پیشنهاد شده است. زمانی که دما کم شود، FBG کشیده خواهد شد و حساسیت محیط به دست خواهد آمد [۵].



شکل 11-1 روش دو فلزی برای پایش دما پایین [۵].

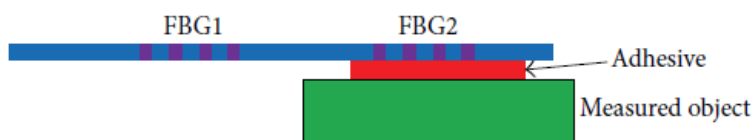
روش دو فلزی برای جبران دما^۲: برای حذف تاثیر دما، کرنش یک FBG می‌تواند تغییر داده شود. با استفاده از روش‌های دو فلزی بیان شده در بالا، برای صفر کردن حساسیت دما، وسایل مستقل از دما می‌توانند حاصل شوند [۵].

سنجش کرنش / جابه جایی: در سنجش کرنش / جابه جایی، کرنش و دما در بسیاری از کاربردها شبه استاتیکی هستند و کرنش باید از دما جدا شود [۵].

1 Bimetal Method for Low Temperature Monitoring

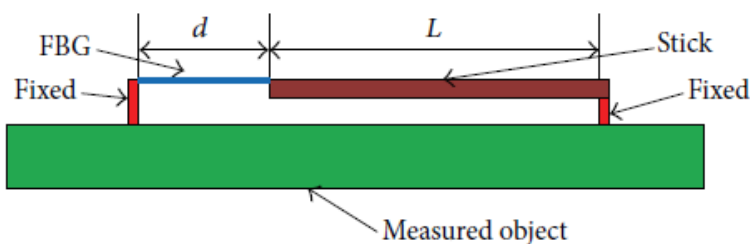
2 Bimetal Method for Temperature Compensation

پایش همزمان کرنش و دما^۱: یک روش بررسی شده این است که دما و کرنش هر دو دیده‌بانی شوند و اثر دما برای تعیین کرنش حذف شود. این روش معمولاً به دو *FBG* نیاز دارد. شکل ۱-۱۲ یک مثال را نشان می‌دهد. *FBG2* برخلاف *FBG1* به شیء مورد سنجش چسبیده است. زمانی که کرنش شیء مورد سنجش تغییر می‌کند فقط *FBG2* پاسخ خواهد داد. زمانی که دما تغییر می‌کند، هر دو آن‌ها پاسخ خواهند داد. مبنی بر پاسخ دما *FBG1*، اثر دما بر *FBG2* از پاسخ آن‌ها حذف می‌شود و کرنش جسم مورد سنجش به دست می‌آید [۵].



شکل ۱-۱۲ پایش همزمان دما و کرنش [۵].

پایش کرنش به وسیله یک *FBG* با جبران خودکار دما^۲: دما می‌تواند با تغییر طول ناشی از دمای یک دسته متصل به *FBG*، با نیاز به یک *FBG*، جبران شود. شکل ۱-۱۳ اصول آن را نشان می‌دهد. یک *FBG* کشیده شده بین یک دسته و شیء مورد سنجش ثابت می‌شود. زمانی که فقط دما تغییر می‌کند، تغییر طول دسته، ناشی از دما، می‌تواند طول موج تشدید را بدون تغییر نگه دارد. بنابراین تغییر طول موج تشدید *FBG* فقط نماینده تغییر کرنش شیء است. زمانی که کرنش سنجیده شده تغییر می‌کند، طول دسته تغییر نمی‌کند اما طول *FBG* تغییر می‌کند. بنابراین تغییر کرنش *FBG* با تغییر کرنش شیء متناسب است. برخلاف روش جبران دما دو فلزی، این روش فقط مبنی بر دسته است [۵].



شکل ۱-۱۳ پایش کرنش به وسیله یک *FBG* با جبران خودکار دما [۵].

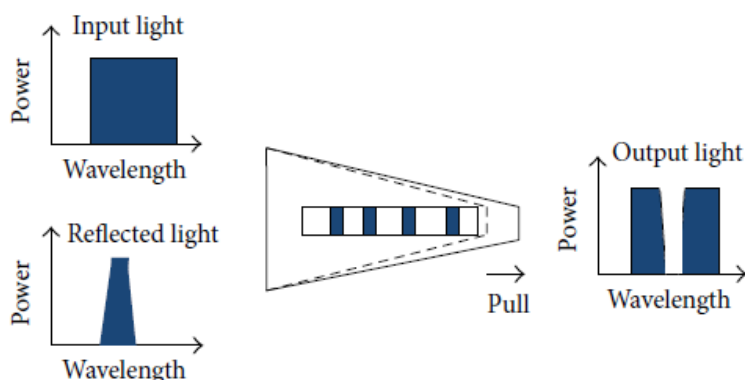
پایش کرنش به وسیله تغییر کردن غیر یکنواخت کرنش *FBG*^۳: با تغییر کردن غیر یکنواخت کرنش یک *FBG*، کرنش یک شیء مورد سنجش به وسیله توان نور بازتاب شده *FBG* که مصون از دما است، می‌تواند سنجیده شود. شکل ۱-۱۴ یک مثال را نشان می‌دهد. به فیبر ضربه زده می‌شود و زمانی که کشیده می‌شود کرنش آن به طور غیر یکنواخت تغییر خواهد کرد. توزیع غیر یکنواخت بزرگ‌تر است، عرض طیفی بازتاب شده عریض‌تر است. زمانی که دما تغییر می‌کند، عرض تغییر نمی‌کند اما موقعیت آن در امتداد محور افقی تغییر می‌کند. به هر حال، این روش

1 Simultaneous Monitoring of Strain and Temperature

2 Strain Monitoring by One FBG with Automatic Temperature Compensation

3 Strain Monitoring by Unevenly Changing the Strain of an FBG

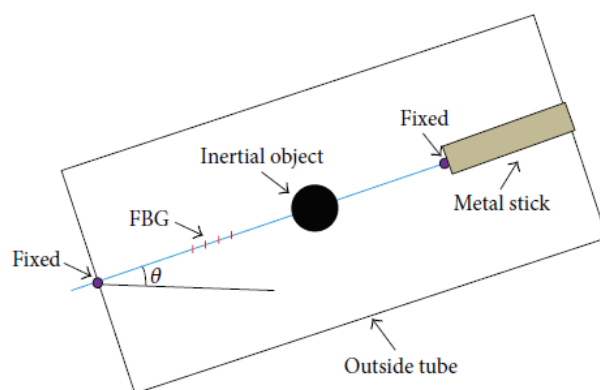
امتیاز مدولاسیون فرکانس را از دست می‌دهد، زیرا بر اساس توان طیف منعکس شده و نه طول موج تشدید است. حسگرهای *FBG* که بر این روش بنا شده‌اند در معرض نویز حاصل از اثراتی مانند انحنای فیبر هستند [۵].



شکل ۱-۱۴ پایش کرنش به وسیله یک *FBG* چرپ شده [۵].

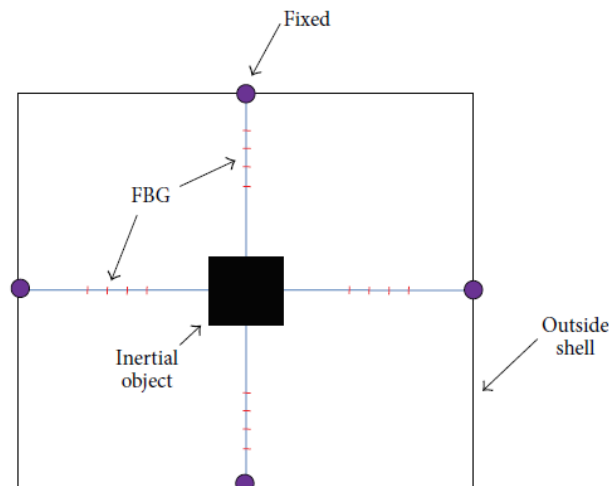
شیب‌سنج *FBG*: شیب‌سنج‌های *FBG* با تبدیل تغییر زاویه به تغییر کرنش یکنواخت یا غیر یکنواخت از یک *FBG* توسعه یافته‌اند. زمانی که زاویه شیب‌سنج تغییر کند، اینرسی شیء متصل به *FBG*، می‌تواند سبب تغییر کرنش شود، که با اندازه‌گیری تغییرات کرنش می‌توان زاویه متناظر را محاسبه نمود [۵].

شیب‌سنج مبنی بر تغییر کرنش یکنواخت: شکل ۱-۱۵ یک شیب‌سنج *FBG* که یک شیء به *FBG* متصل شده است را نشان می‌دهد. اگر زاویه θ مطابق شکل ۱-۱۵ ایجاد گردد، شیء سبب تغییر نیرو در *FBG* می‌گردد. [۵]



شکل ۱-۱۵ شیب‌سنج تک محوری [۵].

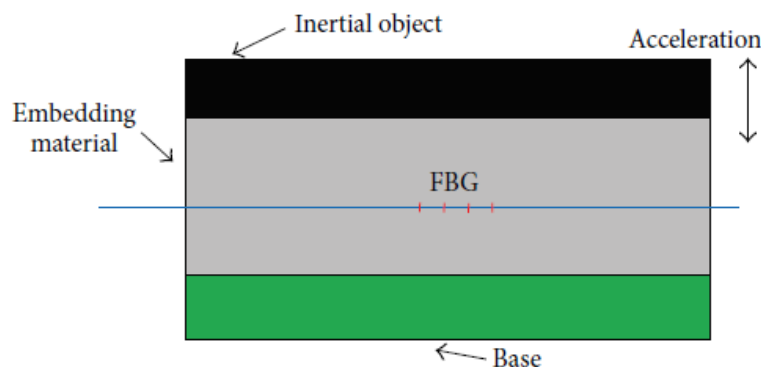
شکل ۱-۱۶ یک شیب‌سنج دو محوری- صفحه‌ای را نشان می‌دهد. اختلاف بین طول موج تشدید دو *FBG* در امتداد یک راستا می‌تواند برای تعیین شیب در آن راستا استفاده شود. این اختلاف مصون از دما است زیرا دما بر دو *FBG* به طور مساوی اثر می‌گذارد و اختلاف‌گیری بین آن‌ها این اثر را حذف می‌کند [۵].



شکل ۱-۱۶ نما بالا از شیب‌سنج دو محوری - صفحه‌ای [۵].

شتاب‌سنج‌های *FBG*: زمانی که شتاب تغییر کند، اینرسی شیء متصل به *FBG*، میتواند سبب تغییر کرنش در *FBG* شود، که با اندازه‌گیری تغییرات کرنش می‌توان شتاب متناظر را محاسبه نمود [۵].

شتاب‌سنج‌های *FBG* مبنی بر پیوستن سرتاسری^۱: شکل ۱-۱۷ اولین شتاب‌سنج *FBG* را نشان می‌دهد. در مورد شتاب قائم، جرم بالا و پایین می‌رود و سبب می‌گردد کرنش در *FBG* به طور متناوب تغییر می‌کند. [۵].



شکل ۱-۱۷ شتاب‌سنج *FBG* مبنی بر پیوستن سرتاسری [۵].

شتاب‌سنج *FBG* مبنی بر نیروی مستقیم^۲: برای به دست آوردن حساسیت بالا در جرم اینرسی پایین، یک *FBG* به وسیله دو انتهایش ثابت می‌شود و یک جرم اینرسی در وسط *FBG* ثابت می‌شود [۵].

شتاب‌سنج *FBG* با استفاده از نیروی محوری^۳: شکل ۱-۱۸ یک شتاب‌سنج *FBG* محوری با استفاده از نیروهای محوری را نشان می‌دهد. این نیروها می‌توانند حرکت از شی اینرسی را به جابه‌جایی *FBG* منتقل کنند.

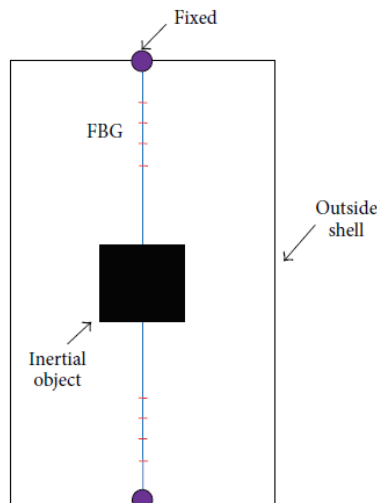
1 FBG Accelerometers Based on Throughout Attaching

2 FBG Accelerometers Based on Direct Forces

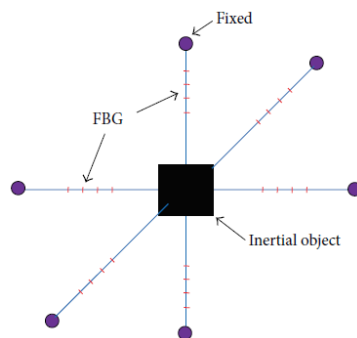
3 FBG Accelerometers Using Axial Forces

زمانی که شی اینرسی بالا و پایین می‌رود، طول‌ها و طول موج‌های تشدید دو *FBG* تغییر داده خواهند شد. اختلاف بین طول موج تشدید نماینده شتاب است و از تغییر دما مصون است [۵].

شکل ۱-۱۹ یک شتاب‌سنج *FBG* سه محوری را که از شش *FBG* برای سه جهت عمودی استفاده می‌کند، نشان می‌دهد. اختلاف بین طول موج تشدید دو *FBG* در امتداد یک محور نماینده شتاب در آن راستا است و در برابر دما مصون است [۵].



شکل ۱-۱۸ شتاب‌سنج *FBG* تک محوری [۵].



شکل ۱-۱۹ شتاب‌سنج سه محوری *FBG* [۵].

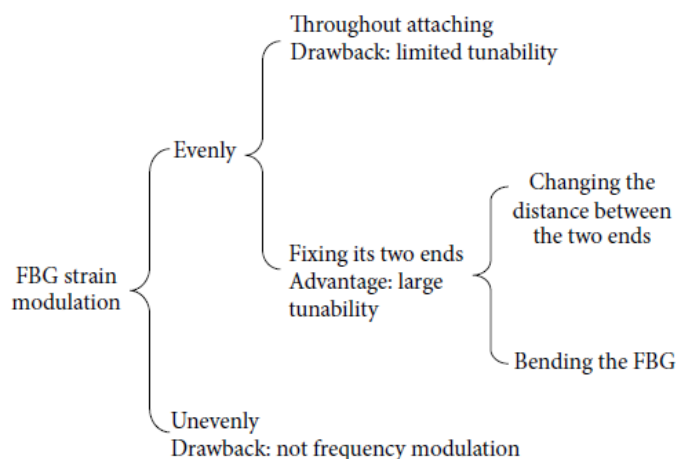
شتاب‌سنج *FBG* با استفاده از نیروهای عرضی^۱: زمانی که یک نیروی عرضی به یک رشته‌ی آرام کشیده شده اعمال می‌شود، نیروی محوری قوی‌تری القا می‌کند، [۵].

شتاب‌سنج‌های *FBG* با استفاده از نیروهای عرضی دو امتیاز دارند: اول اینکه به تعداد کمتری از *FBG* برای سنجش دو محوری نیاز دارند و دوم اینکه حساسیت بالاتر در جرم اینرسی یکسان تولید می‌کنند. شتاب در راستای محوری با اختلاف طول موج تشدید دو *FBG* مشخص می‌شود. در حالی که، شتاب در راستای عرضی با میانگین طول موج تشدید دو *FBG* مشخص می‌شود. [۵].

حسگرهای فشار FBG: زمانی که یک FBG در معرض فشار قرار می‌گیرد، کرنش آن تغییر خواهد کرد. حساسیت به طور چشمگیر با ثابت کردن دو انتهای یک FBG و تغییر دادن فاصله محوری بین دو انتها بهبود داده می‌شود. اثر دما می‌تواند با استفاده از روش دو فلزی یا اختلاف بین طول موج تشدید دو FBG در امتداد یک محور جبران شود [۵].

حسگر میدان مغناطیسی FBG: با استفاده از یک ماده مغناطوکشسانی برای تغییر کرنش یک FBG بر حسب میدان مغناطیسی، بسیاری از حسگرهای میدان مغناطیسی FBG تولید شده‌اند [۵].

به عنوان یک جمع‌بندی، تعداد زیادی حسگر FBG با روش‌های مختلف تولید شده‌اند. شکل ۱-۲۰، این روش‌ها را بر مبنای نحوه تغییر کرنش FBG، طبقه‌بندی می‌کند. مطابق این که FBG یکنواخت یا غیریکنواخت کشیده می‌شود، روش‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند [۵].



شکل ۱-۲۰ دسته بندی مازول کرنش FBG [۵].

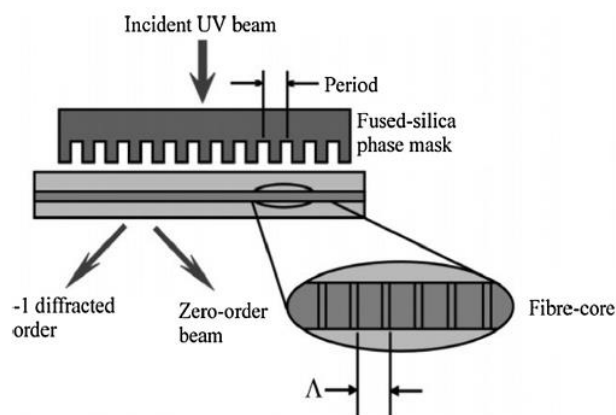
در کل، سیستم FBG شامل یک فیبر نوری با حسگرهای توری، یک منبع پهن باند (وسیله انتشار نور)، بهم چسباننده و تحلیل‌گر طیف نوری^۱ (OSA) می‌شود. معمولاً توری با دو روش نوشته می‌شود از قرار روش هولوگرافیک^۲ و روش ماسک فاز^۳. روش ماسک فاز فیبر را در معرض یک جفت سیگنال تداخلی UV قوی قرار می‌دهد. این توری را در هسته فیبر نوری می‌سازد. شکل ۱-۲۱ یک روش ماسک فاز را نشان می‌دهد. شکل ۱-۲۲ یک تصویر از سیستم FBG برای سنجش کرنش است. نور از منبع پهن باند به وسیله یک بهم چسباننده منتشر می‌شود سپس قسمتی از نور به بهم چسباننده بازتاب می‌شود. این قسمت نور و طول موج بازتاب شده به وسیله OSA تشخیص داده می‌شود. تغییر طول موج بازتاب شده از حسگرها تغییر کرنش در ناحیه توری در فیبر را نشان

1 Optical spectrum analyzer, (OSA)

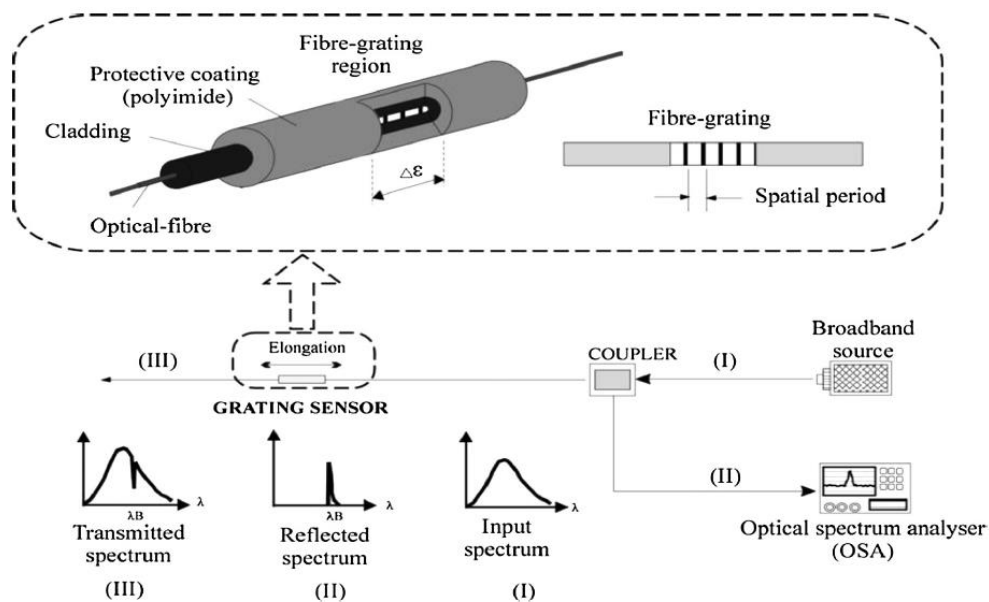
2 holographic

3 Phase mask

می‌دهد. با توجه به نیاز، حسگرهای *FBG* می‌توانند بر روی سطح اجزا نصب شوند یا در سازه‌ها مدفون شوند [۶]. [۷]



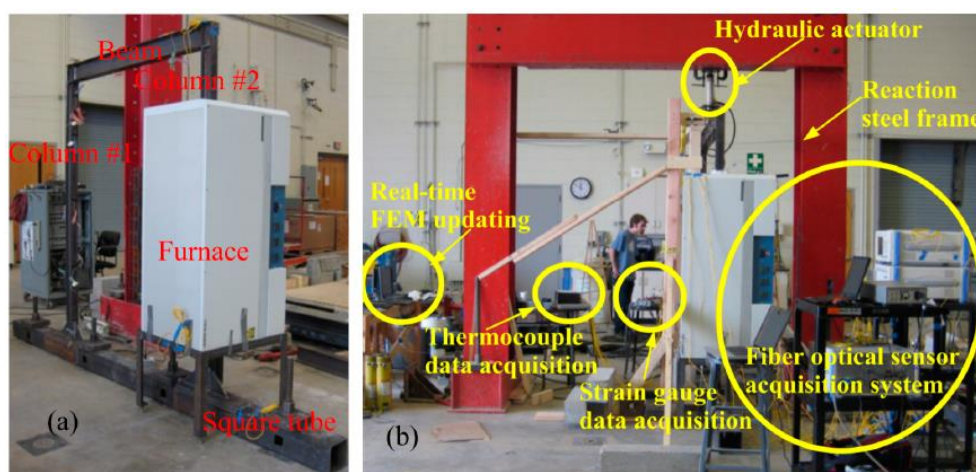
شکل ۱-۲۱ روش ماسک فاز [۷].



شکل ۱-۲۲ سیستم سنجش کرنش FBG [۷].

۱-۲-۴ حسگر توری فیبر پریود طولانی^۱

حسگر توری فیبر پریود طولانی برای سنجش کرنش بزرگ و دمای بالا می‌باشد. اگرچه این حسگرها ظریف و مستعد به شکستن در برابر بارگذاری مکانیکی هستند، یک مکانیزم نوین برای کم کردن مقیاس کشیدگی حرارت طراحی شده است تا افزایش کرنش را به تأخیر بیندازد و از LPFG در برابر شکستگی در دمای بالا محافظت کند. این حسگرها ارتقاء داده شدند و برای سنجش دمای بالا تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شدند. سپس در قاب فولادی مقیاس بزرگ برای سنجش دما در محیط شبیه‌سازی شده آتش به کار رفتند (شکل ۱-۲۳). یکی از ستون‌ها تا حدی در معرض اثر آتش بود که بتوان رفتار ترمومکانیکی قاب فولادی تحت آتش را بررسی کرد. برای الصاق حسگرهای LPFG به سطح بال ستون‌ها از چسب سرامیک دو بخشی که تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل می‌کند، استفاده شد. اطلاعات حسگرها برای به‌روزرسانی به‌موقع یک مدل اجزاء محدود برای پیش‌بینی درست پاسخ ترمومکانیکی قاب فولادی تحت آتش استفاده شدند. حسگرهای LPFG تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را سنجیدند [۸] [۹] [۱۰].



شکل ۱-۲۳ کاربرد حسگرهای LPFG [۸].

در مقایسه با حسگر FBG، کاربرد حسگر LPFG در مطالعات مربوط به سنجش دمای بالا نسبتاً جدید است. اگرچه ساخت LPFG مقرون به صرفه‌تر است ولی به خمش فیبر نوری و شاخص انعکاس محیط حساس است بنابراین به نصب آن و تفسیر داده‌های حاصل از آن باید بسیار توجه کرد. برای استفاده موفقیت‌آمیز از LPFG باید آن را به درستی بسته‌بندی کرد تا اثرات نامطلوب را روی آن کاهش داد و مقاومت مکانیکی آن را بالا برد [۸].

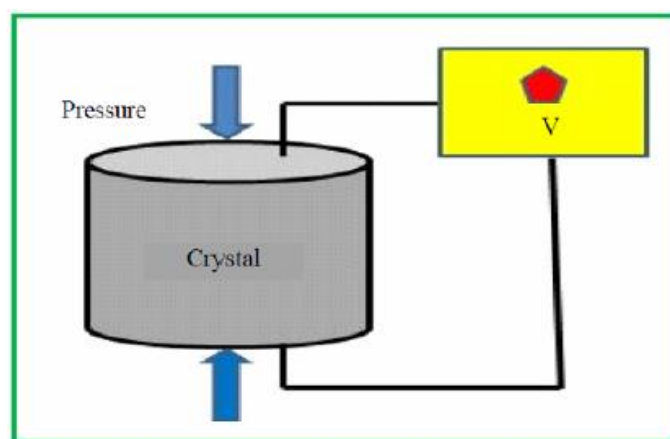
¹ long-period fiber grating, (LPFG)

۳-۱-۱ حسگرهای پیزو^۱

کلمه پیزو به معنی فشار یا هل دادن است و اثرات پیزو به توانایی مواد مشخص برای تولید پارامترهای فیزیکی مختلف در پاسخ به تنش‌های مکانیکی اعمال شده گفته می‌شود [۱۱].

۱-۳-۱-۱ حسگر فشار پیزوالکتریک

حسگرهای فشار مبنی بر اصول پیزوالکتریک می‌توانند تغییرات در فشار، شتاب، دما، کرنش یا نیرو را با اعمال یک شارژ الکتریکی بسنجند. یک حسگر پیزوالکتریک یک وسیله پر قابلیت است که به فشار عکس‌العمل نشان می‌دهد. شکل ۱-۲۴ حسگر فشار پیزوالکتریک را نشان می‌دهد که در آن نمونه فشرده می‌شود و تغییر ظرفیت خازنی یا مقاومت الکتریکی به وسیله ولت‌سنج متصل محاسبه می‌شود. تغییر ولتاژ به طور مستقیم با نیرو، فشار یا کرنش اعمال شده متناسب است [۱۱] [۱۲].



شکل ۱-۲۴ تجهیزات حسگر فشار مبنی بر پیزوالکتریک [۱۱].

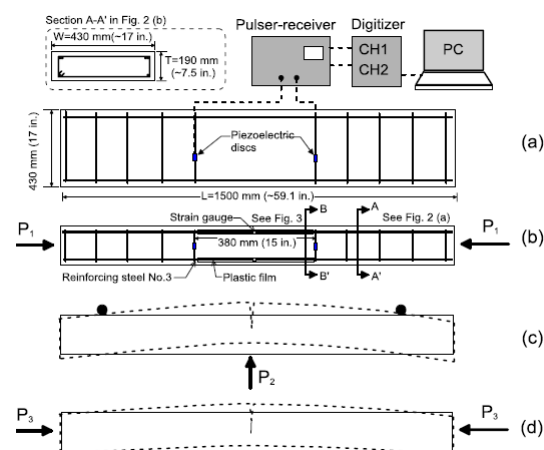
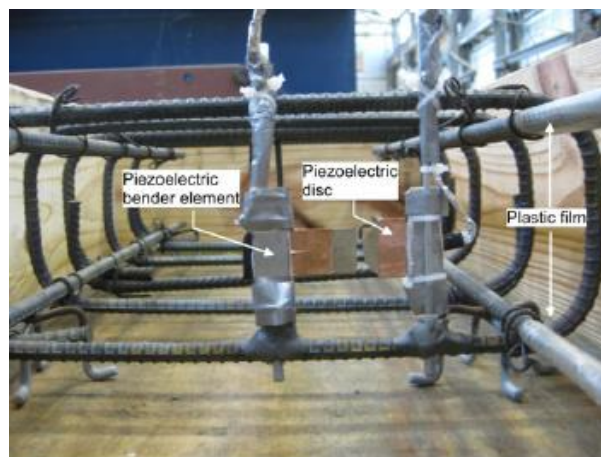
۲-۳-۱-۱ حسگر فشار پیزومقاومتی^۲

حسگر فشار پیزومقاومتی، حسگر کرنش یا گنج کرنش نیز نامیده می‌شود. این وسیله برای سنجش مقدار کرنش یک عضو تحت بارگذاری استفاده می‌شود. در این نوع از حسگرهای فشار، مقاومت الکتریکی پیزو در نتیجه کرنش اعمال شده تغییر می‌کند، از قابلیت‌های این حسگر استفاده آن بصورت مدفون در بتن می‌باشد که هم برای مقاصد آزمون و هم برای مقاصد پایش سازه می‌توان مورد استفاده قرار گیرد، [۱۳] [۱۴]. کاربرد معمول حسگرهای فشار پیزومقاومتی شامل موارد زیر است [۱۱] [۱۵] [۱۶]:

- پایش اعضای سازه‌ای برای پیش و پس ساخت، شکل ۱-۲۵
- تعیین تغییرات نیرو در مکان‌های مختلف
- سنجش تنش و کرنش در تونل‌ها

¹ piezo

² piezoresistive pressure sensor

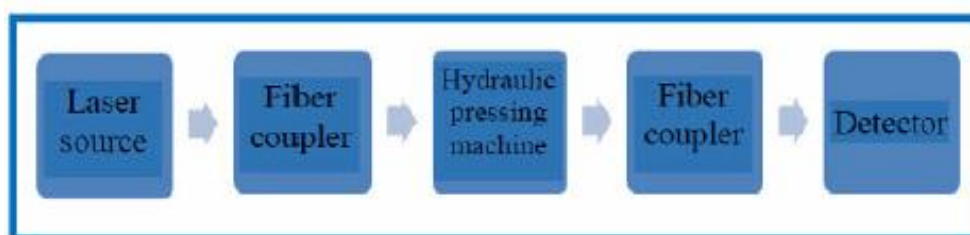


شکل ۱-۲۵ قراردادی حسگر پیزو الکتریک در شبکه آرماتورها پیش از بتن ریزی، و مراحل شماتیک آزمون، [۱۳]

۱-۳-۳ حسگرهای فشار پیزو-نوری^۱

بلوک دیاگرام تجهیزات آزمایشگاهی این حسگر در شکل ۱-۲۶ نشان داده شده است که در آن لیزر به عنوان منبع نور ورودی است و پرتو نور از طریق فیبر تعبیه شده در نمونه عبور داده می شود. فشار با استفاده از ماشین فشار هیدرولیکی به نمونه اعمال می شود و تغییر متناظر در خروجی در آشکارساز ثبت می شود. منحنی‌های بارگذاری و باربرداری فشار به دست می آید و حساسیت محاسبه می شود [۱۱] [۱۷].

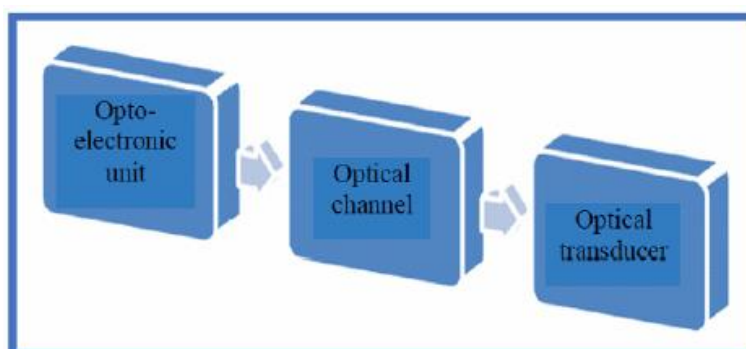
^۱ piezo-optic pressure sensor



شکل ۱-۲۶ بلوک دیاگرام تجهیزات آزمایشگاهی حسگر فشار پیزو-نوری [۱۱].

امتیازات و تجهیزات آزمایشگاهی حسگر پیزو-نوری:

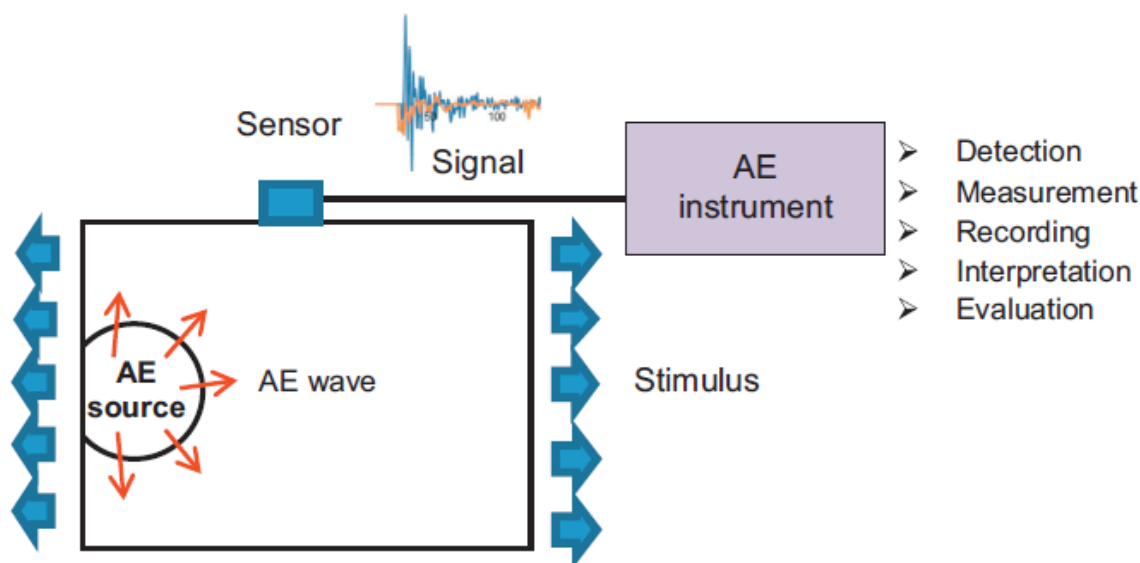
پیزو-نوری استفاده یا مطالعه وسایلی است که در آن‌ها ورودی مکانیکی یک خروجی نوری تولید می‌کند. حسگرهای نوری-الکتریکی بسیار پر امتیازتر از همتایان الکتریکی خود هستند از آن جا که آن‌ها پاسخ دینامیکی سریع، اندازه کوچک، وزن کم، قیمت پایین و نصب آسان دارند و همچنین از تداخل الکترومغناطیس مصون هستند. از این رو گزینه‌ای بهتر برای کاربرند. حسگرهای پیزو-نوری سیستم‌هایی هستند که از تکنولوژی فیبر نوری برای انتقال یک سیگنال ورودی نوری استفاده می‌کنند که با توجه به اندازه هدف اندازه‌گیری شده مدوله شده و سپس توسط یک آشکارساز جمع شده و پردازش می‌شود. شکل ۱-۲۷ بلوک دیاگرام حسگر نوری-الکترونیکی را نشان می‌دهد که در آن، واحد نوری-الکترونیکی شامل منبع نور ورودی می‌شود و کانال نوری شامل مسیری (نمونه) است که امواج نور از میان آن عبور می‌کند. مبدل نوری شامل وسایل جمع‌کننده سیگنال است [۱۱] [۱۸].



شکل ۱-۲۷ بلوک دیاگرام حسگر فشار پیزو-نوری [۱۱].

۱-۳-۴ حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک جهت ارزیابی سلامت سازه

آزمون نشر امواج صوتی^۱ گونه ای از آزمون های غیرمخرب می‌باشد که به منظور بررسی شکل گیری و رشد نواقص (هم چون ترک ها و...) درون قطعه، به صورت دینامیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. منظور از نشر صوت، تولید امواج الاستیکی (مکانیکی) در اثر محرک خارجی (تغییرات فشار، نیرو یا دما)، منابع متمرکز انرژی در ماده شروع به آزاد سازی امواج الاستیکی می‌کنند و این امواج تا سطح قطعه انتشار می‌یابند و به وسیله حسگر ها ثبت و بررسی می‌شوند، شکل ۱-۲۸ شکل ۴-۳۳. نشر صوت مربوط به تولید امواج الاستیکی همزمان با آزاد یا رها شدن سریع انرژی کرنشی در ماده می‌باشد. با استفاده از تجهیزات مناسب می توان حرکاتی در بازه پیکومتر را نیز ثبت کرد. امواج صوتی تولید شده در روش AE در کنترل کیفیت، بررسی سلامت سازه، کنترل فرآیند و... حائز اهمیت می‌باشند. از این تست در پروژه های تحقیقاتی (آزمایش کشش، آزمایش مکانیک شکست و ...) و پروژه‌های صنعتی (بازرسی جوش، بررسی ترک ها در پل ها و...) استفاده می شود.



شکل ۱-۲۸ عملکرد کلی حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک، [۱۹]

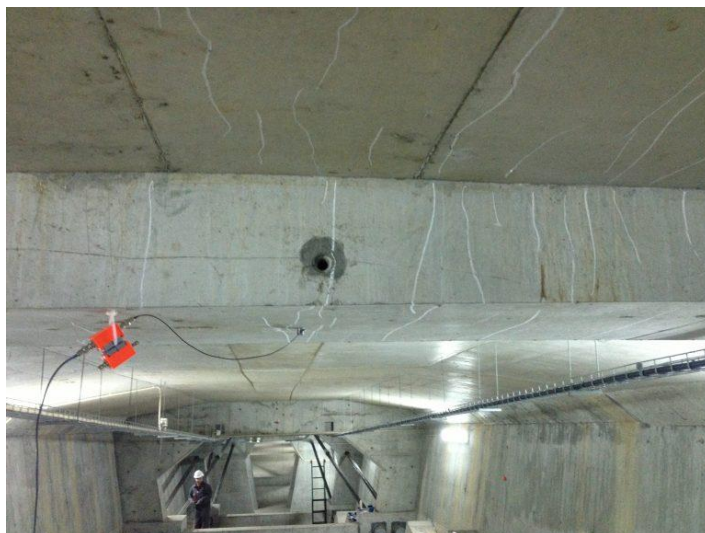
همانطور که بیان شد این روش برای بازرسی سلامت سازه‌های عمرانی بسیار کاربردی می‌باشد، روش انتشار امواج صوتی به راحتی برای سازه‌های در حال سرویس می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد این موضوع اهمیت این روش را مشخص می‌کند. استفاده موفق از AE در سازه‌های مختلف عمرانی در نقاط مختلف جهان ثابت کرده این روش می‌تواند سبب بهبود ایمنی حین سرویس گردد، که پیرو آن سبب کاهش هزینه‌های نگهداری می‌گردد.

از مزایای استفاده از روش AE می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

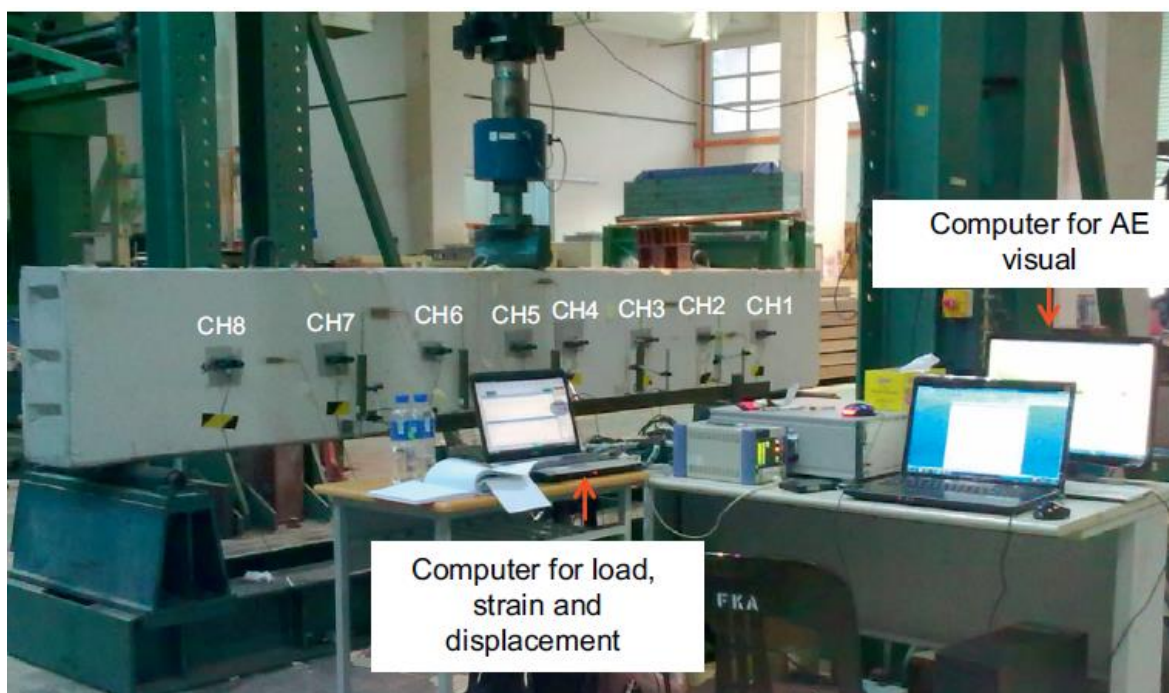
- ✓ شناخت ترک‌های فعال در بتن، و هر نوع نقصی در سازه‌ها، شکل ۱-۲۹
- ✓ پایش خوردگی‌های الکترو-شیمیایی و دیگر خوردگی‌ها در آرماتورها و کابل‌ها، شکل ۱-۳۰

¹ Acoustic Emission (AE)

- ✓ ارزیابی سازه‌ها یا المان‌های آن‌ها تحت بار سرویس
- ✓ پایش تغییرات طولانی مدت در سلامت سازه
- ✓ ارزیابی سرویس پذیری سازه تحت شرایط بار گذاری خاص
- ✓ پایش بینی خرابی
- ✓ خصوصیات مکانیکال و مکانیک شکست اعضای بتنی در سازه



شکل ۱-۲۹ استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک بر روی بخش داخلی بتن پل صندوقه‌ای، [۲۰]



شکل ۱-۳۰ استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک در آزمون خمش سه نقطه‌ای در آزمایشگاه، [۱۹]

۱-۳-۵ حسگرهای میکروالکترومکانیکال^۱

تکنولوژی *MEMS* به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف با امتیازهای قدرتمندی مانند، هزینه کم، حساسیت بالا، دوام، کوچک‌سازی ابزار، تناسب داشتن با سیستم‌های بی‌سیم مورد استفاده قرار گرفته است. ماده اصلی آن سیلیکون است که از نظر خواص میکانیکی خطی، ترد و قوی می‌باشد. برخی از مواد دیگر که در *MEMS* استفاده می‌گردند دارای خواص مهمی می‌باشند: نظیر خصوصیت پیزو مقاومتی^۲ و پیزو الکتريک‌ها^۳ که فاکتورهای جالبی برای حسگرها می‌باشند. حسگرهای اصلی *MEMS* که در محیط سازه به کار می‌روند می‌تواند به سه نوع با کارکردها مختلف تقسیم می‌شوند: شتاب نگارها، آلتراسونیک و کرنش سنج، [۲۱]. *MEMS* با پیشرفت در تولید مدارهای مجتمع^۴ در صنعت پدید آمد. تکنولوژی *MEMS* در مهندسی سازه که با سازه‌های بزرگ مواجه می‌باشیم، نصب صدها حسگر با قیمت پایین را امکانپذیر گردانیده است، [۲۲].

ساخت اینگونه حسگرها با استفاده از میکرو ماشین کاری^۵ امکانپذیر گشته است. میکرو ماشین کاری بر روی سیلیکون شامل اضافه کردن لایه‌هایی از مواد بر روی قرص سیلیکون و سپس با حک کردن (لایه‌هایی که قابل جدا شدن هستند) این لایه‌ها الگوهای دقیقی بر روی این لایه‌ها یا بر روی زیر لایه‌ها پیاده می‌کند. این عملیات همراه با چند دوره لایه گذاری و حک کردن مواد نیمه هادی بر اساس الگو می‌باشد، [۲۳].

همانطور که بیان شده با قرارگیری سیلیکون و *IC* ها در کنار هم استفاده از موادی که قابلیت سنجش در آنها وجود دارد نظیر پیزوها در ساختار *MEMS* امکان تولید حسگرهای متنوعی با ابعاد کوچک فراهم شده است، بطور مثال یکی از محبوبترین حسگرهایی که به این روش تولید شده است حسگر شتاب می‌باشد، که در اصل شامل یک جرم معلق می‌باشد که جابجا می‌شود بنابراین، موقعیت جرم، وابسته به شتاب به شتاب وارد به آن تغییر می‌کند، شکل ۱-۳۱. این تغییر مکان سبب می‌شود که در ماده پیزو مقاومتی به مقاومت و ولتاژ در ماده پیزوالکتریک و یا به ظرفیت خازنی (توان) در شتاب نگار خازنی تبدیل می‌شود، جدول ۱-۱، و به این طریق با کالیبره شدن این خصوصیات شتاب وارده قابل اندازه‌گیری می‌باشد، [۲۳].

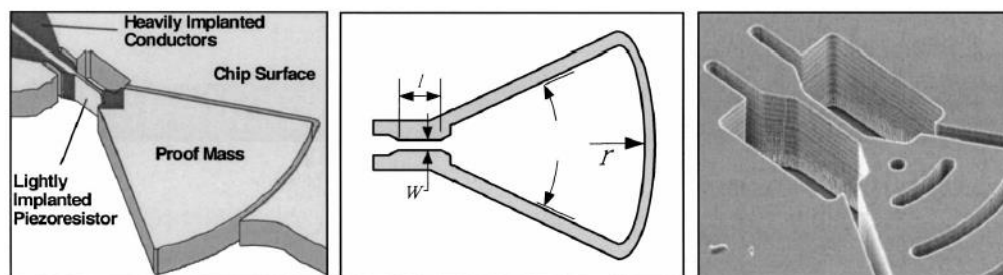
^۱ Microelectromechanical System (*MEMS*)

^۲ Piezoresistivity

^۳ Piezoelectricity

^۴ Integrated Circuit, *IC*

^۵ Micromachining



شکل ۱-۳۱ شتابنگار پیزورزیستو [24]

جدول ۱-۱ مشخصات دو حسگر پیزوالکتریک و حسگر خازنی بی‌سیم [25]

Specification	PCB393 (Wired System)	PCB3801 (Wireless System)
Sensor Type	Piezoelectric	Capacitive
Maximum Range	$\pm 0.5g$	$\pm 3g$
Sensitivity	10 V/g	0.7 V/g
Bandwidth	2000 Hz	80 Hz
RMS Resolution (Noise Floor)	50 μg	500 μg
Minimal Excitation Voltage	18 ~ 30 VDC	5 VDC

۴-۱-۱ سنجش جابه‌جایی سازه مبنی بر دید^۱

حسگرهای جابه‌جایی مانند *LVDT* و مبدل‌های جابه‌جایی مبنی بر کرنش برای سنجش جابه‌جایی بسیار استفاده شده‌اند. این حسگرها معمولاً بین یک نقطه هدف در یک سازه و نقطه ثابت برای سنجش جابه‌جایی نسبی قرار داده می‌شوند. نصب یک حسگر به تکیه‌گاه‌های اضافه نیاز دارد که اغلب تهیه این تکیه‌گاه‌ها در محل آزمایش سازه عمرانی با مقیاس کامل دشوار یا دور از دسترس است. علاوه بر این، ارتعاش تکیه‌گاه‌های اضافه‌شده دقت سنجش‌ها را به‌طور چشمگیر کاهش می‌دهد. بنابراین استفاده از حسگرهای قدیمی برای سنجش پاسخ جابه‌جایی یک سازه مقیاس کامل کارا نیست، [۲۶].

توسعه الگوریتم‌های تخمین غیرمستقیم جابه‌جایی.

تحقیق روی استفاده از حسگرهای نسبتاً جدید مانند ارتعاش‌سنج داپلر لیزری (*LDV*)، سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی^۲ (*GPS*) و روش‌های مبنی بر دید کامپیوتری.

روش‌های تخمین غیرمستقیم معمولاً از سنجش شتاب و کرنش استفاده می‌کنند که مستقل از نقطه ثابت حسگر است. به هر حال، عملکرد تخمین و دقت روش‌های غیرمستقیم به شدت به الگوریتم‌های تبدیل جابه‌جایی وابسته هستند که برای جلوگیری از خطای بزرگ و غیرقابل انتظار باید با دقت کنترل شوند. *LDV* یک نمونه حسگر بدون

¹ Vision-Based Structural Displacement Measurement

² global positioning systems, (GPS)

تماس است که جابه‌جایی را به وسیله انتقال داپلر پرتوهای حذف‌شده و بازتاب‌شده لیزر می‌سنجد. اگرچه LDV دقت بالایی دارد اما هزینه آن زیاد است و می‌تواند فقط جابه‌جایی در راستایی مشخص را اندازه‌گیری کند. استفاده از GPS برای پایش سلامت سازه بررسی شده و یک جایگزین جذاب پایش خرابی است. به هر حال، دقت مکان‌یابی آن تنها مناسب سازه با شکست‌های بزرگ مانند پل‌ها با دهانه‌های بزرگ و ساختمان‌های بلند است و بیشتر سازه‌های عمرانی دیگر با شکست‌های کوچک به جایگزین بهتری نیاز دارند. تحقیقات نشان داده‌اند که روش‌های مبنی بر دید کامپیوتری می‌توانند معضلات موجود در روش‌های دیگر را حل کنند. روش‌های موجود مبنی بر دید از لحاظ روش‌های بدون هدف^۱، تشخیص ویژگی و انتقال‌های مختصات با هم فرق دارند. روش‌های بدون هدف برای ویژگی‌های برجسته یک سازه که برای سنجش جابه‌جایی ردیابی می‌شوند، استفاده می‌شوند. از الگوریتم‌های این روش می‌توان تطبیق کد جهت‌گیری^۲ (OCM) و الگوریتم‌های مبنی بر اویلر^۳ را نام برد. روش‌های مبنی بر هدف از یک نشانگر هدف^۴ با ویژگی‌های طراحی‌شده مانند یک دایره، یک صفحه شطرنجی یا یک الگوی تصادفی استفاده می‌کنند. به محض این که یک ویژگی تشخیص داده می‌شود، موقعیت ویژگی به قلمرو فیزیکی با استفاده از انتقال مختصات منتقل می‌شود. روش‌های انتقال متفاوتی وجود دارد مانند مقیاس کردن ساده^۵، تبدیل آفین^۶، اکتساب پارامترهای خارجی^۷ و تبدیل همگرافی^۸. تحقیقات توانایی دید کامپیوتری برای سنجش جابه‌جایی و دیگر کاربردها در پایش سلامت سازه مانند شناسایی سیستم و سنجش جابه‌جایی پل با دهانه بزرگ را نشان داده است. مشکلات استفاده از این روش عبارتند از: استفاده از نشانگر هدف، انتخاب موقعیت دوربین و خطای ناشی از نور. روش‌های بدون هدف نیاز به نصب نشانگر هدف ندارند ولی سنجش‌های مبنی بر هدف زمانی مفید هستند که با یک انتقال همگرافی که با ایجاد امکان قرار دادن دوربین در موقعیت دلخواه می‌تواند کارایی آزمایش در محل را افزایش دهد، به کار روند. تحقیقات کمی بر خطای ناشی از نور در آزمایش میدانی در محیط‌های خشن انجام شده است. نور خورشید باعث تیرگی تصویر نشانگر هدف شده در نتیجه منجر به خطای چشمگیر در یافتن ویژگی در عکس گرفته‌شده می‌شود [۲۶].

روش‌های سنجش جابه‌جایی مبنی بر دید کامپیوتری معمولاً شامل اجزای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری می‌شود (شکل ۱-۳۲). قسمت سخت‌افزار می‌تواند شامل یک دوربین تجاری، یک کامپیوتر اکتساب داده و پردازنده و یک نشانگر هدف تعریف‌شده با کاربر، برای ساخت یک سیستم بسیار مقرون به صرفه اقتصادی، می‌شود. حرکت‌های نشانگر به

¹ non-target approaches

² orientation code matching, (OCM)

³ Eulerian-based algorithms

⁴ target marker

⁵ simple scaling

⁶ affine transform

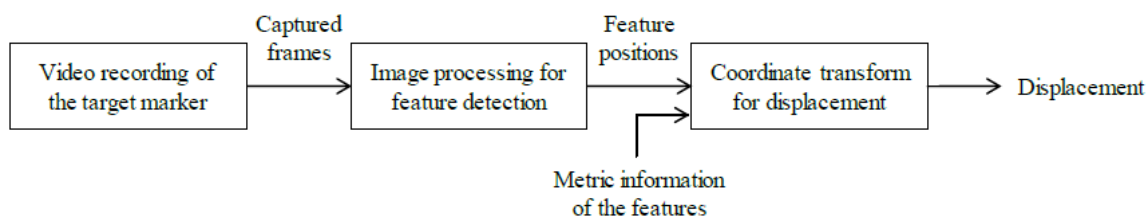
⁷ extrinsic parameters acquisition

⁸ homography transform

وسیله دوربین ثبت می‌شود و به‌طور همزمان به کامپیوتر برای محاسبه جابه‌جایی با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر و انتقال‌های مختصات فرستاده می‌شوند. از آنجا که انتقال‌های مختصات به مختصات فیزیکی و تصویر مرتبطاند، نشانگر و دوربین باید به درستی و با توجه به محدودیت‌های انتقال‌های مختصات انتخاب‌شده قرار گیرند. به هر حال، جهت یافتن یک موقعیت مناسب که دوربین می‌تواند به طور امن در آن قرار گیرد و توجه به فرضیات در انتقال‌های مختصات اغلب یک چالش در آزمایش میدانی است.



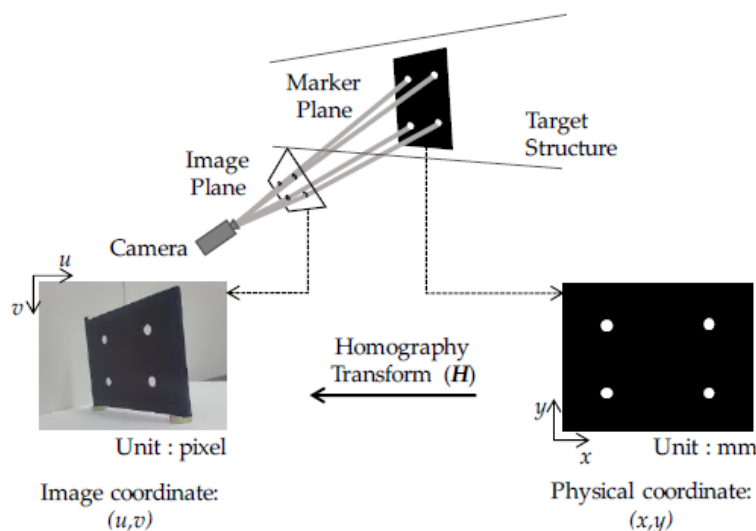
(الف)



(ب)

شکل ۱-32: پیکربندی متداول روش‌های سنجش جابه‌جایی مبنی بر دید: (الف) سخت‌افزار، (ب) نرم‌افزار [۲۶].

انواع انتقال‌های مختصات در ادامه توضیح داده شده است. مقیاس کردن ساده ضریب مقیاس (با واحد میلی‌متر بر پیکسل) را در جابه‌جایی سنجیده‌شده مختصات تصویر ضرب می‌کند بنابراین راستای حرکت هدف و جابه‌جایی تصویر باید با یکدیگر همسو باشند. در انتقال آفین باید دوربین و نشانگر هدف بر هم عمود باشند. پارامترهای خارجی دوربین که حرکت ۶ درجه آزادی نشانگر هدف را توصیف می‌کنند (۳ پارامتر انتقالی و ۳ پارامتر چرخشی) می‌توانند فقط با یک لیزر با فاصله کانونی کوتاه حاصل شوند که دوربین را محدود می‌کند که در فاصله‌ای نزدیک به نشانگر هدف بماند. انتقال همگرافی می‌تواند صفحه تصویر را به صفحه نشانگر بدون توجه به موقعیت دوربین نگاشت کند (شکل ۱-33). از این‌رو، انتقال همگرافی یک راه‌حل مناسب برای قرارگیری بدون محدودیت دوربین در محل آزمایش است [۲۶].



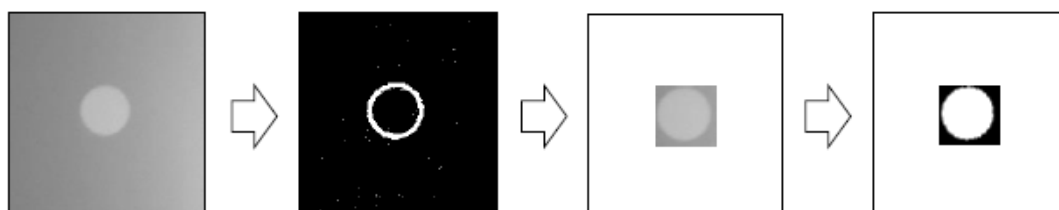
شکل ۱-۳۳ مثال تصویری انتقال همگرافی بین صفحات تصویر و نشانگر [۲۶].

ویژگی یک نشانگر هدف ممکن است در اثر نور نامطلوب خصوصا در آزمایش میدانی ناصحیح تشخیص داده شود. نور خورشید مستقیم یا بازتاب شده می‌تواند به طور چشمگیر عکس گرفته شده از نشانگر را زایل کند. در مطالعه‌ای با استفاده از یک طرح پردازش تصویر مرتبط با فرآیند تطبیقی منطقه مورد علاقه^۱ (ROI) روشی برای شناسایی قابل اعتماد موقعیت نشانگر در حضور زوال تصویر ناشی از نور ارائه شده است. روش تطبیقی ROI یک شیوه سریع و خودکار برای انتخاب کوچکترین ROI در هر عکس گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱-۳۴ نشان داده شده است، روش تطبیقی ROI از ۴ گام تشکیل شده است. اکتساب مرز دایره با به کار بردن یک فیلتر تشخیص لبه مانند فیلتر سبل^۲ برای تصویر اصلی انجام می‌پذیرد. معمولا عکس فیلتر شده یک حفره خالی دارد. این عکس برای تعیین محل کوچکترین جعبه مستطیلی که حفره خالی را در برمی‌گیرد، بررسی می‌شود. این عکس به وسیله ROI تطبیقی بریده می‌شود. عکس بریده شده شامل یک دایره شفاف بدون یک پس زمینه روشن می‌شود در نتیجه یک تمایز واضح بین دایره و پس زمینه وجود دارد. عکس بریده شده با استفاده از یک روش آستانه^۳ که به جدا کردن دایره از پس زمینه کمک می‌کند، دوتایی می‌شود. در نهایت، نقطه مرکزی دایره با میانگین گیری از موقعیت پیکسل‌ها در دایره محاسبه می‌شود. بنابراین، روش ROI تطبیقی به طور قابل اعتماد ویژگی‌ها را تحت شرایط نور نامطلوب با سرعت محاسبات کافی تشخیص می‌دهد [۲۶].

¹ region-of-interest, (ROI)

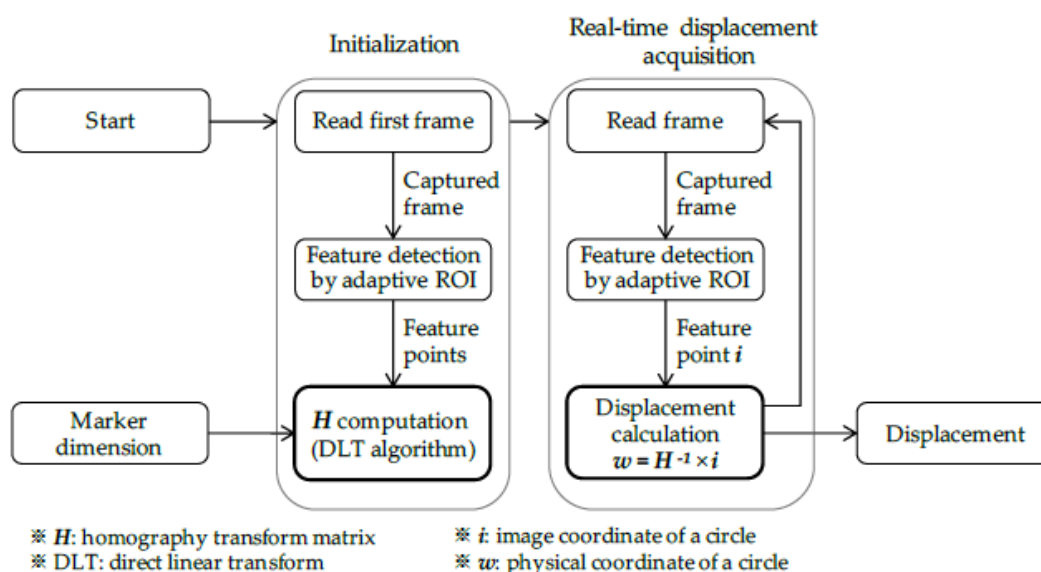
² Sobel filter

³ threshold method



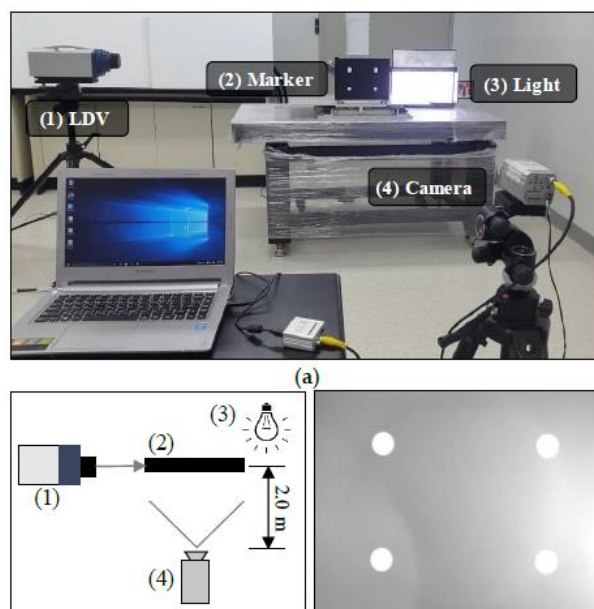
شکل 34-1 جریان ROI تطبیقی [۲۶].

شکل 35-1 فرآیند کلی اندازه‌گیری جابه‌جایی را با روش مورد بحث نشان می‌دهد. گام شروع از موقعیت‌های ویژگی (یعنی نقاط مرکزی دایره‌های سفید) در عکس اول و موقعیت‌های معلوم متریک دایره‌ها استفاده می‌کند تا ماتریس انتقال همگرافی را محاسبه کند. گام اکتساب جابه‌جایی زمان واقعی هنگامی آغاز می‌شود که الگوریتم انتقال خطی مستقیم ماتریس همگرافی را تعیین کند. گام اکتساب جابه‌جایی ابتدا ویژگی‌ها را با روش تطبیقی ROI از یک قاب ورودی تشخیص می‌دهد و سپس از انتقال همگرافی برای محاسبه جابه‌جایی استفاده می‌کند. این فرآیند برای هر قاب به‌دست آمده از دوربین تکرار می‌شود [۲۶].



شکل 35-1 فلوچارت سنجش جابه‌جایی مبنی بر دید کامپیوتری [۲۶].

نمونه‌ای از کاربرد روش مذکور، در آزمایش مقیاس آزمایشگاهی بوده‌است که با استفاده از یک میز لرزه برای بررسی مقاومت روش تطبیقی ROI با در نظر گرفتن زایل شدن عکس در اثر نور اجرا شد. شکل 36-1 تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که شامل دوربین، نشانگر هدف، کامپیوتر، منبع نور و LDV می‌شود. دوربین در فاصله ۲ متری از نشانگر هدف قرار داده شده‌است و نشانگر هدف روی یک میز لرزه نصب شده‌است. یک نور مصنوعی پشت نشانگر برای زایل کردن عکس نصب شده‌است. جابه‌جایی نتیجه‌شده از ROI تطبیقی با جابه‌جایی مرجع سنجیده شده به وسیله LDV مقایسه شده‌است و کارایی روش نشان داده شده‌است [۲۶].



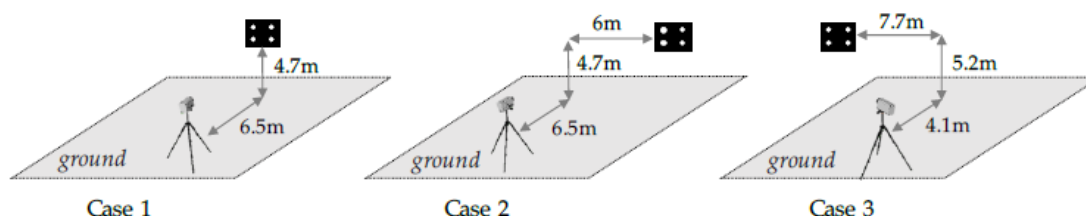
شکل 36-1 آزمایش مقیاس آزمایشگاهی [۲۶].

از روش مذکور در آزمایش مقیاس واقعی برای پل سامسنگ^۱ که یک پل کامپوزیت فولادی با ۴۰ متر طول و در کره است، (شکل ۱-۳۷ - الف) استفاده شده است. این پل با هدف آزمایش ساخته شده است و محیط ایده آل آزمایش میدانی را فراهم می‌کند. تجهیزات آزمایشگاهی به زیر عرشه پل در وسط دهانه با استفاده از پایه‌های مغناطیسی نصب شدند. مطابق شکل ۱-۳۷ - ب، سه موقعیت مختلف برای دوربین در نظر گرفته شد تا بی‌تأثیر بودن موقعیت قرارگیری دوربین به عنوان یک امتیاز استفاده از انتقال مختصات مبنی بر همگرافی نشان داده شود. یک *LDV* درست زیر نشانگر هدف قرار داده شد تا جابه‌جایی‌های مرجع را برای مقایسه با نتایج حاصل از دوربین حاصل کند و کارایی روش را نشان دهد [۲۶].

¹ Samseung



(الف)



(ب)

شکل ۱-37 تجهیزات آزمایش: (الف) دید کلی، (ب) موارد آزمایش با موقعیت‌های مختلف برای دوربین [۲۶].

استفاده از دوربین‌های اکشن کم‌هزینه و مقاوم با رزولوشن بالا به جای دوربین‌های حرفه‌ای می‌تواند مفید باشد. در مطالعه‌ای، روشی برای استفاده کارا از دوربین‌های کم‌هزینه با اضافه کردن دامنه وسیع ظرفیت بزرگنمایی به دوربین اکشن برای فراهم کردن انعطاف‌پذیری بیشتر در موقعیت‌های پایش سازه پل ارائه شده است. در این مطالعه از دوربین اکشن GoPro از آنجا که این دوربین ارزان، رزولوشن بالا و قابل حمل است و همچنین عملکرد بدون سیم برای کنترل دوربین را ممکن می‌سازد، برای فیلم‌گرفتن استفاده شد. به علاوه، این دوربین در برابر شرایط نامطلوب محیطی مانند باران مقاوم است و این ویژگی استفاده طولانی مدت آن را در آزمایش میدانی عملی می‌کند. عیب استفاده از GoPro برای پایش پل این است که لنز آن طول کانونی بسیار کمی دارد که آن را برای پایش فاصله طولانی نامناسب می‌کند. در این مطالعه، این دوربین اصلاح شده و ظرفیت پایش فاصله طولانی به آن اضافه شده است. راه حل استفاده از یک بسته لوازم اصلاح به نام Ribcage برای GoPro بود (شکل ۱-38). یک کامپیوتر ارزان قیمت برای انجام آزمایش به GoPro ضمیمه شد. در طول آزمایش با استفاده از Capture App برای تلفن‌های هوشمند کنترل شد و فیلم‌ها در کارت‌های microSD ذخیره شد تا بعد برای پردازش به یک کامپیوتر منتقل شود که مشکل نیاز به سیم‌کشی بین دوربین و وسایل پردازشگر را حل کند [۲۷].

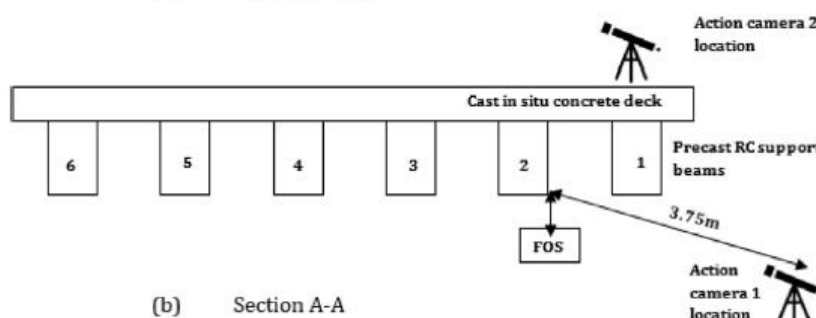


شکل ۱-۳۸: مشخصات سخت‌افزار Ribcage [۲۷].

روش پیشنهادشده در پل *Governors* استفاده شد. در این آزمایش دو دوربین اکشن به کار رفت که یکی جابه‌جایی را از ویژگی طبیعی تیر پایش کند و دوربین دیگر نیروی بالای عرشه را شناسایی کند. دوربین اول در فاصله ۳/۷۵ متری از نقطه سنجش قرار داشت و دوربین دوم روی عرشه پل بود تا اطلاعات مربوط به نوع وسیله نقلیه‌ای که باعث جابه‌جایی قرائت‌شده می‌شد، فراهم کند و از مقیاس پیکسل بر میلی‌متر استفاده شد (شکل ۱-۳۹). نتایج آزمایش تایید می‌کند که سیستم می‌تواند اندازه‌گیری‌های دقیق جابه‌جایی را در محیط میدانی ارائه دهد و بر محدودیت‌های موجود از لحاظ روشنایی و منبع قدرت نیز غلبه کند [۲۷].



(a) South elevation



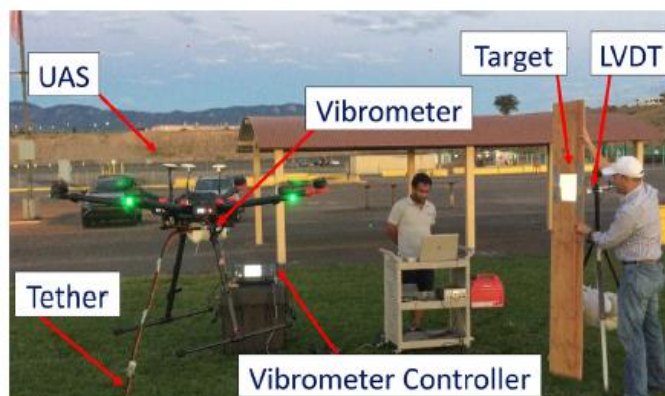
(b) Section A-A

شکل ۱-۳۹: آزمایش روی دهانه جنوبی پل Governors [۲۷].

۱-۴-۱-۱ ارتعاش سنج داپلر لیزری

همان‌طور که قبلاً بیان شد، روش‌های مختلفی برای سنجش جابه‌جایی سازه‌های عمرانی با استفاده از حسگرهایی که در تماس مستقیم با سازه هستند، وجود دارد اما نصب این حسگرها در بعضی موقعیت‌ها مثلاً در دهانه بزرگ پل‌ها غیرعملی است به همین دلیل تحقیقات به سمت استفاده از حسگرهای غیرتماسی برای سنجش جابه‌جایی پل‌ها سوق داده شد. *LDV* به عنوان یک حسگر بدون نیاز به تماس استفاده می‌شود و روی یک سطح صلب نزدیک هدف قرار داده می‌شود. برای کسب داده از یک *LDV* در مقایسه با سایر روش‌های مذکور به پردازش کمتری نیاز است و می‌توان از آن برای اندازه‌گیری زمان-واقعی جابه‌جایی بهره برد. *LDV* بنابر اصل اثرات داپلر کار می‌کند که این اثرات شامل انتقال در فرکانس بین امواج فرستاده شده و بازتاب شده از یک هدف متحرک است که وابسته به سرعت و راستای حرکت هدف است. به هر حال، *LDV* باید روی یک سطح صلب نزدیک هدف نصب شود [۲۸] [۲۹] [۳۰] [۳۱] [۳۲] [۳۳] [۳۴].

اعتبارسنجی توانایی سیستم *LDV* جدید برای به دست آوردن جابه‌جایی دینامیکی بدون مرجع با مقایسه کردن داده‌های *LVDT* بود. تجهیزات آزمایش در شکل ۱-۴۰ آورده شده است. آزمایش میدانی نشان می‌دهد که سیستم جدید قادر به سنجش جابه‌جایی دینامیکی سازه در شرایط محل و بدون تماس با سازه هدف است [۲۸].



شکل ۱-۴۰ تجهیزات آزمایش میدانی [۲۸].

۵-۱-۱ مشکلات تحلیل و طراحی سازه‌ها - مزایای رویکرد ارزیابی ترکیبی عددی و آزمایشگاهی سازه‌ها (مثال موردی دو سازه برج انتقال - سازه جداسازی شده)

اساساً، طراحی برج‌های خط انتقال بر پایه فلسفه وزن کمینه است. برج‌ها، در کل، از نوع مشبک هستند که شامل اعضای بازو^۱، مهاربند اصلی یا فرعی^۲ و پایه‌ها^۳ می‌شوند. در طراحی سازه‌های برج‌ها، اساساً، بار باد وارد بر بدنه برج، وزن برج و دیگر بارهای ناشی از یخ‌زدگی، انحراف خط، شرایط گسیختگی سیم، نصب و نگهداری حاکم است. اعضا بر پایه آیین‌نامه‌ها طراحی می‌شوند. اتصالات پیچی با سوراخ اسمی ۱/۵ میلی‌متری بزرگتر از پیچ‌ها جهت مونتاژ اعضای برج اجرا می‌گردند. مقاطع فولادی با گریدهای مقاومتی مختلف مانند فولاد با مقاومت کششی متوسط، بالا و فوق بالا در برج‌های خط انتقال استفاده می‌شوند. فولاد با مقاومت کششی بالا و فوق بالا تنها برای اعضای بازو و پایه استفاده می‌شود [۳۵].

تحلیل برج‌های فولادی و مشبک خط انتقال معمولاً با روش‌های ساده شده عددی و خطی انجام می‌شود در حالی که رفتار واقعی برج‌های مشبک با اتصالات پیچی پیچیده است و ممکن است تحت تاثیر عوامل مختلف مانند

¹ Cross arm

² primary/secondary bracings

³ legs

سختی پیچشی^۱ اتصالات، لغزش پیچ^۲، خروج از مرکزیت اتصالات^۳، تغییر شکل اولیه^۴ اعضا و ... قرار گیرد. این پیچیدگی‌ها ممکن است باعث شکست‌های پیش‌بینی نشده در اعضا یا اتصالات برج شود. از این رو از آزمایش‌های مقیاس واقعی استفاده می‌شود تا صلاحیت طراحی جدید برج‌های انتقال مشبک و فولادی تصدیق شود. این آزمایش‌ها گران هستند و ساخت خط انتقال را به تاخیر می‌اندازند [۳۶].

روش‌های عددی پیشرفته طی سال‌ها توسعه داده شدند و می‌توانند به طور کارا از نحوه توزیع نیرو و شرایط بارگذاری اعضای سازه فولادی دید بهتری دهند و به مهندسان کمک می‌کنند تا وقایع خرابی گذشته را تحلیل کنند یا از شکست پیش‌بینی نشده در آزمایش‌های مقیاس واقعی اجتناب کنند. در حال حاضر، ابزار عددی برای انجام تحلیل عددی پیشرفته برج‌های مشبک، به طور گسترده در دسترس هستند. با این حال، باید شیوه مدلسازی و فرضیات را متناسب با مسئله مورد مطالعه انتخاب کرد و از پیچیدگی غیر ضروری مدل اجتناب کرد زیرا باعث افزایش تعداد فرضیات می‌شود و می‌تواند عدم قطعیت مدل را افزایش دهد. اگر به مدل پیچیده نیاز باشد باید آن را با مدل‌های عددی کوچک‌تر و در صورت امکان با آزمایش‌های تجربی اعتبار بخشید. همچنین خطای ساخت و نصب بر رفتار برج اثر می‌گذارد و باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شود. با این وجود در خیلی از موارد، مدل‌های عددی پیشرفته، یک ابزار قدرتمند برای تحلیل برج‌های مشبک هستند و می‌توانند نیاز به آزمایش مقیاس واقعی را به طور بهینه کاهش دهند [۳۶].

حتی با مدل‌های پیشرفته، تعیین برخی ویژگی‌های برج‌های انتقال مانند ظرفیت نهایی^۵ و مد شکست^۶ دشوار است و اغلب به آزمایش تجربی نیاز می‌شود. از طرفی، در دهه‌های اخیر، رشته مهندسی عمران شاهد گسترش فناوری جدید آزمایش بوده است که این فناوری هر دو روش عددی و تجربی را شامل می‌شود. این فناوری که آزمایش ترکیبی^۷ نامیده می‌شود، آزمایش تجربی یک زیرسازه و اندرکنش آن حین آزمایش با مدل عددی سازه کامل را شامل می‌شود. این نوع از فناوری غالباً در تحلیل دینامیکی^۸ سازه‌ها و پل‌های متاثر از بار لرزه‌ای به کار می‌روند و یک روش تحلیل دینامیکی است اما می‌تواند با تحلیل استاتیکی^۹ هم وفق یابد [۳۶]. فناوری‌های جدید ارزیابی باید روش‌های ساده‌سازی مدلسازی، شبیه‌ساز ترکیبی و اعتبارسنجی فن مدلسازی با آزمایش‌های برج مقیاس واقعی را در برگیرند [۳۶]. در ادامه به مشکلات مدلسازی و تحلیل و طراحی در ارزیابی عملکرد سازه‌ها بطور خاص در خصوص برج‌های انتقال نیرو پرداخته می‌شود، همچنین با توجه به هزینه بالای آزمون‌های نوعی واقعی برج‌ها روش

¹ rotational stiffness

² bolt slippage

³ eccentricities at the connection

⁴ initial deformations

⁵ Ultimate capacity

⁶ Failure mode

⁷ Hybrid testing

⁸ Dynamic analysis

⁹ Static Analysis

فناوری آزمایش ترکیبی عددی- آزمایشگاهی برای برج ارائه می‌گردد و به جهت آشنایی بیشتر درخصوص اینگونه آزمون‌ها مثال کاملی از یک سازه جداسازی شده بیان می‌گردد.

۱-۵-۱-۱ مشکلات مدل سازی، تحلیل برج و اختلاف آن با رفتار واقعی

تحلیل برج‌های مشبک فولادی خط انتقال معمولاً با روش‌های ساده شده عددی و خطی انجام می‌شود. این روش‌های تحلیل که به وسیله طراحان سراسر دنیا استفاده می‌شوند به وسیله گروه CIGRE در سال ۱۹۹۱ و ۲۰۰۹ با آزمایش‌های تجربی سازه‌های نشانه مقایسه شدند [۳۷] [۳۸]. این اسناد نشان می‌دهند که نظریه‌های مورد استفاده مهندسان می‌توانند بر دقت نیروی پیش‌بینی شده در اعضای برج، خصوصاً اعضای قطری یا مهاربندها، اثر گذارند همچنین این اسناد نشان می‌دهند که این روش‌های مدل کردن برای هدف طراحی مناسب هستند چون نیرو در اعضا با بارگذاری زیاد می‌تواند با دقت بالا پیش‌بینی شود. به هر حال، رفتار واقعی برج‌های مشبک با اتصالات پیچی پیچیده‌تر است و ممکن است تحت اثر عوامل مختلف مانند سختی پیچشی اتصالات، لغزش پیچ، خروج از مرکزیت اتصالات، تغییر شکل اولیه اعضا و ... قرارگیرد. این پیچیدگی‌ها ممکن است باعث شکست‌های پیش‌بینی نشده در اعضا یا اتصالات برج شود [۳۶].

در این قسمت (۱) نوع اعضا، (۲) رفتار اتصالات و (۳) نوع تحلیل به کار رفته در مدلسازی عددی بررسی می‌شود.

۱-۵-۱-۱-۱ انتخاب اعضا:

به طور سنتی، برج‌های مشبک با محاسبات دستی تحلیل می‌شدند و به عنوان یک سیستم ساده خربایی دو بعدی در نظر گرفته می‌شدند. در تحلیل‌های عددی، این برج‌ها با اعضای خربایی که فقط نیروهای مقاوم کششی و فشاری داشتند، مدل می‌شدند. در حالی که در یک سیستم خربایی، چرخش در هر گره آزاد فرض می‌شود، سیستم‌های سه بعدی که واقعاً خربایی نیستند بر خلاف فرض مدلسازی دارای اعضای پیوسته نیز هستند که اتصالات مفصلی ندارند و این اختلاف می‌تواند باعث ناپایداری شود. راه حل رایج برای جلوگیری از این ناپایداری‌های عددی اضافه کردن اعضای غیرواقعی با سختی کم در قسمت‌های ناپایدار است تا مقادیر تپی در قطر ماتریس سختی حذف شود. راه حل دیگر که منعطف‌تر است و ویژگی‌های مدل کردن پیشرفته را دارد، استفاده از عضو تیر خصوصاً برای اعضا پیوسته می‌باشد. عضو تیر شامل درجه آزادی چرخشی می‌شود پس در برابر بارهای پیچشی و خمشی مقاومت می‌کند. این عضو می‌تواند در ترکیب با اعضای خربایی استفاده شود یا می‌توان کل سازه مشبک را با اتصالاتی که محدودیت کمی در برابر چرخش دارند، مدل کرد [۳۶]. یک مطالعه انجام شده به وسیله ازسیلوا و همکاران^۱ اختلافات چشمگیری در تنش‌های حداقل، فرکانس‌های طبیعی و بارهای کمانش حاصل از تحلیل برج‌های مشبک زمانی که از اعضای تیر و زمانی که از اعضای خربایی استفاده شده است، نشان می‌دهد [۳۹].

المان‌های پوسته‌ای و حجمی^۲ نیز برای مدل کردن برج‌های مشبک استفاده می‌شوند. این اعضا می‌توانند غیرخطی بودن هندسی و مواد را در محاسبات وارد کنند و پدیده تسلیم موضعی و کمانش محلی را در نظر می‌گیرد که با اعضای تیر ساده ممکن نیست. همچنین اعضای پوسته‌ای و حجمی قادر به ارزیابی دقیق تری از تنش و کرنش در

¹ da Silva et al.

² solid

موقعیت‌های بحرانی هستند. با این وجود، در زمینه سازه‌های مشبک بزرگ استفاده از این اعضا در مدلسازی همراه با در نظر گرفتن تعداد بسیار زیاد درجه آزادی و زمان محاسبه بسیار بالا است. از این رو، استفاده از این المان‌ها به کاربردهای خاص محدود است و قسمت‌های کوچکی از برج را شامل می‌شود [۳۶] [۴۰] [۴۱].

۱-۱-۵-۲ مدل کردن اتصالات:

به ندرت رفتار پیچیده‌ای که توسط اتصالات پیچی القا می‌شود در تحلیل‌هایی که به طور معمول طراحان برج انجام می‌دهند، در نظر گرفته می‌شود. اتصالات می‌توانند اثری چشمگیر روی رفتار سازه‌ای برج‌های مشبک داشته باشند و برای مطالعه بهتر، باید مهندسان این اثرات را در مدل عددی وارد کنند. این اثرات شامل موارد خروج از مرکزیت اتصال، لغزش پیچ و سختی چرخشی اتصالات می‌شود [۳۶].

خروج از مرکزیت اتصالات از این واقعیت ناشی می‌شود که اعضا در برج‌های مشبک، اغلب، فقط روی یک پایه متصل می‌شوند. این می‌تواند باعث لنگر خمشی^۱ در اعضا شود پس رفتار کمانش آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد یک راه ساده برای در نظر گرفتن این خروج از مرکزیت، اضافه کردن رابط‌های صلب^۲ بین نقطه مرکزی مقطع و نقطه اتصال است [۴۱]. به هر حال، تعریف خروج از مرکزیت دشوار است [۳۶].

لغزش پیچ اثر دیگری از اتصال است که در برج‌های مشبک دیده می‌شود. علت این لغزش این است که سوراخ‌های پیچ همواره کمی بزرگ‌تر از پیچ هستند تا عمل مونتاژ راحت‌تر شود و خطای ساخت در نظر گرفته شود. زمانی که یک نیروی برشی^۳ به اتصال پیچ شده اعمال شود اصطکاک پیچ برای جلوگیری از حرکت کافی نیست و اتصالات خواهند لغزید بنابراین جابه‌جایی بیشتری به گره‌های برج القا می‌شود و جابه‌جایی کلی برج افزایش می‌یابد [۳۶]. این اثر با جزئیات توسط کیتیپورنچای و همکاران مطالعه شده است [۴۲]. آن‌ها دریافتند که لغزش پیچ اثری چشمگیر بر جابه‌جایی برج دارد ولی اثر کمی روی ظرفیت نهایی برج‌ها دارد. جیانگ و همکاران^۴ مدل‌هایی را که در آن‌ها لغزش پیچ و خروج از مرکزیت اتصالات در نظر گرفته شده بود با آزمایش‌های برج با مقیاس واقعی مقایسه کردند [۴۳]. آن‌ها نشان دادند که در نظر گرفتن لغزش پیچ به پیش‌بینی جابه‌جایی کلی برج کمک می‌کند. همچنین دریافتند که در بعضی موارد ظرفیت نهایی تحت تاثیر اثرات اتصال است خصوصاً زمانی که بارهای قائم بزرگ اعمال شود که باعث اثرات مرتبه دوم ($P-\Delta$) چشمگیر می‌شوند.

از آن جا که رفتار لغزش پیچ، لزوماً، به راحتی ارزیابی نمی‌شود روشی در دانشگاه ازسبروک توسعه داده شده است که بر مبنای ارزیابی لغزش پیچ برای یک پیچ تنها با معادله تجربی رکس و استرلینگ^۵ است [۴۴]. فنرهای غیرخطی که برای مدل کردن اتصالات استفاده می‌شوند رفتاری مانند شکل ۱-۴۱ دارند. سپس این فنرها در یک مدل اتصال چند پیچی ساخته شده از اعضای پوسته‌ای معرفی می‌شوند. خروجی این مدل، متعاقباً، برای شناسایی ویژگی‌های

¹ bending moments

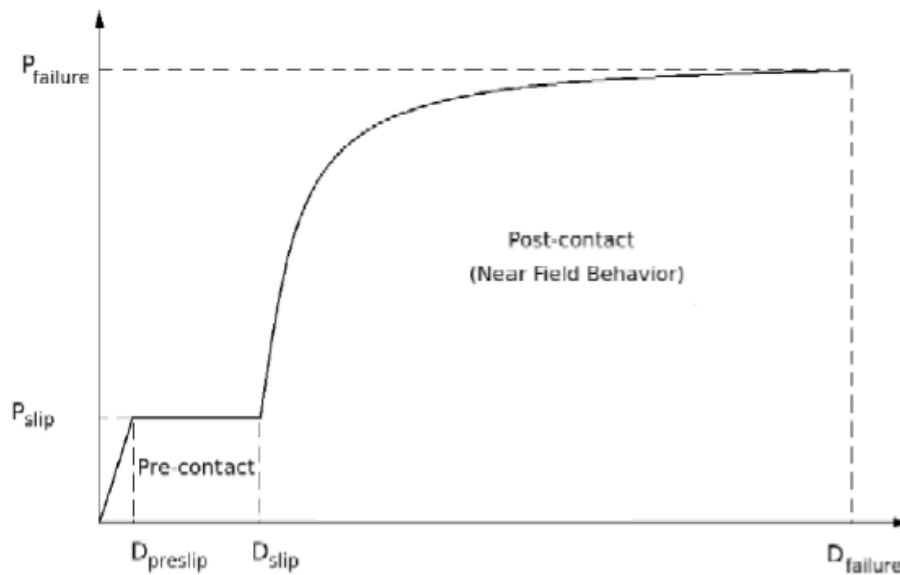
² Rigid links

³ shear load

⁴ Jiang et al.

⁵ Rex and Easterling

یک فنر غیرخطی جدید که دارای رفتار مشابه با فنرهای تک پیچ است، استفاده می‌شود ولی رفتار اتصال کلی را ارائه می‌کند. این شیوه به ساده کردن مدل به اعضای تیر همراه با یک فنر غیرخطی در هر انتهای عضو کمک می‌کند [۳۶].



شکل ۱-۴۱ رفتار تئوری اتصال پیچی تحت نیروی کششی [۴۴].

همان طور که قبلاً گفته شد، اعضا به طور معمول کاملاً مفصلی یا پیوسته در نظر گرفته می‌شوند که معمولاً اتصالات چند پیچی پیوسته و اتصال تک پیچی مفصلی در نظر گرفته می‌شود. در واقعیت سختی چرخشی ممکن است برای انواع مختلف اتصالات و حول سه محور اتصال متفاوت باشد. این سختی چرخشی می‌تواند اثر چشمگیری بر مد کمانش^۱ داشته باشد [۳۶]. سختی چرخشی می‌تواند به وسیله آزمایش‌های تجربی یا مدل‌های اجزا محدود به دست آید. مثلاً بوجارد سختی چرخشی اتصالات برج معمولی را با یک مدل عددی تشکیل شده از المان‌های حجمی ارزیابی کرد سپس سختی چرخشی حاصل را به عنوان ورودی برای اعضای فنر چرخشی اضافه شده در اتصالات یک مدل با اعضای تیر استفاده کرد [۴۱]. نتایج یک تحلیل کمانش روی این مدل نشان می‌دهد که نیروی کمانش به سختی چرخشی بسیار حساس است.

۳-۱-۵-۱-۱ تحلیل استاتیکی:

بسیاری از انواع بارگذاری روی خطوط انتقال مانند باد، ریزش یخ و نیروی رساناهای شکسته در واقعیت دینامیکی هستند اما اثرات آن‌ها، اغلب، در تحلیل‌های استاتیکی با روش شبه استاتیکی ارزیابی می‌شوند. باید توجه شود که روش‌های استفاده شده برای ارزیابی نیروهای داخلی باید با روش استفاده شده برای ارزیابی مقاومت اعضا مطابقت داشته باشد روش استاندارد طراحی از معادلات مقاومت استفاده می‌کند که این معادلات فقط نیروی محوری را در نظر می‌گیرند و مطابق مدل خرپا، نیروهای داخلی فقط کششی و فشاری هستند پس طراح باید با دقت اهمیت

¹ Buckling mode

لنگر خمشی را که با مدل عددی ساخته شده از اعضای تیر پیش‌بینی می‌شود ارزیابی کند. هدف مطالعات عددی پیشرفته، اغلب، ارزیابی مقاومت به طور مستقیم با مدل است پس از این نوع ملاحظه جلوگیری می‌شود [۳۶].

معمولاً در طراحی از تحلیل خطی استفاده می‌شود. به هر حال، در زمینه مطالعه عددی پیشرفته بیشتر از تحلیل غیرخطی استفاده می‌شود. یک دلیل انتخاب تحلیل غیرخطی، در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی، یعنی جابه‌جایی‌های بزرگ سازه، است. یک تحلیل غیرخطی با تکرار مطمئن می‌شود که ماتریس سختی مورد استفاده نماینده سازه در وضعیت تغییرشکل یافته خود است و نیروها نیز در حال تعادل هستند. با توجه به سختی برج و نیرو اعمال شده، در نظر گرفتن جابه‌جایی‌های بزرگ می‌تواند به ارزیابی غیرمحافظة کارانه نیروهای داخلی منجر شود. توجه به جابه‌جایی‌های بزرگ خصوصاً برای شبیه‌سازی عددی کمانش یک عضو برج حیاتی است از آن جا که ناپایداری ناشی از اثر مرتبه دوم ایجاد می‌شود. یک تحلیل غیرخطی همچنین ادغام غیرخطی مواد را یعنی تغییر در منحنی تنش - کرنش که حین تسلیم اجزای فولادی مشاهده می‌شود، ممکن می‌کند. زمانی که رفتار غیرخطی مواد در نظر گرفته می‌شود یک تحلیل استاتیکی افزایشی^۱ برای نگه داشتن مسیر تغییرات در ویژگی‌های مواد نیاز است. در زمینه تحلیل غیرخطی برج انتقال به کارهای آلبرمانی و همکاران^۲ [۴۵] و لی و مک کلور [۴۶] می‌توان اشاره کرد [۳۶].

کمپنر و همکاران^۳ روش‌های تحلیل پیشرفته و نرم‌افزارهای استفاده شده خصوصاً برای برج‌های مشبک را در مقاله‌ای مرور کردند [۴۷]. برنامه *AK TOWER* یک نرم‌افزار توسعه‌یافته به وسیله آلبرمانی و کیتیپورنچای است که از تحلیل غیرخطی مواد و هندسی برای شبیه‌سازی رفتار سازه‌ای نهایی برج‌های مشبک استفاده می‌کند. همچنین برنامه *MORENA* که در برزیل توسعه‌یافته است، امکان تحلیل غیرخطی را فراهم می‌کند و می‌تواند مطالعات احتمالی روی مقاومت اعضا را در برگیرد. برنامه *LIMIT* که به وسیله مدیریت قدرت بونویل^۴ توسعه داده شده است، تحلیل مرتبه اول انجام می‌دهد اما سختی پس از کمانش اعضای برج مشبک از طریق یک روش سکانتی در نظر گرفته می‌شود. امتیاز این نوع نرم‌افزار این است که که ابزار تسهیل ورود هندسه برج، مقطع و جهت اعضا و خروج از مرکزیت را شامل می‌شود. نرم‌افزارهای کلی مانند *ANSYS*، *ADINA* یا *Code_Aster* نیز می‌توانند برای انجام تحلیل پیشرفته استفاده شوند. به هر حال، در این نرم‌افزارها مدل کردن هندسه و مش‌بندی یک برج کامل دشوار است. در دانشگاه ازسبروک از *Code_Aster* استفاده شده است چون امکان گسترش ابزار پیش‌پردازشی برای بالا بردن سرعت مدل کردن را فراهم می‌کند [۳۶].

نوع دیگر تحلیل‌ها که گاهی روی برج‌های مشبک انجام می‌شود تحلیل خطی کمانش^۵ نامیده می‌شود که نیرو را در محل‌هایی که امکان کمانش الاستیک وجود دارد محاسبه می‌کند. برای مثال، این نوع از تحلیل به وسیله ازسیلوا و همکاران انجام شده است [۳۹]. می‌توان خروج از مرکزیت اتصال و سختی چرخشی را در محاسبه نیروی کمانش

¹ incremental static analysis

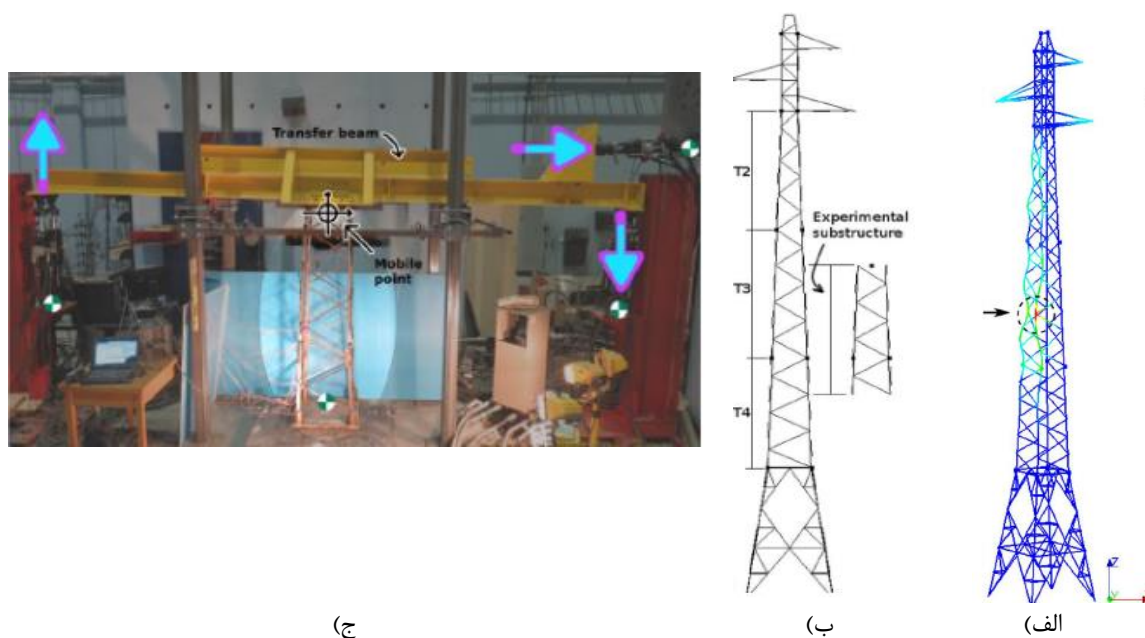
² Albermani et al.

³ Kempner et al.

⁴ Bonneville Power Administration

⁵ linear buckling analysis

در نظر گرفت. به هر حال، این روش مستقیماً برای محاسبه مقاومت اعضا نمی‌تواند استفاده شود زیرا اثرات کمانش موضعی و کمانش الاستوپلاستیک اعضا را در نظر نمی‌گیرد. بوچارد برای ارزیابی مقاومت از این روش در ترکیب با معادلات طراحی آیین‌نامه‌ها استفاده کرد [۴۱]. یک مثال از شناسایی مد کمانش یک برج در شکل ۴۲-۱ قسمت الف نشان داده شده است [۳۶].



شکل ۴۲-۱ الف) شناسایی مد کمانش یک برج [۴۱]، ب) ارزیابی یک زیرسازه تجربی برای شبیه‌سازی ترکیبی [۴۸]، ج) تنظیمات آزمایش برای شبیه‌سازی ترکیبی [۴۸].

امتیازات اصلی این روش، زمان محاسبه کم و ارزیابی دقیق‌تر بار کمانش الاستیک است. روش دیگر، ترکیب تحلیل کمانش با تحلیل استاتیکی پوش آور است. در این مورد، مد یا مدهای مطلوب که در تحلیل کمانش شناسایی می‌شوند می‌توانند به عنوان پیش تغییرشکل مدل در تحلیل پوش آور^۱، با توجه به خطای ساخت، استفاده شود. این موضوع می‌تواند در یک تحلیل غیرخطی امکان شبیه‌سازی مدهای کمانشی را فراهم کند که فقط در صورت وجود تغییرشکل اولیه در عضو در یک سطح مشخصی از بار شروع شود [۳۶].

^۱ push-over analysis

۴-۱-۵-۱-۱ تحلیل دینامیکی:

اولین مدل اجزا محدود برای مطالعه پدیده شکست ناشی از خرابی رسانا به وسیله توماس و پیروت^۱ انجام شد [۴۹]. برای این مطالعه، مک کلور و لاپوینت^۲ از یک نرم‌افزار تجاری استفاده و مدل سازه را دقیق‌تر تعریف کردند [۵۰]. کمپنر نیز از یک مدل دینامیکی به همراه آزمایش‌های تجربی در مقیاس کوچک استفاده کرد تا یک فلسفه طراحی برای مهار شکست را ارزیابی کند [۵۱]. دغدغه اصلی روش‌های عددی موجود این است که آیا می‌توانند برای ایجاد مدل سازی رفتار دینامیکی خطوط انتقال در موارد وقایع خرابی رسانا استفاده شوند [۵۲]. تحلیل دینامیکی می‌تواند برای مطالعه اثرات باد، فروریختن یخ استفاده شود [۳۶].

بیشتر ملاحظات مورد بحث برای تحلیل استاتیکی در تحلیل دینامیکی نیز کاربرد دارد. در تحلیل‌های دینامیکی باید دقت ویژه جهت ارزیابی صحیح توزیع جرم، سختی و میرایی سازه به کار رود، خصوصاً ارزیابی میرایی دشوار است، [۵۳] [۵۴]. معمولاً یک گام میانی در انجام یک تحلیل دینامیکی محاسبه فرکانس و شکل مد سیستم است. این گام به اعتبارسنجی رفتار دینامیکی سازه کمک می‌کند. گاهی، جمع مودال برای ارزیابی پاسخ سازه به بارگذاری دینامیک استفاده می‌شود در حالی که این روش به تحلیل خطی محدود است. روش‌هایی مثل *Newmark* یا *HHT-alpha* برای تحلیل غیرخطی استفاده می‌شوند لیکن در مسائل غیرخطی محاسبات فشرده‌ای دارند (گاهی باعث تعداد تکرار زیاد در گام زمانی می‌شوند) و تعداد درجات آزادی زیادی در نظر می‌گیرند بنابراین در مورد تحلیل غیرخطی، معمولاً، به ساده‌سازی برج و تمرکز بر رفتار کلی دینامیکی برج و سیستم خط انتقال توصیه می‌شود. به دلیل وجود اندرکنش بین کابل و سازه در تحلیل دینامیکی کابل‌ها را در نظر می‌گیرند. از آن جا که تحلیل کابل به در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی نیاز دارد تحلیل دینامیکی غیرخطی، تقریباً همواره، برای مطالعه رفتار دینامیکی خطوط انتقال استفاده می‌شود. رفتار غیرخطی مواد معمولاً فقط زمانی استفاده می‌شود که مطالعه رفتار انعطاف‌پذیر کابل‌ها بررسی شود [۳۶].

۵-۱-۵-۱-۱ شبیه‌سازی ترکیبی

از آن جا که حتی با مدل‌های پیشرفته، تعیین برخی ویژگی‌های برج‌های انتقال مانند ظرفیت نهایی و مد شکست دشوار است و به علت وجود برخی پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌ها، برای تایید صلاحیت طراحی جدید برج‌های انتقال مشبک و فولادی، اغلب، به آزمایش تجربی مقیاس واقعی نیاز می‌شود. این آزمایش‌ها گران هستند و ساخت خط انتقال را به تاخیر می‌اندازند. از طرفی، در دهه‌های اخیر، رشته مهندسی عمران شاهد گسترش فناوری جدید آزمایش بوده است که این فناوری هر دو روش عددی و تجربی را شامل می‌شود. این فناوری که آزمایش ترکیبی نامیده می‌شود، آزمایش تجربی یک زیرسازه و اندرکنش آن حین آزمایش با مدل عددی سازه کامل را شامل می‌شود. این نوع از فناوری غالباً در تحلیل دینامیکی سازه‌ها و پل‌های متاثر از بار لرزه‌ای به کار می‌روند و یک روش تحلیل دینامیکی است اما می‌تواند با تحلیل استاتیکی هم وفق یابد. معمولاً، یک قسمتی از سازه در آزمایشگاه آزمایش می‌شود و باقی سازه در مدل عددی در نظر گرفته می‌شود. در گام زمانی اول، یک نیرو در مدل عددی اعمال

¹ Thomas and Peyrot

² McClure and Lapointe

می‌شود. مدل یک جابه‌جایی در محل اتصال با زیرسازه تجربی، خروجی می‌دهد. این جابه‌جایی در آزمایشگاه به آن بخش از سازه که در آزمایشگاه تحت آزمون قرار دارد اعمال می‌شود و سپس نیروهای بازایی حاصل به مدل ارسال می‌شوند سپس مرحله دوم انجام می‌شود و این روند تا پایان توالی بارگذاری ادامه می‌یابد. برای اجتناب از تعداد تکرار بسیار بین مدل عددی و مدل فیزیکی از یک طرح ادغام صریح استفاده می‌شود [۳۶].

در کارهای دانشگاه ازشربروک، فناوری ترکیبی برای برج‌های مشبک استفاده شد تا مدهای کمانش و ظرفیت نهایی را ارزیابی کند. ابتدا برای شناسایی یک زیرسازه، از تحلیل کمانش و تحلیل استاتیکی برج کامل استفاده شد تا مدها و ظرفیت حاصل از مدل عددی کامل برای زیر سازه به دست آید (شکل ۱-۴۲ قسمت ب). سپس آزمایش‌های ترکیبی روی قسمتی از برج مشبک در آزمایشگاه انجام شد و قسمت‌های باقی‌مانده برج به صورت عددی مدل شد. در نهایت، آزمایش‌های تجربی روی برج کامل انجام شد تا به عنوان یک نقطه اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترکیبی عمل کند. تمام تحلیل‌ها (عددی، ترکیبی، تجربی) بر روی سازه مقیاس شده برج انتقال که با مقیاس هندسی ۱:۴ کوچک شده بود انجام شد. شکل ۱-۴۲ ج تنظیمات اعمال جابه‌جایی و سنجش نیروی مقطع برج را در آزمایشگاه نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های ترکیبی به نتایج آزمایش‌های تجربی برج کامل، نزدیک بوده است. دانشگاه ازشربروک به گسترش و ارزیابی روش آزمایش ترکیبی ادامه می‌دهد و انتظار دارد که آزمایش‌های ترکیبی جایگزین مدل‌های عددی پیشرفته و آزمایش مقیاس واقعی شود [۳۶].

۶-۱-۵-۱-۱ مثال شبیه‌سازی ترکیبی سازه جداشده لرزه‌ای:

در یک برنامه تحقیقاتی روشی برای شبیه‌سازی ترکیبی در زمان واقعی برای سازه جداشده لرزه‌ای پیشنهاد شد که در ادامه تشریح می‌شود [۵۵].

پاسخ دینامیکی سازه جداشده لرزه‌ای به ترکیب ویژگی‌های حرکت زمین، تکیه‌گاه^۱ها و روسازه^۲ بستگی دارد از این‌رو آزمایش دینامیکی مقیاس واقعی سازه‌های جداشده تحت شرایط بارگذاری دینامیکی واقعی برای اعتبارسنجی کلی این روش کنترل لرزه‌ای مطلوب است. علاوه بر این، ویژگی‌های تکیه‌گاه‌ها و رفتار نهایی آن‌ها، به شدت، به نرخ بارگذاری و اثرات اندازه مقیاس، خصوصاً در بارگذاری زیاد، وابسته است. امکانات آزمایشگاهی کمی می‌توانند تکیه‌گاه‌های جداسازی لرزه‌ای مقیاس واقعی را تحت پروتکل‌های بارگذاری و یا جابه‌جایی‌های مدنظر آزمایش کنند. شبیه‌سازی ترکیبی در نرخ زمان واقعی یا نزدیک به زمان واقعی یک روش موثر و اقتصادی برای آزمایش سازه جداشده لرزه‌ای است. این روش زیرسازه‌های تجربی را که نماینده اجزا بحرانی با رفتار غیرخطی پیچیده هستند با مدل‌های تحلیلی باقی سیستم سازه‌ای ترکیب می‌کند. در دو دهه گذشته، تحقیقات زیادی برای گسترش شیوه جبران تاخیر و طرح‌های زمان پیوسته انجام شد تا معضل ناپایداری کاهش یابد و دقت آزمایش را در شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی بهبود دهند [۵۶] [۵۷] [۵۸] [۵۹] [۶۰] [۶۱]. در مطالعه‌ای که توسط ساربان‌ها و همکاران^۳

¹ bearing

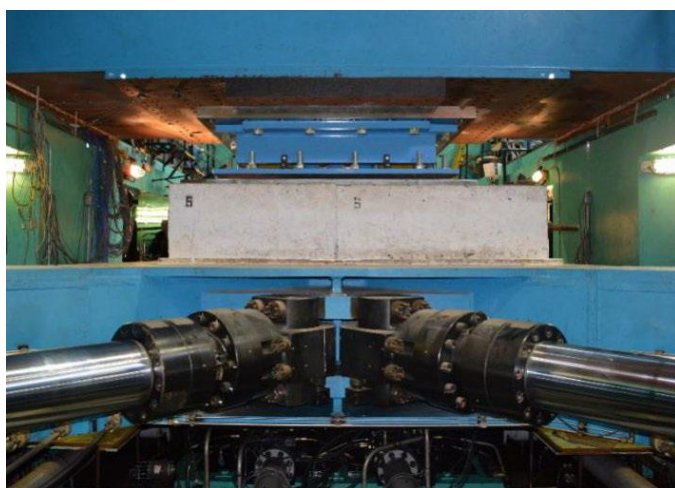
² Super structure

³ Sarebanha and et al.

بر چالش‌های پیش‌رو در دستیابی به نتایج شبیه‌سازی قابل اعتماد برای آزمایش‌های دینامیکی تمام مقیاس انجام شد، تلاش شد تا یک دستگاه آزمایش تکیه‌گاه تمام مقیاس برای شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی هم آهنگ گردد. این شبیه‌سازی ترکیبی پیشرفته زمان واقعی از جمله اولین شبیه‌سازی‌هایی است که از محاسبات موازی با کارایی بالا برای اجرای سریع تحلیل‌های عددی مدل پیچیده با تعداد زیاد درجات آزادی استفاده می‌کند. چالش‌ها در تنظیمات آزمایشگاهی شامل نیروهای اندازه‌گیری شده همراه با تاخیر و سایر خطاهای سیستم کنترلی در اعمال جابه‌جایی‌های مورد نظر است. نیروهای داخلی و اصطکاکی که به وسیله دستگاه بارگذاری بزرگ مقیاس تولید می‌شوند، می‌توانند بر دقت بازخورد نیرو سنجیده شده اثر گذارند. برای کسب نتایج قابل اعتماد از شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی به اجرای الگوریتم‌های جبران‌کننده و تصحیح منابع مختلف خطا نیاز است. برنامه تحقیقاتی مورد بررسی، تاکید می‌کند که شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی، یک روش مناسب برای ارزیابی تجربی رفتار جداگرهای تمام مقیاس است [۵۵].

ابزار اصلاح پاسخ لرزه‌ای ($SRMD^1$):

تجهیزات آزمایش $SRMD$ در دانشگاه کالیفرنیا^۲، سان دیاگو^۳، در شکل ۱-۴۳ نشان داده شده است [۵۵].



(ب)



(الف)

شکل ۱-۴۳: تجهیزات آزمایش $SRMD$: (الف) دید کلی و (ب) تکیه‌گاه نصب شده [۵۵].

این تجهیزات برای تعیین ویژگی دینامیکی شش درجه آزادی جداساز و میراگرها تمام مقیاس طراحی و ساخته شده است. ظرفیت تجهیزات آزمایش $SRMD$ در جدول ۱-۲ آمده است [۶۲].

¹Seismic Response Modification Device, ($SRMD$)

² California

³ San Diego

جدول ۱-۲: ویژگی‌های فنی دستگاه SRMD [۶۲].

مولفه	ظرفیت نیرو	ظرفیت جابه‌جایی	ظرفیت سرعت
راستای قائم	۵۳۴۰۰ (کیلو نیوتن)	۰/۱۲۷ (متر)	۲۵۴ (میلی متر بر ثانیه)
راستای طولی	۸۹۰۰ (کیلو نیوتن)	۱/۲۲ (متر)	۱۷۷۸ (میلی متر بر ثانیه)
راستای جانبی	۴۴۵۰ (کیلو نیوتن)	۰/۶۱ (متر)	۷۶۲ (میلی متر بر ثانیه)
چرخش		۲ (درجه)	

تجهیزات SRMD برای اجرای شبیه‌سازی ترکیبی سه نوع جداساز لرزه‌ای تمام مقیاس مختلف به همراه مدل عددی سازه نیروگاه هسته‌ای که جدا سازی لرزه‌ای شده است مورد استفاده قرار گرفت [۵۵].

شبیه‌سازی ترکیبی با استفاده از SRMD:

اگر چه SRMD در ابتدا با هدف اجرای شبیه‌سازی ترکیبی طراحی نشده بود، نرم‌افزار و اجزای سخت‌افزاری مختلفی را شامل می‌شود که این امر را امکان‌پذیر می‌کند. شبیه‌سازی ترکیبی نیاز دارد که اجزای سخت‌افزاری قابل تنظیم بین درایور محاسباتی^۱ که معادلات حرکت مدل ترکیبی را حل می‌کند با کنترل‌کننده در آزمایشگاه که زیر مجموع تجربی را بارگذاری می‌کند، ارتباط برقرار کنند. برای آزمایش تکیه‌گاه تمام مقیاس مورد بحث در این مقاله، مدل ترکیبی با سیستم کنترل SRMD ارتباط برقرار می‌کند تا سیگنال‌های فرمان را بفرستد و سیگنال‌های بازخورد اندازه‌گیری شده را دریافت کند. برای آزمایش زمان واقعی ارتباط باید سریع و قابل اعتماد باشد. محدودیت‌های عملکرد مانند ردیابی عملگر، تأخیر عملگر و سرعت ارتباطات نرخ قابل حصول آزمایش را تعیین می‌کنند [۵۵].

پیکربندی نرم‌افزار:

مدل پیچیده مورد استفاده در شبیه‌سازی ترکیبی ارائه شده در این جا، به مولفه‌های نرم‌افزاری جامع و حل‌کننده‌های سریع محاسبات نیاز دارد تا برای پیاده‌سازی یک شبیه‌سازی نرم^۲، به طور پیوسته با آزمایش ارتباط برقرار کند. مولفه‌های اصلی نرم‌افزار در زیر آورده شده است [۵۵].

^۱ computational driver

^۲smooth

راهکارهای توسعه داده شده در این پروژه شامل ایجاد نرم‌افزار درایور محاسباتی چند پردازنده و نرم‌افزار میان‌افزار *OpenFresco* به روز شده، است [۵۵].

OpenSees و *OpenSeesSP*:

OpenSees به عنوان درایور محاسباتی با استفاده از یک دامنه وسیعی از مدل‌های مواد، اعضا و الگوریتم‌های حل در شبیه‌سازی ترکیبی ظرفیت‌های پیشرفته را برای مدل کردن و تحلیل پاسخ غیرخطی سیستم سازه‌ای فراهم می‌کند. *OpenSees* برای محاسبه موازی (*OpenSeesSP*) طراحی می‌شود تا امکان شبیه‌سازی موازی را در سیستم عامل‌های محاسباتی با کارایی بالا، ایجاد کند [۶۳]. در شبیه‌سازی ترکیبی *OpenSeesSP* توسعه مدل‌های غیرخطی پیچیده‌تر با تعداد درجات آزادی بیشتر را ممکن می‌کند و نرخ اجرا را سریع‌تر می‌کند. نرخ آزمایش در شبیه‌سازی ترکیبی به زمان محاسبات مدل عددی و نرخ قابل حصول بارگذاری تسهیلات آزمایش بستگی دارد [۵۵].

توسعه حل کننده مستقیم موازی انبوهی چند وجهی (*MUMPS*¹) در *OpenSeesSP* سرعت حل سیستم معادلات ترکیبی مورد بررسی در مقاله را به طور چشمگیر افزایش داد [۶۴]. میان‌افزاری که در ادامه توضیح داده خواهد شد، به راحتی نرم‌افزار را برای شبیه‌سازی ترکیبی وفق‌پذیر می‌کند [۵۵].

OpenFresco:

میان‌افزار *OpenFresco* برای اتصال یک مدل اجزا محدود به سخت‌افزار آزمایشگاهی، در این مورد سیستم اکتساب داده و کنترل *SRMD*، استفاده می‌شود [۶۵]. یک عضو تکیه‌گاه آزمایشگاهی جدید در *OpenFresco* که قادر است سه درجه آزادی چرخشی و سه درجه آزادی انتقالی را به زیرسازه آزمایشگاهی انتقال دهد برنامه‌ریزی شد. به علاوه، این عنصر تکیه‌گاه آزمایشگاهی جدید امکان انتقال تغییر شکل یا نیروی محوری به نمونه آزمایش را فراهم می‌کند. [۵۵].

الگوریتم پیش‌بین - اصلاح‌کننده^۲ زمان واقعی:

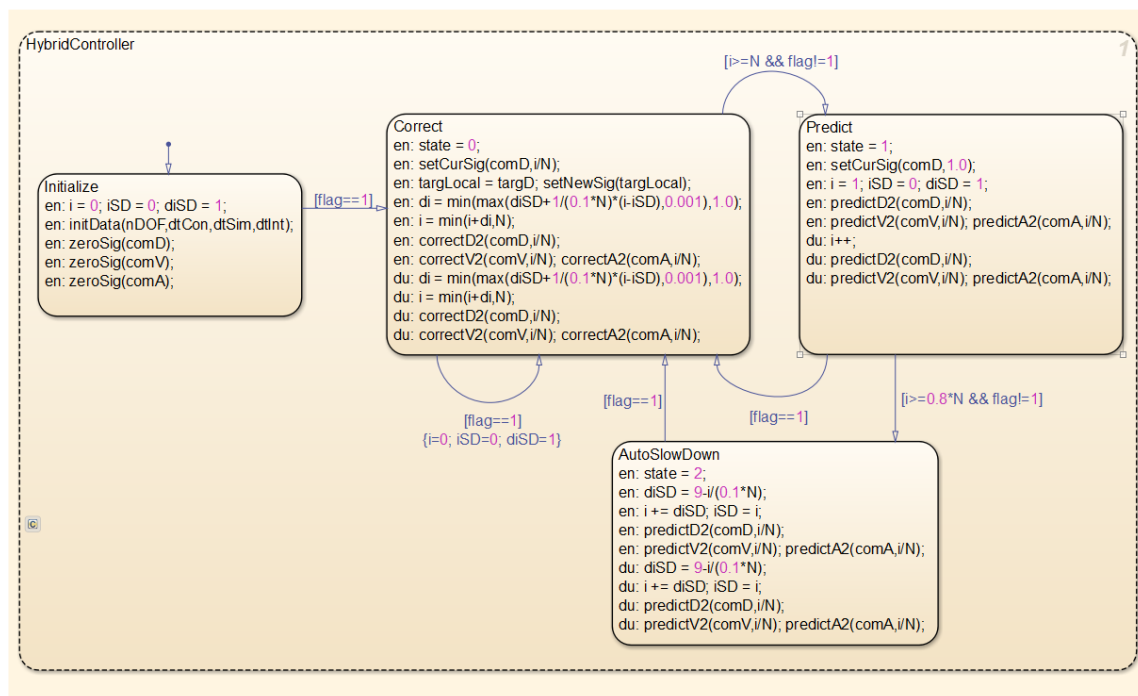
سیستم کنترل *SRMD* با سرعت ۱۰۰۰ هرتز کار می‌کند، فرمان‌های عملگر را به روز می‌رساند و سیگنال‌های بازخورد از حسگرها که جابه‌جایی فعلی و وضعیت نیروی صفحه بزرگ فلزی را اندازه‌گیری می‌کنند، به دست می‌آورد. برای کنترل و حرکت نرم صفحه بزرگ فلزی، فرمان‌ها به عملگرها از مدل ترکیبی باید با سرعت یکسان به روز شوند. به هر حال، اغلب قسمت عددی شبیه‌سازی ترکیبی در یک محیط زمان واقعی پیاده‌سازی نمی‌شود پس می‌تواند به زمان محاسبه متغیر نیاز داشته باشد که به طور تصادفی از زمان مجاز برای محاسبه مقادیر هدف جدید سیستم کنترل تجاوز می‌کند. بنابراین، یک الگوریتم پیش‌بین - اصلاح‌کننده زمان واقعی برای تولید

¹Multifrontal Massively Parallel sparse direct Solver, (MUMPS)

² predictor-corrector

سیگنال‌های فرمان به روز شده در همان نرخ فرکانس سیستم کنترلی به کار گرفته شده است در حالی که می‌تواند اهداف جابه‌جایی را از مدل عددی با یک نرخ فرکانسی متفاوت دریافت کند [۵۵].

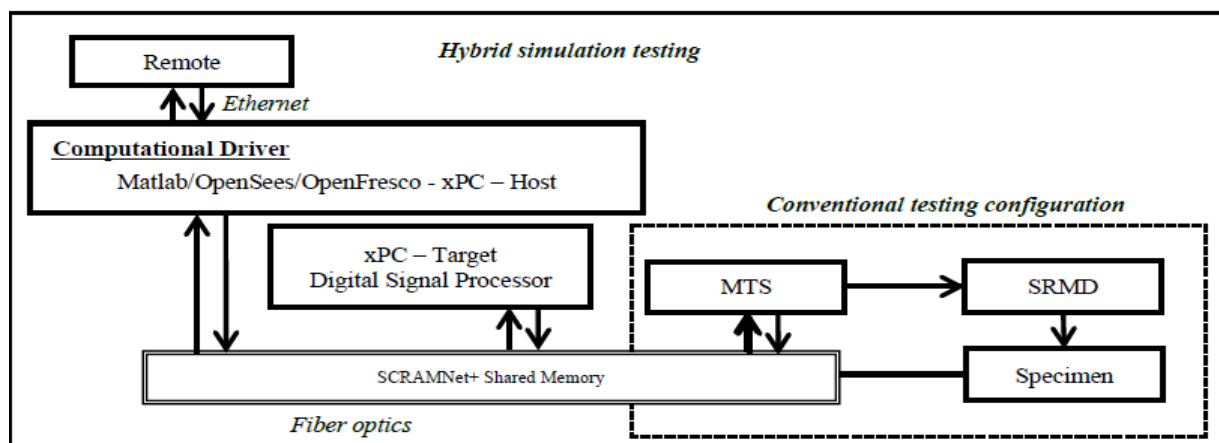
الگوریتم پیش‌بین - اصلاح کننده در نرم‌افزار متلب مطابق شکل ۱-۴۴ شبیه‌سازی شده است [۶۶] [۶۷] [۶۸] و سپس در $xPC - Target^1$ در زمان واقعی اجرا شد. یک چند جمله‌ای به جابه‌جایی دریافت شده از مدل ترکیبی برازش شده است تا یک سیگنال فرمان پیوسته در نرخ مطلوب تولید کند. مرتبه چند جمله‌ای لاگرانژ برازش شده می‌تواند به آسانی در نمودار کدگذار $flow^2-state$ قبل از اجرای آزمایش ترکیبی تغییر داده شود (شکل ۱-۴۵) [۵۵].



شکل ۱-۴۴: الگوریتم پیش‌بین - اصلاح کننده در متلب [۶۷].

¹**xPC Target** is a host-**target** solution for prototyping, testing, and deploying real-time systems using standard PC hardware. It is an environment that uses a **target** PC, separate from the host PC, for running real-time applications.

² **Stateflow** is generally used to specify the discrete controller in the model of a hybrid system where the continuous dynamics (i.e., the behavior of the plant and environment) are specified using **Simulink**.



شکل ۱-۴۵: پیکر بندی سخت‌افزار شبیه‌سازی ترکیبی [۵۵].

وضعیت‌های پیش‌بین - اصلاح‌کننده برای تمام آزمایش‌های ترکیبی در فاصله گام زمانی شبیه‌سازی ۱۰ میلی‌ثانیه دیده‌بانی و ضبط شد. هیچ‌کندی مشاهده نشده و به طور متوسط الگوریتم pc ، ۳ میلی‌ثانیه پیش‌بینی و ۷ میلی‌ثانیه اصلاح انجام داد از این‌رو اجرای زمان واقعی انجام شد [۵۵].

پیکربندی سخت‌افزار:

در کل، یک شبیه‌سازی ترکیبی به یک درایور محاسباتی برای حل معادلات حرکت مدل ترکیبی نیاز دارد. ارتباط پیوسته فرمان‌ها و بازخورد با کنترل‌گر $SRMD$ مطابق شکل ۱-۴۵ حاصل شد. معماری یک درایور محاسباتی، سیستم کنترل $SRMD$ و پردازنده سیگنال دیجیتال زمان واقعی را که از طریق $SCRAMNet+$ ارتباط برقرار می‌کند، شامل می‌شود. کنترل‌گر $SRMD$ به روش مشابه برای آزمایش دینامیکی رفت و برگشتی مرسوم استفاده می‌شود با این تفاوت که به جای تهیه یک سیگنال بارگذاری از پیش تعریف شده، دستورات جابه‌جایی طولی و جانبی و فرمان نیروی قائم، سیگنال‌های مرجع خارجی هستند که با مدل عددی محاسبه می‌شوند. در شکل‌گیری اصلی، سیستم کنترل $SRMD$ فقط می‌تواند سیگنال‌ها را از طریق کانال‌های ورودی / خروجی آنالوگ دریافت کند و بفرستد [۶۱]. برای دستیابی به آزمایش زمان واقعی و حذف مشکلات موجود در هماهنگ‌سازی، تاخیرها و نویز که به وسیله تبدیل‌های دیجیتال به آنالوگ و عکس آن ایجاد می‌شود، سیستم کنترل $SRMD$ به وسیله یک $SCRAMNet+$ ارتقا داده شده که ارتباط دیجیتالی کامل را فراهم می‌کند پس تبدیل‌های دیجیتال به آنالوگ و عکس آن را حذف می‌کند، [۵۵].

DSP برای تولید سیگنال زمان واقعی:

برای تولید سیگنال‌های زمان واقعی برای سیستم کنترل *SRMD* از *Simulink* زمان واقعی استفاده شد [۶۸]. در این محیط مدل‌سازی میزبان-هدف با کارایی بالا، رایانه میزبان^۱ مدل تحلیل عددی را اجرا می‌کند در حالی که رایانه هدف *real^۲-time kernel^۳* را اجرا می‌کند که اساساً یک رایانه معمولی را به یک پردازنده سیگنال دیجیتال تبدیل می‌کند که در زمان واقعی عمل می‌کند. طی یک شبیه‌سازی ترکیبی، سیگنال‌های کنترل دیجیتال در مکان‌های حافظه از قبل اختصاص یافته در حلقه حافظه *SCRAMNet+* نوشته شده و تقریباً در لحظه در دسترس سیستم کنترل *SRMD* قرار می‌گیرند تا پردازش شوند. این سیگنال‌های کنترل دیجیتال به وسیله الگوریتم پیش‌بین-اصلاح‌کننده که بر روی *Target-xPC* اجرا می‌شود، تولید می‌شوند. هر تغییر ایجادشده در حافظه توسط هر رایانه‌ای در شبکه در تمام رایانه‌های موجود ظرف نانو ثانیه تکثیر می‌شود [۶۹]. یک نقشه حافظه برای اختصاص بخش‌های تعلق یافته حافظه به خواندن و نوشتن اطلاعات از گره‌های کنترل‌گر *SRMD* و *xPC* در *SCRAMNet+* از پیش تعریف شده است [۵۵].

سیستم کنترل *SRMD*:

SRMD نیروها را از طریق یک صفحه بزرگ فلزی که به وسیله حرکت عملگرهایی کنترل می‌شود، اعمال می‌کند. کنترل‌گر دیجیتالی زمان واقعی امکان کنترل حلقه بسته و ۶ درجه آزادی سیستم حرکت را فراهم می‌کند که شامل انتقال‌های قائم، جانبی و طولی و چرخش حول محور قائم^۴، چرخش حول محور طولی^۵ و چرخش حول محور عرضی^۶ می‌شود. اساساً این تسهیلات برای اعمال جابه‌جایی‌های بزرگ در سرعت نسبی بالا و بار محوری زیاد بر وسایل جداسازی لرزه‌ای طراحی شدند. هر عملگر با استفاده از یک سیستم کنترل حلقه بسته چند مرحله‌ای کنترل می‌شود که حلقه درونی دریچه‌های پاپت^۷ را برای جریان روغن داخل عملگرها کنترل می‌کند و حلقه بیرونی جابه‌جایی‌های عملگر را کنترل می‌کند. مجموعه دریچه پاپت چهار مرحله‌ای به جای رایج‌ترین شیرهای سرو^۸ چند مرحله‌ای که معمولاً در آزمایش سازه‌ای به کار می‌روند، استفاده می‌شوند. این دریچه‌ها قادرند تا حجم بالایی از جریان روغن مورد نیاز برای تسهیل حرکت سریع عملگرها را با دقت بیشتر حاصل کنند. این مسئله ویژه شبیه‌سازی ترکیبی است چون خطای کنترل جابه‌جایی می‌تواند از طریق مدل عددی منتشر شود و منجر به ناپایداری شود. به

¹ host computer: Main or controlling computer connected to other computers or terminals to which it provides data or computing services via a **network**. It is similar to a server in a client-server architecture.

²target computer

³ A real-time kernel is software that manages the time of microprocessor to ensure that time-critical events are processed as efficiently as possible. The use of a kernel simplifies the design of embedded systems because it allows the system to be divided into multiple independent elements called tasks.

⁴ Yaw rotation

⁵ Roll rotation

⁶ Pitch rotation

⁷ poppet valves

⁸ servo valves

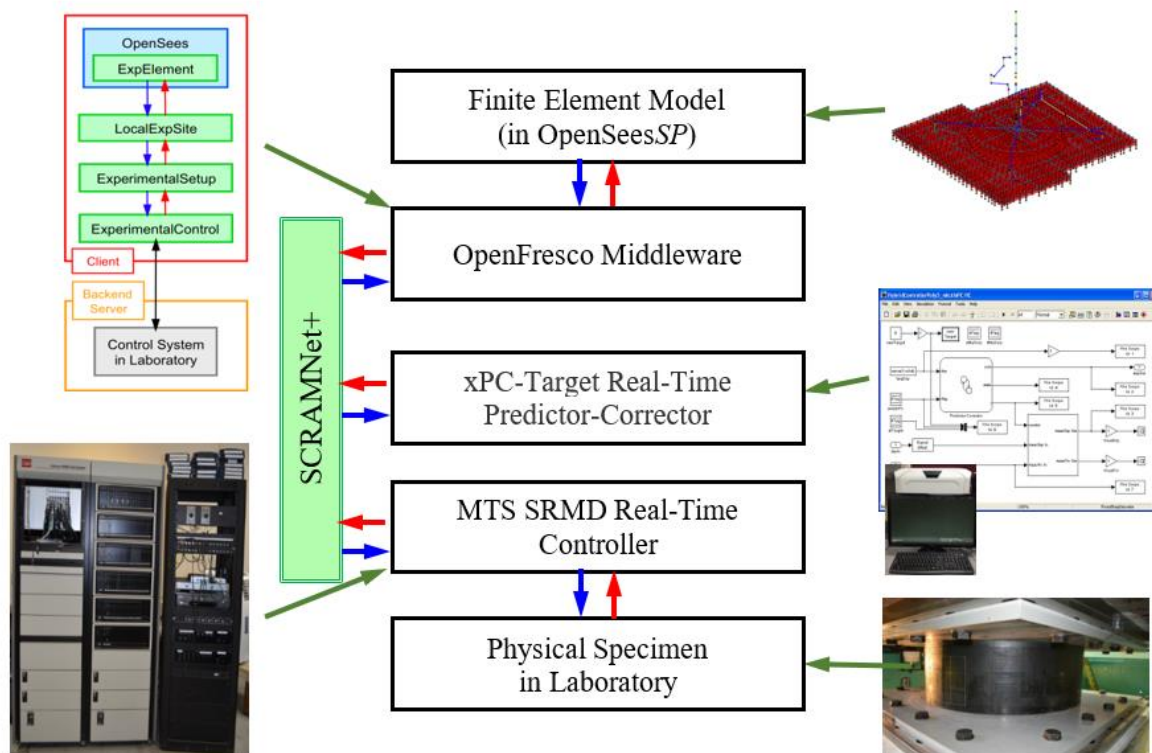
هر حال، کنترل با دقت و جبران این خطاها می‌تواند نتایج شبیه‌سازی قابل اعتمادتری، همان طور که در این مطالعه نشان داده شد، فراهم کند [۵۵].

ارتباط بین مولفه‌های شبیه‌سازی ترکیبی:

شکل ۱-۴۶ مولفه‌های مختلف و ارتباط آن‌ها با یکدیگر را نشان می‌دهد [۵۵]. مدل عددی در *OpenSeesSP* برنامه نویسی شده است تا معادلات حرکت حاکم را در هر گام زمانی برای مدل ترکیبی حل کند. *OpenSeesSP* مقادیر جابه‌جایی هدف جدید را برای گام زمانی بعدی محاسبه می‌کند و به تمام اعضای عددی و عضو تجربی در *OpenFresco* که اطلاعات و بارهای مطلوب بر نمونه آزمایش جداساز را تولید می‌کند، می‌فرستد. *OpenFresco* سیگنال‌های هدف را از درجه آزادی کلی^۱ به درجه آزادی عضو اصلی تبدیل می‌کند و سپس با دستگاه *xPC-Target* که مدل پیش‌بین-اصلاح‌کننده *Simulink* را اجرا می‌کند، ارتباط برقرار می‌کند. همان طور که در بالا توضیح داده شد، مدل *Simulink* در حال اجرا در زمان واقعی قادر است با نوشتن سیگنال‌های دیجیتالی در حافظه *SCRAMNet+* هر ۱ میلی‌ثانیه با استفاده از یک الگوریتم پیش‌بین-اصلاح‌کننده در گام زمانی شبیه‌سازی، سیگنال‌های فرمان نرم را تولید کند. سپس، کنترل‌گر زمان واقعی *SRMD* این سیگنال‌های فرمان را به عنوان سیگنال‌های مرجع خارجی می‌خواند و بر این اساس حرکت صفحه را دستور می‌دهد [۵۵].

در انتهای هر گام زمانی شبیه‌سازی، زمانی که جابه‌جایی هدف به وسیله *SRMD* حاصل می‌شود، اندازه نیرو و جابه‌جایی هر درجه آزادی دلخواه به دست می‌آید و سپس به مدل عددی پس فرستاده می‌شود. این مقادیر پاسخ به عنوان سیگنال‌های بازخورد نیز در نظر گرفته می‌شوند. برای یک شبیه‌سازی ترکیبی دو بعدی، دو جابه‌جایی افقی و نیروی برشی افقی متناظر با آن‌ها اندازه‌گیری می‌شوند.

¹ Global degree of freedom



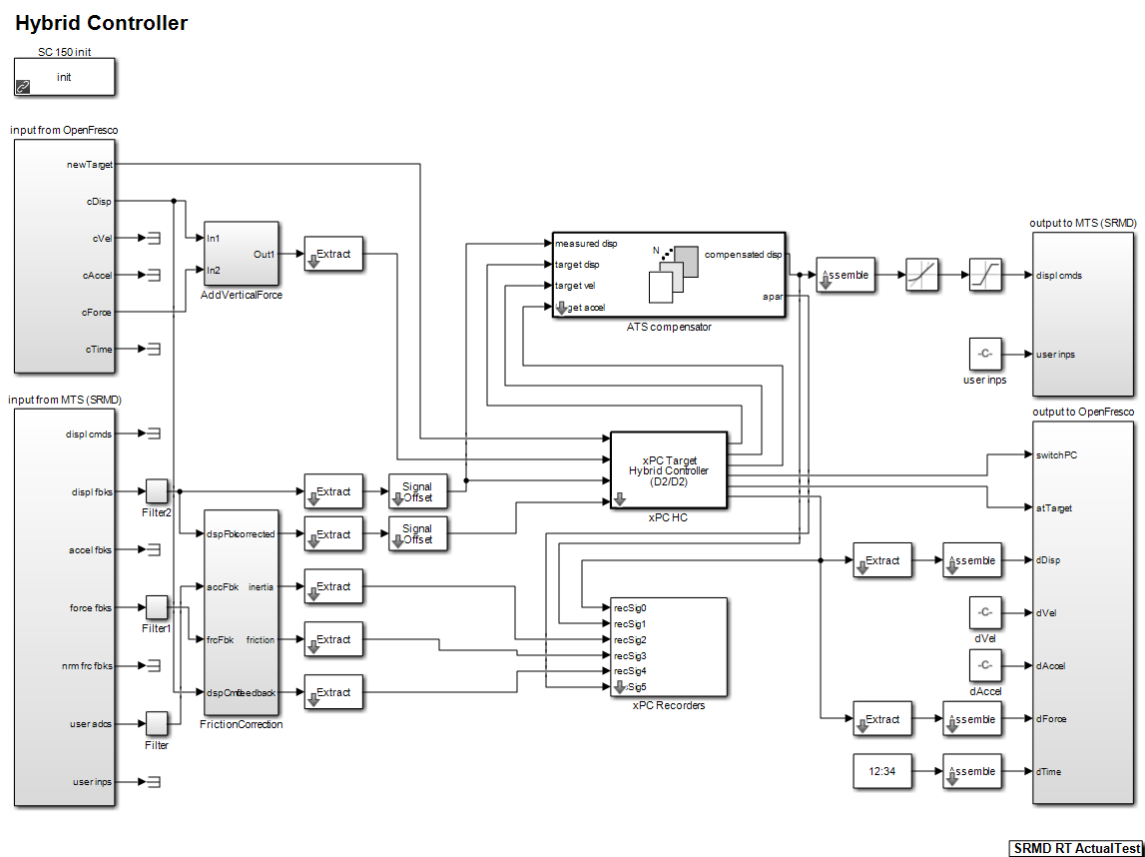
شکل ۱-۴۶: تنظیمات آزمایش شماتیک [۵۵].

این نیروهای بازخورد نیروهای داخلی در تکیه‌گاه‌های جداساز لرزه‌ای فیزیکی و نیروهای اصطکاکی و اینرسی صفحه بزرگ فلزی را شامل می‌شوند. مشاهده نیروی برشی با اندازه‌گیری نیروهای درجه آزادی افقی صفحه بزرگ فلزی به وسیله سلول‌های بار تک محوری عملگر و کم کردن نیروی اینرسی و اصطکاک قبل از پس فرستادن آن‌ها به مدل ترکیبی انجام می‌گردد. اصلاح نیروی بازخورد در مدل زمان واقعی *Simulink* انجام می‌گردد. در لحظه‌ای که شبیه‌سازی عددی نیروی بازیابی را از هر دو اعضای تجربی و عددی دریافت کند، پاسخ سیستم به دست می‌آید و تحلیل در مرحله زمانی بعدی ادامه می‌یابد. برای یک شبیه‌سازی ترکیبی سه بعدی، نیرو و جابه‌جایی قائم تکیه‌گاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به سختی قائم بالا و جابه‌جایی قائم نسبتاً کوچک تکیه‌گاه‌ها یک خطای کوچک جابه‌جایی باعث خطای بزرگ نیرو بازخورد می‌شود. بنابراین، درجه آزادی قائم با نیروی پیش‌بینی شده توسط مدل عددی، همان طور که در شبیه‌سازی‌های ترکیبی قبلی انجام شده است، کنترل نیرو عمل می‌کند [۷۰]. یک مدل الاستیک چندخطی با میرایی ویسکوز متناسب با نتایج آزمایش خصوصیات عمودی برای شبیه‌سازی رفتار تکیه‌گاه در راستای محوری استفاده می‌شود. در این روش، اندازه‌گیری نیروی قائم در آزمایش‌های سه بعدی به مدل ترکیبی پس فرستاده نمی‌شود. در عوض، نیروی قائم تکیه‌گاه به وسیله مدل فنر تخمین زده می‌شود و این مقدار نیرو نیز فرمان نیروی قائم است که به *SRMD* فرستاده شده است تا بار محوری متغیر را به تکیه‌گاه آزمایش اعمال کند [۵۵].

آمادگی برای آزمایش ترکیبی:

قبل از اجرای یک شبیه‌سازی ترکیبی، ابتدا بررسی‌ها اطمینان ایجاد می‌کند که اجزای مختلف که شامل سیگنال‌های بازخورد فرستاده شده به مدل عددی هستند، به درستی در ارتباط هستند. همان طور که در شکل

۴۷-۱ نشان داده شده است، بلوک *Simulink* در بالا سمت چپ، سیگنال‌های فرمان را (جابه‌جایی‌های طولی و جانبی و نیروی عمودی) از *OpenFresco* می‌خواند و بلوک پایین سمت چپ سیگنال‌های بازخورد را (جابه‌جایی‌ها، شتاب‌ها و نیروهای صفحه بزرگ فلزی) از سیستم کنترل *SRMD* می‌خواند. به طور مشابه، بلوک بالا سمت راست فرمان مرجع را (جابه‌جایی‌های جانبی و طولی و قائم) بر کنترل گر *SRMD* می‌نویسد و بلوک پایین سمت راست سیگنال‌های بازخورد را (نیروهای برشی جداگر) بر *OpenFresco* می‌نویسد. شبیه‌سازی‌های پیش از آزمایش اول با بازخورد شبیه‌سازی شده به وسیله یک مدل عددی اجرا شد و با بازخورد واقعی برای اطمینان از درستی ارتباط مقایسه شد [۵۵].



شکل ۴۷-۱: پیکربندی کنترل گر ترکیبی در *Simulink* [۵۵].

جبران تاخیر:

تاخیر یک ویژگی مهم سیستم بارگذاری آزمایشگاهی است که به جبران مناسب در شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی نیاز دارد. در کل، تاخیر اختلاف زمان بین سیگنال فرمان و پاسخ اندازه‌گیری شده است. نرخ آزمایش در شبیه‌سازی ترکیبی اساساً به وسیله زمان محاسبه مدل عددی، زمان ارتباط و تاخیر در سیستم عملگر اداره می‌شود. برای این آزمایش‌ها، بخش عددی پاسخ با استفاده از یک رایانه با کارایی بالا با ظرفیت پردازش موازی که محاسبات را به طور چشمگیر سریع کرد و آزمایش زمان واقعی را ممکن کرد، محاسبه شد. زمان ارتباط با استفاده از حافظه اشتراکی *SCRAMNet+* حداقل شد [۵۵].

از توابع همبستگی متقاطع و حداقل کردن ریشه میانگین مربعات (RMS^1) خطا بین سیگنال اندازه‌گیری شده و فرمان جهت شناسایی سیستم برای ارزیابی تأخیر سیستم در $SRMD$ برای درجات آزادی مختلف صفحه بزرگ فلزی، استفاده شد. بیشینه همبستگی متقاطع بین سیگنال اندازه‌گیری شده و فرمان به تأخیر زمانی که این دو سیگنال بهترین هماهنگی را دارند، اشاره می‌کند [۷۱]. در روش دوم، تأخیر سیستم با تغییر زمان مورد نیاز در سیگنال اندازه‌گیری شده مطابقت دارد که در آن RMS اختلاف بین سیگنال اندازه‌گیری شده و فرمان حداقل است [۵۵].

$SRMD$ حدود ۶۰ میلی‌ثانیه تأخیر در پاسخ جابه‌جایی اندازه‌گیری شده دارد. این تأخیر اساساً به علت یک عقب‌ماندگی در پاسخ عملگر هیدرولیکی کنترل شده به وسیله مجموعه دریچه پاپت ۴ مرحله‌ای است. برای کمینه کردن تأخیرها و ایجاد امکان آزمایش زمان واقعی، روش‌های کنترل جبران تأخیر پیشرفته‌تر استفاده شد [۵۵].

بهره پیشخور (FF):

یک روش برای کاهش تأخیر در تنظیمات آزمایش، استفاده از شیوه‌های کنترل پیشرفته موجود در سیستم کنترل $SRMD$ از قبیل کنترل پیشخور است. در شیوه‌های کنترل پیشخور، مشتقات زمانی سیگنال فرمان در بهره پیشخور ضرب می‌شود و مستقیماً به سیگنال فرمان دریچه اضافه می‌شود. اساساً، سیگنال فرمان مقدار بعدی را با استفاده از سرعت جریان که می‌تواند خصوصاً برای سیگنال‌های فرکانس بالا مشکل‌ساز باشد، پیش‌بینی می‌کند. بهره پیشخور بهبودی چشمگیر در ردیابی دو راستای افقی ایجاد کرد. به هر حال، نتوانست به طور کامل تأخیر کلی را جبران کند. کنترل FF در جهت قائم موثر نبود زیرا سیستم کنترل مبنی بر یک حلقه کنترلی است که حلقه داخلی جابه‌جایی کنترل و حلقه خارجی نیرو کنترل است [۵۵].

جبران‌ساز سری زمانی تطبیقی:

جبران‌ساز سری زمانی تطبیقی (ATS^2) که به وسیله چاو و همکاران^۳ توسعه داده شد [۵۸] برای بیشتر کمینه کردن تأخیرها در پاسخ $SRMD$ استفاده شد. این روش جبران تطبیقی تأخیر یک سیگنال فرمان جلوتر از زمان را برای جبران تأخیر پیش‌بینی می‌کند. از سه بهره تطبیقی استفاده می‌کند که جبران‌سازهای مبنی بر جابه‌جایی، سرعت و شتاب را مقیاس می‌کنند. به طور پیوسته، این بهره‌ها در فرکانس‌های سیستم کنترل با استفاده از روش حداقل مربعات به روز می‌شوند تا خطای کنترل را به حداقل برسانند. برای اعمال جبران‌ساز ATS به $SRMD$ دو اصلاح جزئی انجام می‌شود. اولی، الگوریتم برای انجام جبران تطبیقی تأخیر به صورت جداگانه برای هر درجه آزادی $SRMD$ گسترش یافته است. دومی، ATS برای استفاده از سرعت‌ها و شتاب‌های مرجع مستقیماً با الگوریتم پیش‌بین-اصلاح‌کننده به جای محاسبه آن‌ها با مشتق گرفتن از جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده مرجع، اصلاح شد. از آن جا که الگوریتم پیش‌بین-اصلاح‌کننده از چند جمله‌ای برای دورن‌یابی و برون‌یابی استفاده می‌کند، امکان

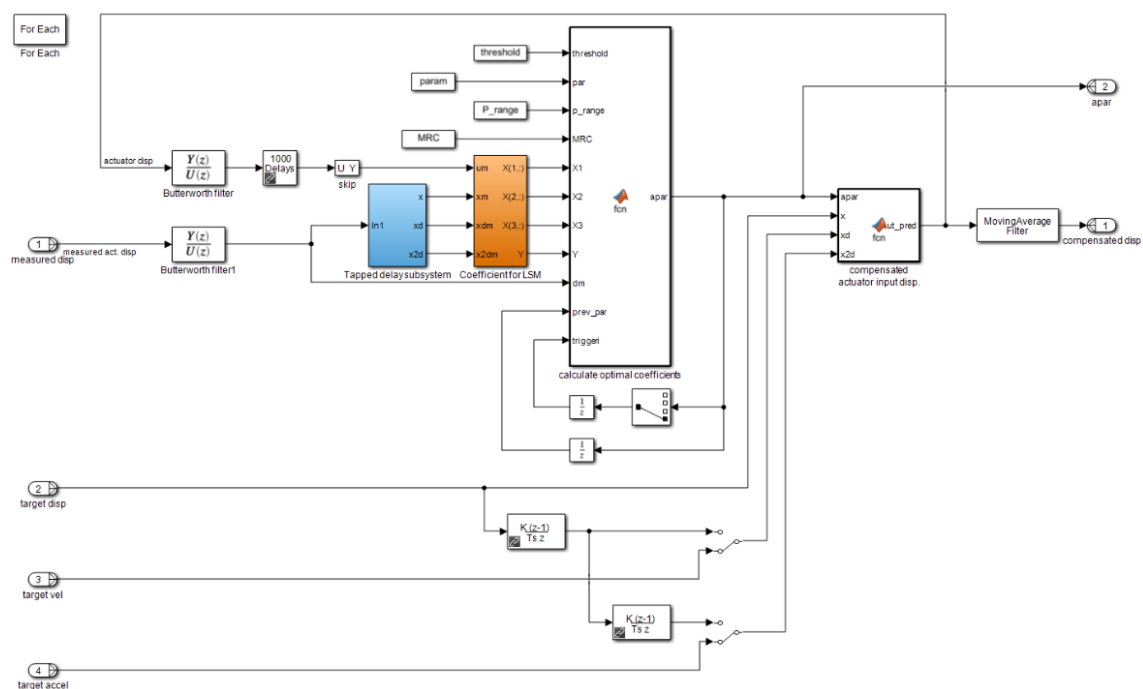
¹ root mean square, (RMS)

² adaptive time series

³ Chae et al.

مشتق‌گیری مستقیم از چندجمله‌ای لاگرانژ جابه‌جایی برای به دست آوردن چندجمله‌ای سرعت و شتاب وجود داشت. این اصلاح مراجع سرعت و شتاب دقیق‌تری را همراه با کاهش چشمگیر نویز فراهم کرد [۵۵].

یک بلوک *Simulink* از *ATS* که به وسیله چاو و همکاران ایجاد شد [۵۸] به مدل *Simulink* کنترل‌گر ترکیبی اضافه شد و بهره تطبیقی قبل از انجام یک شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی کالیبره شد تا از پایداری و جبران مناسب تاخیر اطمینان حاصل شود (شکل ۱-۴۸). بعد از اجرای آن، مشخص شد که جبران‌ساز *ATS* که با کنترل بهره *FF* ترکیب شد قادر است میانگین تاخیر در *SRMD* را از ۶۰ میلی‌ثانیه به حدود ۵ میلی‌ثانیه کاهش دهد که آزمایش زمان واقعی را ممکن می‌کند. جبران‌ساز *ATS* اساساً برای سیستم‌ها با استفاده از کنترل جابه‌جایی ایجاد و ارزیابی شد، در حالی که درجه آزادی قائم *SRMD* معمولاً در نیرو کنترل می‌شود. مشخص شد که *ATS* در جبران تاخیر درجه آزادی محوری تکیه‌گاه حین آزمایش ترکیبی زمان واقعی موثر نبود و احتمالاً علت این امر محتوای فرکانسی بالاتر در این سیگنال‌ها است. به هر حال، استفاده از جبران‌ساز *ATS* در شبیه‌سازی‌های ترکیبی کندتر، ردیابی بهتری از نیروی محوری در راستای قائم را نتیجه داد [۵۵].



شکل ۱-۴۸: دیاگرام بلوک *Simulink* برای جبران‌ساز سری زمانی تطبیقی [۵۸].

نرخ آزمایش:

بعد از آزمایش ترکیبات و تنظیمات مختلف روش جبران تاخیر برای دستگاه آزمایش مورد نظر، مشاهده شد که استفاده از ترکیبی از کنترل *FF* و جبران تأخیر *ATS* موثرترین روش حذف تاخیرها در هر دو راستای طولی و جانبی بوده و آزمایش ترکیبی زمان واقعی را برای تحریک یک بعدی و دو بعدی ممکن می‌کند (آزمایش ترکیبی یک بعدی یا دو بعدی، یک یا دو جابه‌جایی افقی را کنترل می‌کند). به هر حال، آزمایش ترکیبی سه بعدی (که نیروی قائم تکیه‌گاه و جابه‌جایی‌های افقی را کنترل می‌کند) نتوانست در زمان واقعی اجرا شود چون فناوری جبران

تاخیر نتوانست به طور چشمگیر عملکرد ردیابی نیروهای قائم فرکانس بالا را بهبود بخشد تا پایداری و دقت را ضمانت کند [۵۵].

حذف نیروی اصطکاک و اینرسی از نیروی بازخورد:

نیروهای بازخورد در *SRMD* از سلول‌های بار تک محوری روی عملگرها به دست آمده‌اند. اندازه‌گیری‌های نیروی افقی شامل نیروهای مقاوم در تکیه‌گاه‌های جداسازی لرزه‌ای و نیروهای اصطکاکی و اینرسی صفحه بزرگ فلزی است. قبل از ارسال این سیگنال‌های بازخورد به عنوان نیروهای بازایی به مدل ترکیبی، اصلاحاتی برای حذف نیروهای اصطکاک و اینرسی از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده لازم بود. در حالی که با یک سلول بار^۱ دقیقاً زیر تکیه‌گاه می‌توان مستقیماً نیروی برشی واقعی را در آزمایش کوچک مقیاس اندازه‌گیری کرد ولی با توجه به بزرگی و مولفه‌های چندگانه نیروها که باید سنجیده می‌شدند، این کار دشوار و پرهزینه بود. یک مشاهده‌گر نیروی برشی برای اصلاح لازم شد. در آزمایش استاندارد رفت و برگشتی خصوصیت وسایل موجود در *SRMD*، این اثرات حین تحلیل پس از آزمون اصلاح می‌شوند. اغلب اصلاحات با کم کردن نیروهای اندازه‌گیری شده از یک میز اجرای خالی با همان حرکت ورودی انجام می‌شود. در حالی که باید از یک میز اجرای خالی در غیاب اصطکاک و اینرسی نیروی برشی صفر خوانده شود، نیروهای بزرگ از مرتبه ۲۰۰۰ کیلونیوتن در طی آزمایش‌های سریع با شتاب قابل توجه، مشاهده شد. این اساساً به علت نیروهای اینرسی جرم و اصطکاک صفحه بزرگ فلزی است که نیروی اصطکاک ناشی از لغزش صفحه بر عملگرهای قائم و تکیه‌گاه‌ها است. اوز چلیک و همکاران^۲ در دانشگاه کالیفرنیا، سان‌دیگو، کارایی روش شناسایی پارامتر را برای مدل کردن زیرسازه مکانیکی میز لرزه بزرگ با کارایی بالا مطالعه و ارزیابی کردند [۷۲]. با استفاده از یک روش مشابه، یک مدل برای اصلاح نیروهای اصطکاکی و اینرسی برای *SRMD* با استفاده از روش شناسایی سیستم تهیه و کالیبره شد [۵۵].

در این مدل، نیروهای اینرسی ناشی از جرم موثر کالیبره شده تنظیمات شامل نمونه، صفحه بزرگ فلزی و قسمت‌های متحرک عملگر در هر سه درجه آزادی انتقالی و شتاب‌های سنجیده شده در هر راستا محاسبه می‌شوند. شتاب‌ها با شتاب‌سنج‌های جای گرفته بر میز اندازه‌گیری شدند. جرم موثر میز برای تنظیمات مختلف بر اساس بلوک و جرم متحرک نمونه آزمایش تکیه‌گاه تغییر کرد. در مورد نیروی اصطکاک، مطالعات پیشین *SRMD* وابستگی نیروی اصطکاک به سرعت و راستای لغزش را شناسایی کرده‌اند [۶۲]. همچنین این مطالعات اشاره می‌کنند که راستای طولی و جانبی مقادیر اصطکاک استاتیکی و مقادیر اصطکاک وابسته به سرعت مختلفی دارند. فرض شد که نیروهای اصطکاک شامل ترکیبی از مولفه‌های دینامیکی و استاتیکی هستند. اصطکاک استاتیکی مقدار ثابت دارد و علامت آن مبنی بر راستای لغزش تغییر می‌کند. قسمت دینامیکی نیروی اصطکاک به طور خطی متناسب با سرعت لغزش فرض می‌شود (توان سرعت لغزشی (α) برابر یک در نظر گرفته می‌شود) [۵۵].

این مدل بر اساس اجرا با یک میز خالی ساخته شده است که در آن نیروهای سنجیده شده ($F_{measured}$) با استفاده از سلول‌های بار عملگر و شتاب‌های افقی ($\frac{d^2u}{dt^2}$) با استفاده از شتاب‌سنج ثبت می‌شود. سرعت بازخورد ($\frac{du}{dt}$) از

¹ Load cell

² Ozelik et al.

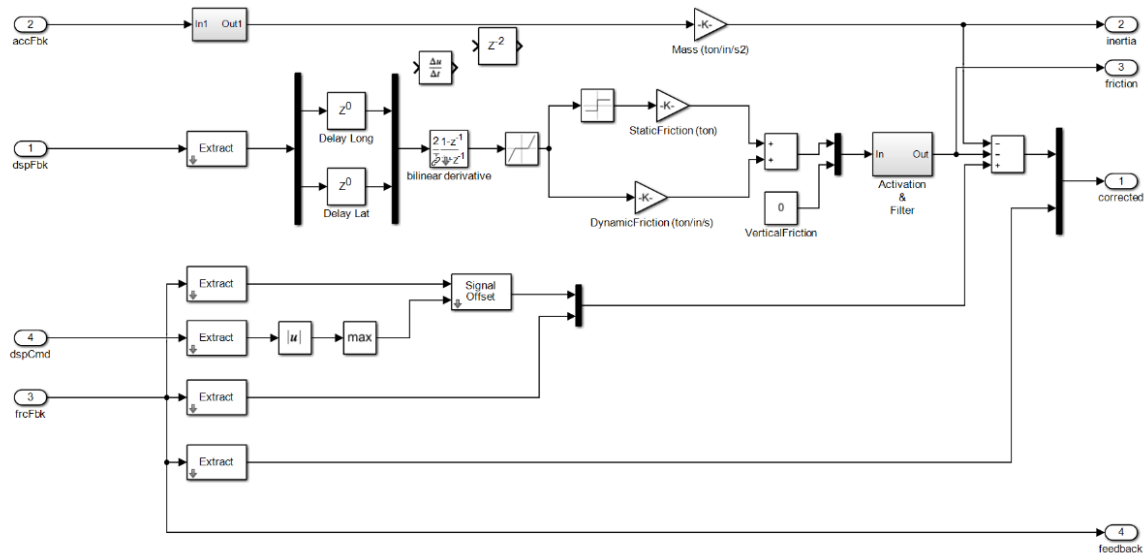
جابه‌جایی اندازه‌گیری شده با استفاده از مبدل‌های جابه‌جایی عملگر محاسبه شدند. جرم موثر (m_e)، نیروی اصطکاکی استاتیکی ($F_{static_friction}$)، نیروی اصطکاک دینامیکی ($F_{dynamic_friction}$) و هر انحرافی (d) در اندازه‌گیری‌های نیرو پارامترهای ناشناخته هستند. با این فرضیات (۱-۱) برای نیروهای افقی در هر دو راستای طولی و جانبی برای یک میز اجرای خالی حاصل شد [۵۵].

$$F_{measured} = m_e \times \frac{d^2u}{dt^2} + F_{static_friction} \times \operatorname{sgn}\left(\frac{du}{dt}\right) + F_{dynamic_friction} \times \left(\frac{du}{dt}\right)^\alpha + d \quad (1-1)$$

نتایج چندین میز اجرای خالی (هر دو تحریک هارمونیک و زلزله) برای محاسبه پارامترهای ناشناخته مدل پیشنهادی استفاده شدند. با استفاده از تکنیک شناسایی سیستم، یک مدل خطی حداقل مربعات با قید خطی به مجموعه داده‌های موجود به طور مستقل برای هر دو راستای طولی و جانبی برازش شد تا پارامترهای ناشناخته مدل را محاسبه کند. باید توجه شود که فرض یک وابستگی غیرخطی برای سرعت لغزش در مولفه اصطکاک دینامیکی تخمین نیروهای اصطکاکی را در سیستم به طور موثر کاهش نداد (یعنی توان سرعت لغزش α بین ۰/۱ تا ۲). همچنین تنظیمات آزمایشگاهی که برای آزمایش انواع مختلف تکیه‌گاه‌ها استفاده شد، متفاوت بود پس جرم‌های موثر این تنظیمات متفاوت بود در حالی که رفتار اصطکاکی یکسان فرض شد [۵۵].

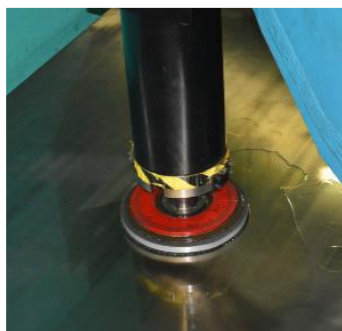
به محض محاسبه پارامترهای اصطکاک و اینرسی، مدل اصلاح نیرو در مدل *Simulink* کنترل‌گر ترکیبی اجرا شد. در این مدل، سرعت طولی و جانبی مبنی بر جابه‌جایی‌های بازخورد صفحه بزرگ فلزی (به جای جابه‌جایی‌های فرمان) محاسبه شدند تا از هم‌فاز بودن با حرکت واقعی صفحه اطمینان حاصل شود. از قرائت‌های شتاب‌سنج‌های روی صفحه میز نیز برای اصلاح نیرو اینرسی استفاده شد. برای کسب اطمینان از اعمال اصلاحات نیرو با فاز مناسب، ابتدا ایجاد سرعت در دامنه مورد انتظار آزمایش ترکیبی با آزمایش تعدادی میز اجرای خالی بررسی شد [۵۵].

برای اجتناب از تغییرات سریع در بازخورد نیرو، خصوصاً در تغییرات جهت جابه‌جایی یعنی زمانی که سرعت می‌تواند به دلیل نویز، در علامت نوسان کند، نیروی اصطکاک در سرعت کمتر از ۰/۰۵ اینچ بر ثانیه صفر در نظر گرفته شد. مقدار این سرحد در انتهای آزمایش یعنی زمانی که نوسانات سرعت و تغییرات بزرگ در نیروی اصطکاک می‌تواند باعث ایجاد نویز فرکانس بالا در سیگنال اندازه‌گیری و پس فرستاده شده به مدل ترکیبی شود، به ارتعاش آزاد کمک می‌کند. این مدل اصلاح نیرو، در شکل ۱-۴۹ آورده شده است و با حداقل کردن نیروی اندازه‌گیری شده به صفر حین آزمایش میز خالی کالیبره شده است [۵۵].



شکل ۱-۴۹ مدل شماتیک اصلاح اصطکاک، اینرسی و انحراف [۵۵].

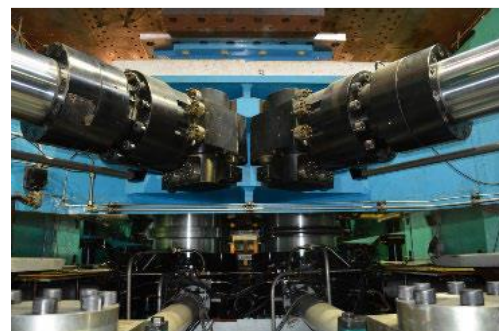
بر مبنای مطالعه انجام شده توسط شورترید و همکاران^۱ یک منبع اصطکاک دیگر در *SRMD* وجود دارد که به سرعت قائم وابسته است [۶۲]. حرکت صفحه بزرگ فلزی شامل نه سطح اصطکاک مختلف است، هشت تا در عملگرهای پایه و یکی در چهار عملگر قائم زیر صفحه میز که در شکل ۱-۵۰ نشان داده شده‌اند. این نیروی اصطکاک تابعی از جهت حرکت، نیروهای پایه، بار قائم و فشار بالابر است. مبنی بر نیروی قائم مورد انتظار بر تکیه‌گاه حین شبیه‌سازی ترکیبی، مقادیر ثابت اصطکاک برای راستاهای مختلف می‌تواند محاسبه شود. می‌توان این نیروی اصطکاک را در هر گام زمانی محاسبه کرد تا مقادیر جدید برای اصلاح استفاده شوند. به هر حال، تغییرات این بخش از نیروی اصطکاک برای بیشتر آزمایش‌ها قابل اغماض است [۵۵].



(ج)



(ب)

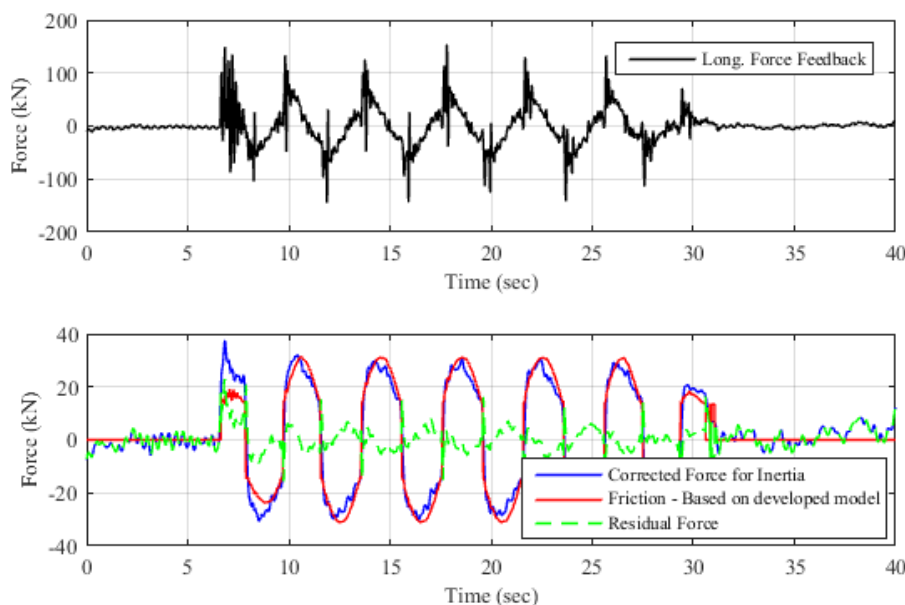


(الف)

شکل ۱-۵۰ سطوح تماس دستگاه: (الف) عملگرهای قائم زیر صفحه، (ب) تکیه‌گاه‌های بالا و پایین و (ج) سطح لغزش پایه [۵۵].

¹Shortreed et al.

شکل ۱-۵۱ یک مثال از شیوه اصلاح بازیابی نیروی مقاوم تکیه‌گاه را نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده است، نیروی باقی مانده تقریباً نزدیک به ۱۰ کیلونیوتن است (تقریباً ۰/۰۱ درصد ظرفیت نیروی طولی $SRMD$) که داخل دامنه مورد انتظار دقت نیرو است. این شیوه برای اصلاح فوری نیروی برشی افقی تکیه‌گاه حین شبیه‌سازی ترکیبی استفاده شد [۵۵].



شکل ۱-۵۱ اصلاح نمونه نیرو بازخورد (جهت طولی): (الف) بازخورد نیروی خام، (ب) نیروهای اصطکاک و خطای باقی‌مانده بین اصطکاک واقعی و پیش‌بینی شده [۵۵].

تنظیمات آزمایش:

در این مطالعه، شبیه‌سازی ترکیبی برای یک مدل نیروگاه قدرت آزمایش هسته‌ای نمونه جداشده لرزه‌ای (ANT^1) که به وسیله $KEPCO E\&C^2$ تهیه شده است، انجام شد. مدل ANT نماینده یک نسخه ساده شده از طراحی نیروگاه هسته‌ای راکتور پیشرفته کره‌ای (APR^3) با ۴۸۶ تکیه‌گاه است. سه متغیر این مدل ANT در این برنامه آزمایش شدند. با توجه به این که فقط یک تکیه‌گاه می‌توانست به طور تجربی در شبیه‌سازی ترکیبی ارزیابی شود این سه مدل شامل همان روسازه نیروگاه بودند ولی از سه روش مختلف برای مدل کردن طرح جداسازی لرزه‌ای استفاده شد. در اولین و آسان‌ترین مدل از یک عضو تکیه‌گاه معادل به عنوان طرح کامل جداسازی استفاده شد. مدل دوم شامل ۵ تکیه‌گاه بود که هر کدام نماینده یک گروه از تکیه‌گاه‌ها در زیر ۴ بخش ساختمان فرعی و ناحیه

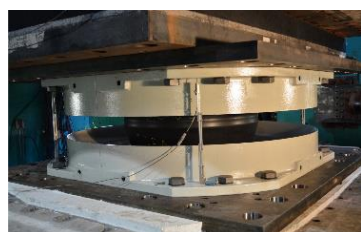
¹ Archetype Nuclear Test, (ANT)

² KEPCO E&C is a power plant design and engineering company in South Korea. It was established in 1975 as a public enterprise.

³ Advanced Power Reactor, (APR)

زیر ساختمان مهار راکتور بودند. سومین و پیچیده‌ترین مدل شامل کل ۴۸۶ تکیه‌گاه در طرح جداسازی بود. مدل معادل دارای یک تکیه‌گاه تقریباً پاسخی متفاوت از دو مدل ترکیبی دیگر تجربه کرد از آن جا که پاسخ جداساز در این مدل به طور کامل با نمونه آزمایش تجربی تعیین شد در حالی که در دو مدل دیگر، پاسخ سیستم جداسازی تقریباً با جداگرهای عددی تعیین شد. همچنین، برای هر دو مدل معادل ۵ تکیه‌گاهی و مدل ۴۸۶ تکیه‌گاهی، جداگر آزمایشگاهی در موقعیت گوشه بود که در آن جداگر تحت اثرات واژگونی بود. بر خلاف این، مدل معادل تک تکیه‌گاهی اثرات واژگونی را در نظر نگرفت [۵۵]. جزئیات سه مدل تحلیلی، مدل‌های عضو تکیه‌گاه عددی که برای شبیه‌سازی تکیه‌گاه‌های تحلیلی استفاده شد و یک بحث در مورد چگونگی کالیبره شده پارامترهای مدل تکیه‌گاه عددی برای استفاده در شبیه‌سازی ترکیبی در کار شلنبرگ و همکاران دیده می‌شود [۶۱].

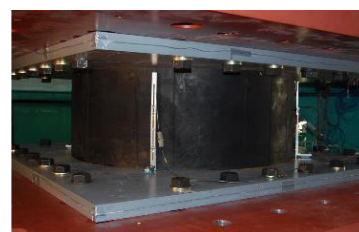
سه سازنده تکیه‌گاه نمونه‌های آزمایش مقیاس واقعی را برای استفاده به عنوان زیر مجموعه‌های فیزیکی در این شبیه‌سازی‌های ترکیبی فراهم کردند. سه نوع تکیه‌گاه از قبیل یک تکیه‌گاه لاستیکی با تویی سرب ($LPRB^1$) یک تکیه‌گاه لغزشی اصطکاکی با یک سطح لغزش مسطح و فنرهای فشاری ($EQSB$) و یک تکیه‌گاه اصطکاکی آونگ سه‌گانه ($TPFB^2$) بودند (شکل ۱-۵۲). سه نمونه طراحی و ظرفیت جابه‌جایی نهایی کاملاً متفاوت داشتند و خلاصه‌ای از ویژگی‌های طراحی آن‌ها در جدول ۱-۳ آمده است [۵۵].



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱-۵۲ الف) تکیه‌گاه‌های LPRB، ب) EQSB و ج) TPFB مورد استفاده در این برنامه آزمایشی [۵۵].

جدول ۱-۳ خلاصه ویژگی‌های طراحی تکیه‌گاه‌های جداسازی لرزه‌ای [۵۵].

تکیه‌گاه جداسازی	جابه‌جایی طراحی (Dd) (میلی‌متر)	نیروی جانبی در Dd (کیلو نیوتن)	Qd (کیلو نیوتن)
LPRB	۲۱۰	۱۹۰۰	۱۰۱۰
EQSB	۱۵۲	۲۹۲۰	۱۰۹۰
TPFB	۵۸۴	۱۵۱۰	۷۳۰

نتایج آزمایش شبیه‌سازی ترکیبی:

¹ lead plug rubber bearing, (LPRB)

² triple pendulum friction bearing, (TPFB)

برای اختصار، در این جا فقط نتایج سه آزمایش از *LPRB* تحت تحریک سطح زلزله طراحی دو بعدی و سه بعدی آورده شده است. آزمایش‌ها و تحلیل‌های ارائه شده از مدل *ANT* معادل تک تکیه‌گاهی برای جلوگیری از تاثیر تکیه‌گاه‌های تحلیل در نتایج شبیه‌سازی ترکیبی استفاده کردند. شبیه‌سازی‌های تحلیلی (با استفاده از ویژگی‌های تکیه‌گاه‌ها که مبنی بر نتایج آزمایش تعیین خصوصیت کالیبره شدند) با عضو تکیه‌گاه *X-LeadRubber* در *OpenSees* اجرا شدند. کارهای آینده رفتار تکیه‌گاه‌ها را با جزئیات بیشتر آزمایش خواهد کرد. نتایج ارائه شده در این جا بر پاسخ سازه‌ای ثبت شده توسط *OpenSees* و *OpenFresco* متکی است. برای هر مقایسه، رفتار جداگر تجربی آزمایش شده از نظر جابه‌جایی و نیروی تقاضا و پاسخ درونی سازه به لحاظ طیف پاسخ طبقه ارائه شده است. برای نمونه جداساز حلقه‌های هیستریزیس در راستای طولی و جانبی، مدار جابه‌جایی افقی و سطح تعامل نیروی برشی تهیه شده است. برای روسازه نیروگاه، طیف پاسخ طبقه در سه ارتفاع مختلف در ساختمان مهار راکتور (RCB^1)، سازه داخلی (INS^2) و ساختمان پیچیده کمکی (ACB^3) تهیه می‌شوند. طیف پاسخ برای ورودی حرکت زمین و طیف پاسخ لاستیک با تحلیل سیستم الاستیک خطی دو بعدی با ۵ درصد میرایی تهیه شدند و مقادیر طیفی گزارش شده نرم بردار مقادیر پاسخ در دو راستای افقی هستند [۵۵].

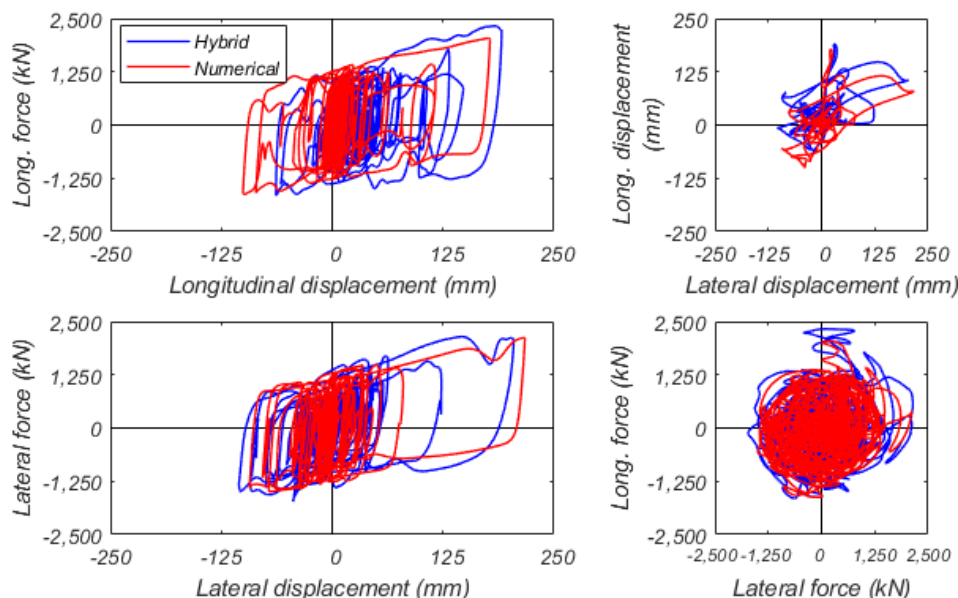
نتایج تحریک دو بعدی زمان واقعی:

ابتدا نتایج یک شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی با دو مولفه افقی تحریک حرکت زمین در سطح خطر طراحی برای مدل سازه مورد بررسی نشان داده می‌شوند. مقایسه پاسخ تکیه‌گاه در شبیه‌سازی ترکیبی و مطلقاً عددی در شکل ۱-۵۳ نشان داده شده است. بیشینه جابه‌جایی تقاضا در آزمایش ترکیبی ۱۹۰ میلی‌متر در راستای طولی و ۲۰۶ میلی‌متر در راستای جانبی است که کوچکتر از ۲۳۳ میلی‌متر و ۳۰۸ میلی‌متر حاصل از تحلیل مدل تکیه‌گاه کالیبره شده به آزمایش‌های اولیه تعیین خصوصیت است. مقایسه سطح تعامل نیروی برشی نشان می‌دهد که معمولاً نیروی برشی در آزمایش ترکیبی بزرگتر از شبیه‌سازی تحلیلی است. نیروی برشی حداکثر در آزمایش ترکیبی ۲۳۲۲ کیلونیوتن است که بزرگتر از ۲۰۳۸ کیلونیوتن نیروی برشی حاصل از تحلیل عددی است [۵۵].

¹ reactor containment building, (RCB)

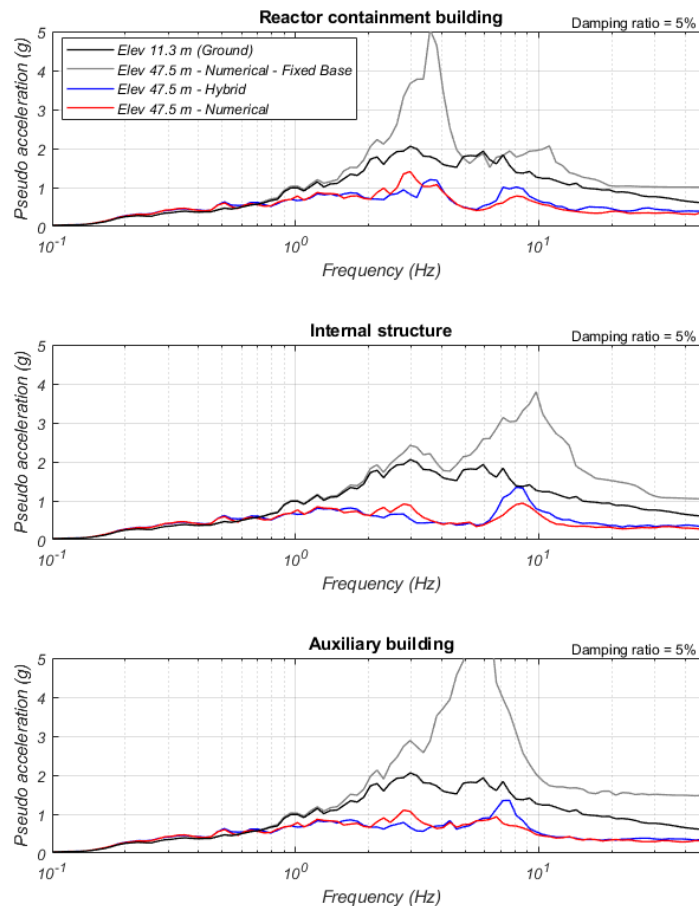
² internal structure, (INS)

³ auxiliary complex building, (ACB)



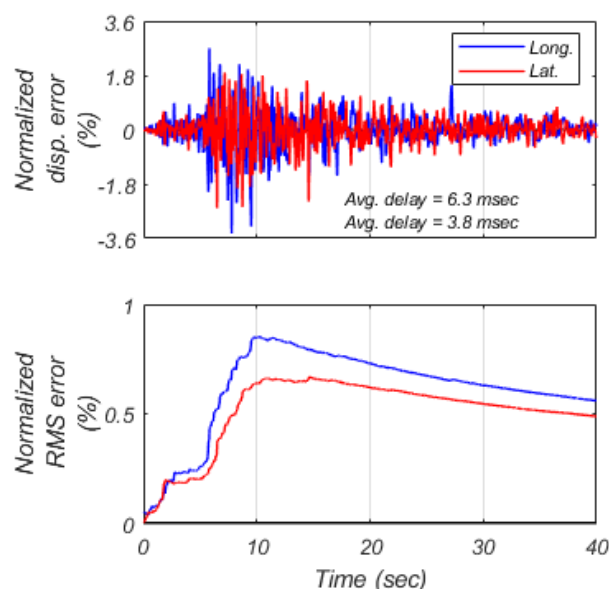
شکل ۱-۵۳ مقایسه شبیه‌سازی ترکیبی (زمان واقعی) و تحلیل عددی مطلق با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و پاسخ دو بعدی تحریک - هیستریک [۵۵].

پاسخ درونی در شکل ۱-۵۴ با طیف پاسخ طبقه در ارتفاع ۴۷/۵ متر در ساختمان مهار راکتور، سازه دورنی و ساختمان کمکی مقایسه می‌شود. همچنین، این شکل شامل پاسخ تحلیل مدل *ANT* با پایه ثابت می‌شود که کاهش در شتاب طیفی فرکانس بالا حاصل از جداسازی لرزه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین، مشاهده می‌شود که برای فرکانس‌های بالای ۶ هرتز، طیف پاسخ *RCB*، *INS* و *ACB* همواره برای شبیه‌سازی ترکیبی بزرگتر از تحلیل عددی بهینه شده، است. قله طیف در ۷/۶ هرتز با فرکانس‌های مد اول و دوم *ACB* متناظر است. اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در این جا، اساساً به علت خطای آزمایشگاهی فرکانس بالا اضافه شده هستند. به هر حال، نتایج آزمایش دیگر (دو برابر کندتر از زمان واقعی) که توسط ساربان‌ها و همکاران گزارش شد، نشان می‌دهد زمانی که ردیابی بهبود داده می‌شود طیف طبقه حاصل از آزمایش ترکیبی دامنه کمتری از نتایج حاصل از مدل تحلیلی (بین ۷ تا ۱۱ هرتز) دارد. دلیل آن نرم بودن رفتار تکیه‌گاه واقعی سنجیده شده در مقایسه با رفتار مدل تکیه‌گاه تحلیلی است. برخلاف این، در فرکانس ۲/۸ هرتز شتاب طیفی طبقه حاصل از شبیه‌سازی ترکیبی پایین‌تر از شتاب طیفی طبقه حاصل از شبیه‌سازی عددی است [۵۵].



شکل ۱-۵۴ مقایسه شبیه‌سازی ترکیبی (زمان واقعی) و تحلیل عددی مطلق با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و طیف پاسخ دو بعدی طبقه تحریک - در - سازه [۵۵].

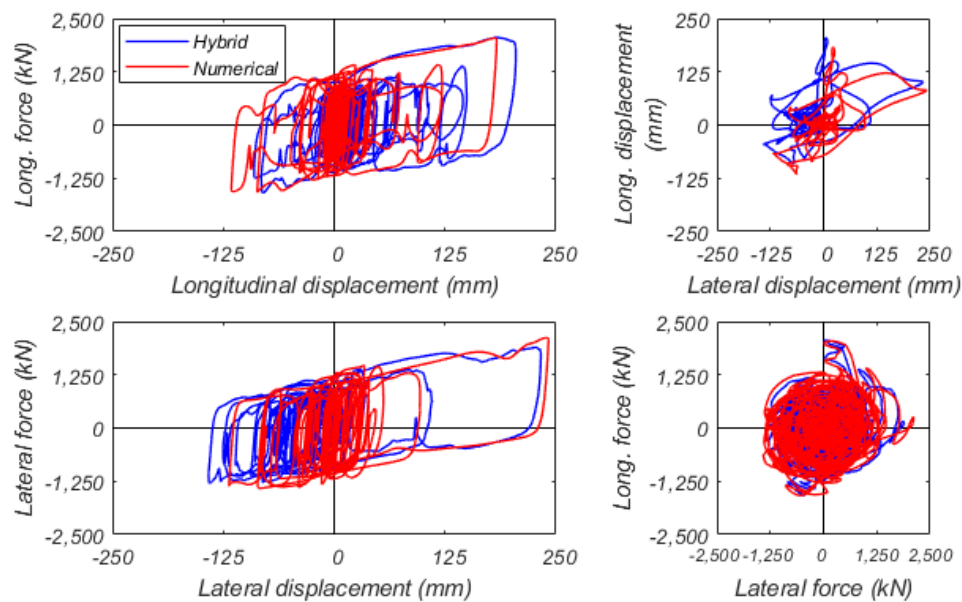
اثر روش جبران تاخیر از لحاظ میانگین تاخیر و خطای جابه‌جایی فرمان و سنجیده شده برای این آزمایش ترکیبی در شکل ۱-۵۵ نشان داده شده است. میانگین تاخیرها در آزمایش زمان واقعی $6/3$ میلی‌ثانیه در راستای طولی و $3/8$ میلی‌ثانیه در راستای جانبی است و طی این آزمایش خطاهای RMS نرمالیزه شده کمتر از ۱ درصد بودند [۵۵].



شکل ۱-۵۵ جابه‌جایی نرمالیزه شده و خطای RMS برای شبیه‌سازی ترکیبی (زمان واقعی) با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و تحریک دو بعدی [۵۵].

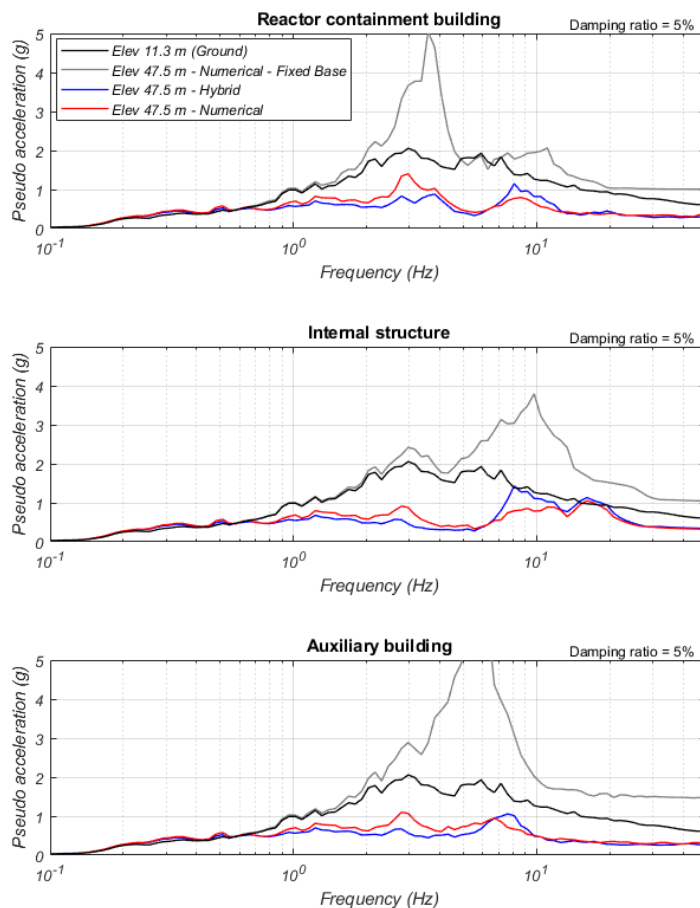
نتایج تحریک سه بعدی ده برابر کندتر از زمان واقعی:

یک شبیه‌سازی ترکیبی با سه مولفه حرکت زمین در سطح خطر طراحی در یک نرخ ده برابر کندتر از زمان واقعی به علت محدودیت در کنترل قائم اجرا شد. پاسخ تکیه‌گاه با شبیه‌سازی عددی متناظر در شکل ۱-۵۶ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که حداکثر نیروی برشی حاصل از آزمایش شبیه‌سازی ترکیبی به نتیجه تحلیل بهینه‌شده نزدیک است در حالی که نوسانات نیروی برشی در آزمایش ترکیبی بیشتر از نوسانات شبیه‌سازی عددی مطلق است [۵۵].



شکل ۱-۵۶ مقایسه شبیه‌سازی ترکیبی (ده برابر کندتر) و تحلیل عددی مطلق با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و پاسخ سه بعدی تحریک - هیستریک [۵۵].

پاسخ درونی سازه در شکل ۱-۵۷ با طیف پاسخ طبقه در ارتفاع ۴۷/۵ متر مقایسه می‌شود. همان طور که نشان داده شده است، مدل تحلیلی نمی‌تواند به طور دقیق رفتار بر هم نهی عمودی - افقی تکیه‌گاه را در نظر بگیرد که این منجر به تخمین کم شتاب‌های طیفی در فرکانس‌های بالاتر می‌شود (بین ۷ تا ۱۱ هرتز). قله‌های طیف در نتایج آزمایش ترکیبی در فرکانس حدود ۸/۵ هرتز اتفاق می‌افتد که بسیار نزدیک به فرکانس اساسی قائم روسازه نیروگاه که حدود ۱۰ هرتز است، می‌باشد. به دلیل خطای آزمایشگاهی آزمایش‌های کندتر معمولاً با شکل ۱-۵۵ هم‌دامنه نیستند. با مقایسه پاسخ سازه پایه ثابت و جداشده برداشت می‌شود که کاهش چشمگیری در شتاب طیفی با جداسازی لرزه‌ای برای فرکانس بالای ۰/۶ هرتز حاصل شد [۵۵].



شکل ۱-۵۷ مقایسه شبیه‌سازی ترکیبی (ده برابر کندتر) و تحلیل عددی مطلق با استفاده از یک عضو تکیه‌گاه X-LeadRubber و طیف پاسخ سه بعدی طبقه تحریک - در - سازه [۵۵].

مولفه‌ها و مزایای روش شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی با توجه به مثال موردی:

این برنامه تحقیقاتی تایید می‌کند که شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی یک روش مناسب آزمایش برای ارزیابی تجربی رفتار جداگرهای بزرگ در مقیاس کامل است و نشان می‌دهد که سیستم عامل محاسبه با کارایی بالا و ظرفیت پردازش موازی (*OpenSees SP*) می‌تواند برای انجام شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی سازه‌های بزرگ با هزاران درجه آزادی استفاده شود. به عنوان قسمتی از این پروژه، یک قابلیت قسمت‌بندی جدید در *OpenSees SP* انجام شد تا اعضای تجربی را در پردازنده اصلی (*P0*) نگه دارد تا ارتباط بین حل‌کننده تحلیلی و *DSP* زمان واقعی در طول آزمایش حفظ شود [۵۵].

این دستگاه آزمایش تکیه‌گاه *SRMD* به درستی برای انجام آزمایش شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی و سریع مدل‌های عددی بسیار بزرگ مناسب گردید. یک شبکه ارتباط دیجیتالی سریع بین مولفه‌های مختلف سخت‌افزاری سیستم آزمایش ترکیبی اجرا شد تا شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی در تسهیلات آزمایش *SRMD* را ممکن کند. حین برنامه آزمایش تجربی، عملکرد ردیابی (از لحاظ تاخیرها) با به کار بردن ترکیب جبران‌کننده تطبیقی تاخیر سری زمانی و استفاده از کنترل پیشخور در سیستم کنترل عملکرد بهبود داده شد. به کار بردن این شیوه‌های پیشرفته جبران تاخیر آزمایش ترکیبی زمان واقعی یا نزدیک به زمان واقعی را برای تحریک یک بعدی و دو بعدی (که

جابه‌جایی افقی یک یا دو درجه آزادی را کنترل می‌کند) ممکن کرد. مشخص شد که شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی سه بعدی با *SRMD* به علت عملکرد ناکافی ردیابی قائم ممکن نیست. برای رسیدن به عملکرد قابل قبول و دقت در درجه آزادی قائم کنترل‌شده نیرو، یک شبیه‌سازی ترکیبی باید حداقل ده برابر کندتر از زمان واقعی انجام شود [۵۵].

برخلاف کمبود سلول بار برای سنجش مستقیم نیروهای تکیه‌گاه آزمایشی، با اندازه‌گیری نیروها به وسیله سلول‌های بار عملگر و اصلاح فوری اثرات اینرسی و اصطکاک در آن‌ها، نتایج قابل اعتمادی از آزمایش حاصل شد. برای این هدف، یک مدل جدید برای اصلاح نیروی اینرسی و اصطکاک تهیه و اجرا شد و سپس تنظیمات مختلف آزمایش با استفاده از شیوه‌های شناسایی سیستم کالیبره شدند [۵۵].

در انتهای این برنامه تحقیقاتی توصیه شده است تا عملکرد ردیابی دستگاه *SRMD* مورد استفاده در این سیستم آزمایش در شبیه‌سازی‌های ترکیبی آینده بیشتر بهبود داده شود. از آن جا که شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی یا نزدیک به زمان واقعی سیستم جداسازی لرزه‌ای می‌تواند رفتار واقعی جداگرها را دقیق‌تر در نظر بگیرد، توصیه شده است که روش‌های حداقل کردن خطاهای ردیابی و بهبود کنترل در راستای افقی و خصوصاً قائم گسترش داده شوند [۵۵].

فصل دوم

شناسایی آزمایشگاه‌ها فعال در زمینه ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

مقدمه فصل دوم:

همانطور که از بخش قبل می‌توان دریافت، اکثر امکانات و تجهیزاتی که برای ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق استفاده می‌گردد در بیشتر آزمایشگاه‌های سازه دنیا وجود دارند و آزمون‌های مربوط به آن‌ها قابل انجام است، اما در خصوص برخی از سازه‌ها به دلیل رفتار پیچیده و ناشناخته آن‌ها مانند برج‌های انتقال نیرو آزمون تمام مقیاس باید صورت پذیرد و از همین رو نیاز به تجهیزات آزمون تمام مقیاس مختص به این نوع از سازه‌ها می‌باشد که ایستگاه‌های آزمایش برج‌های انتقال نیرو را بطور کامل از آزمایشگاه‌های سازه دیگر مجزا ساخته است.

۱-۲ اجزای اصلی ایستگاه آزمون برج های انتقال نیرو

بطور کلی ایستگاه آزمون برج های انتقال شامل تجهیزات زیر می‌باشد:

- بستر آزمون^۱: محل استقرار برج‌ها جهت مونتاژ برج بر روی آن می‌باشد و قابلیت تحمل نیروها و ممانهای وارده به پایه‌های اصلی برج را داشته باشد، شکل ۱-۲.
- برج‌های کمکی عرضی و طولی: برج‌های کمکی در واقع دو برج مرتفع می‌باشند که راستای استقرار آن‌ها عمود بر هم و موازی اضلاع بستر آزمون و یا محل قرارگیری برج‌ها جهت آزمون می‌باشد، وظیفه برج‌های کمکی هدایت کابل‌های اعمال نیرو توسط قرقره‌ها در راستای مناسب جهت اعمال نیرو به برج تحت آزمون نوعی می‌باشد، که امکان اعمال نیرو را در راستای طولی، عرضی و قائم را به برج تحت آزمون فراهم می‌آورد، شکل ۲-۲.

¹ Test Pad

- عملگرهای اعمال نیرو: معمولاً وینچ‌ها و جک‌های هیدرولیک^۱ می‌باشند، که توسط کابل‌های متصل به آن‌ها نیرو را در نهایت به برج تحت آزمون اعمال می‌نمایند، شکل ۲-۳.
- اتاق کنترل: جهت تنظیم مقادیر و اعمال همزمان نیرو در جهات عرضی، طولی و عمودی می‌باشد.
- سلول‌های بار و دینامومترها^۲: تجهیزات اندازه‌گیری مقادیر نیروهای عرضی، طولی و عمودی که بصورت بر خط جهت ارسال اندازه‌گیری‌های انجام شده با اتاق کنترل در ارتباط می‌باشد، شکل ۲-۴.
- دستگاه کالیبره کردن سلول‌های بار و دینامومترها، شکل ۲-۵.
- تجهیزات قرائت جابجایی‌ها: بطور معمول از دوربین تئودولیت و خطکش جهت قرائت تغییر مکان و جابجایی سازه استفاده می‌گردد و یا اندازه‌گیری با سیستم قرائت بسیار دقیق لیزری صورت می‌پذیرد.
- تجهیزات نصب برج شامل جرثقیل، لیفت تراک و
- امکانات نمونه برداری و تست کشش قطعات برج.



شکل ۲-۱: بستر آزمون، جهت برپایی برج‌ها - آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک

¹ Electric Winches or Hydraulic Jacks

² Load Cell or Dynamometer



شکل ۲-۲: برجهای کمکی عرضی و طولی -آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک



شکل ۲-۳: عملگرهای اعمال نیرو



شکل ۲-۴: سلول های بار



شکل ۲-۵: دستگاه کشش یونیورسال جهت کالیبره نمودن سلول های بار

در فرآیند آزمون یک برج، نیروهای لازم توسط وینچهای الکتریکی و یا جکهای هیدرولیک تولید شده و توسط برج‌های کمکی ایستگاه و از طریق قرقه‌ها و کابل‌ها به نقاط مختلف برج در راستای مناسب اعمال می‌گردد. نحوه اعمال نیرو با استفاده از تجهیزات اتاق کنترل ایستگاه و بر اساس مقادیر نیروهای قرائت شده توسط لودسلها و دینامومترها تنظیم می‌گردد. در اتاق کنترل ایستگاه، برج تحت آزمون بطور کامل رویت شده و مقادیر سه مؤلفه عرضی، طولی و عمودی نیروها برای تمام نقاط اعمال نیرو به برج قرائت و کنترل می‌گردد. با استفاده از مکانیزم اعمال نیرو حالت‌های بارگذاری (*Load Cases*) تحت سناریوی مشخصی مطابق با آیین‌نامه‌های مربوط به برج اعمال می‌گردند.

۱-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو در هند

در هند شرکت‌های مختلفی در زمینه آزمون نوعی برج‌ها انتقال قدرت فعال می‌باشند، بطور مثال شرکت بین‌المللی *KEC* متعلق به گروه *RPG* پیشرو در زمینه مهندسی، تهیه و ساخت^۱ دارای ۴ ایستگاه آزمایش برج انتقال قدرت در هند و یک ایستگاه آزمایش برج انتقال قدرت در برزیل است، [۷۳]. هدف این ایستگاه‌ها ارزیابی پارامترهای طراحی برج در شرایط مختلف بارگذاری است. تمام این ایستگاه‌ها نزدیک امکانات ساخت قرار گرفته‌اند و قادر به آزمایش کردن انواع برج‌ها مانند برج‌های مشبک^۲، برج‌های مهاری^۳، برج‌های تلسکوپی هستند. در ادامه به معرفی ایستگاه‌های آزمایش برج انتقال قدرت در هند پرداخته می‌شود.

۱-۱-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو نگپور^۴

در دنیا، هند کشوری با تعداد امکانات آزمایشگاهی بالا می‌باشد. این تسهیلات آزمایشگاهی دارای ویژگی‌های مختلف بوده و در نگپور، واشی^۵، جیپور^۶ و جبالپور^۷ و چند شهر دیگر واقع شده‌اند که ایستگاه نگپور بزرگ‌ترین و گسترده‌ترین در هند است. تسهیلات آن قادر به آزمایش کردن برج‌های انتقال با پی تا ابعاد ۳۵ در ۳۵ متر مربع، ۹۰ متر ارتفاع و با نرخ ولتاژ بالا تا ۱۲۰۰ کیلوولت است. ظرفیت بالای تیرآهن‌های فولادی مدفون‌شده داخل پی بتنی گسترده این ایستگاه، بستر آزمونی برای آزمایش انواع برج‌ها را فراهم می‌کند. این تسهیلات امکان اعمال ۱۲۵ تن نیرو را در ۵۲ نقطه برج، به‌طور همزمان، فراهم آورده است. این ایستگاه به وسیله سیستم کسب داده و کنترل

^۱ Engineering, Procurement, and Construction, (EPC)

^۲ Lattice towers

^۳ Guyed towers

^۴ Negpur

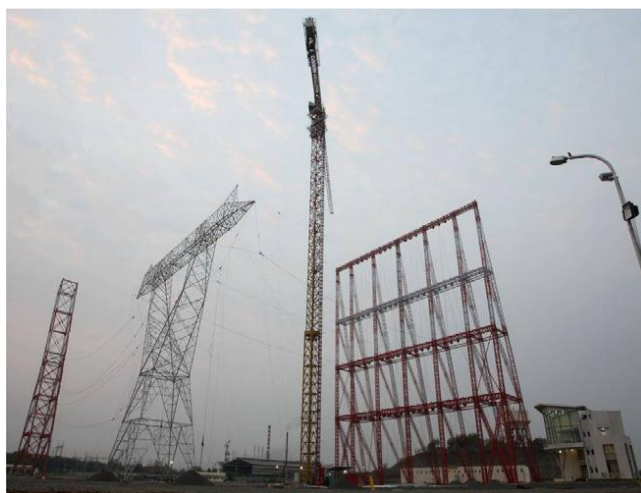
^۵ Vashi

^۶ Jaipur

^۷ Jabalpur

نظارتی^۱ اتوماتیک شده است که به وسیله یک ریزپردازنده^۲ کنترل می‌شود. برای بالا بردن دقت، وینچ‌های اعمال نیروی ایستگاه به درایورهای^۳ فرکانس متغیر و همچنین کنترل سریع فیلدباس^۴ تجهیز شده است [۷۴].

این تسهیلات قادر به آزمایش برج‌های خود نگهدارنده^۵ تا ولتاژ ۱۲۰۰ کیلوولت، برج‌های مهاری تا ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت و برج‌های تلسکوپی انتقال تا ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت می‌باشد. در این ایستگاه امکان آزمایش همزمان دو برج وجود دارد [۷۵]. شکل ۶-۲ تصویری از این ایستگاه را نشان می‌دهد، [۷۴].



شکل ۶-۲: ایستگاه آزمایش برج نگه‌بر [۷۴].

از ویژگی‌های برج جرثقیل آزمایشگاه ارتفاع ۹۲ متر، ظرفیت باربری ۲۰ تن و بومی با طول ۶۵ متری است [۷۵]. در جدول ۱-۲ بیشینه ظرفیت ایستگاه‌های آزمایش هند که متعلق به شرکت KEC است، آورده شده است [۷۳].

¹ Supervisory Control and Data Acquisition, (SCADA)

² microprocessor

³ Drivers

⁴ Process Field Bus, (PROFIBUS). Fieldbus: is the name of a family of industrial computer network protocols used for real-time distributed control.

⁵ Self-supporting towers

جدول ۱-۲: ایستگاه‌های آزمایش دیگر متعلق به شرکت KEC [۷۳].

ایستگاه آزمایش	جیبور	جبالپور	نگپور
نیرو بالابرنده در هر پایه (کیلونیوتن)	۱۷۱۶	۴۴۰۰	۱۲۲۶۰
فشار در هر پایه (کیلونیوتن)	۱۷۱۶	۴۴۰۰	۱۲۲۶۰
عرض پایه (متر)	۱۴	۲۴	۳۵
ارتفاع برج (متر)	۴۵	۵۷/۸	۹۰
لنگر واژگونی در پایه (کیلونیوتن در متر)	۵۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰

در هند آزمایشگاه‌های بیشتری برای برج‌های انتقال قدرت وجود دارد که در زیر ۵ مورد از آن‌ها توضیح داده شده‌اند.

۲-۱-۱-۲ ایستگاه آزمایش و تحقیق برج‌های انتقال قدرت پالوارام^۱ (چنای^۲)

این ایستگاه متعلق به مرکز تحقیق مهندسی سازه^۳ است، که یک واحد از شورای تحقیق صنعتی و علمی^۴ می‌باشد، [۷۴]. CSIR – SERC، ایستگاه تحقیق و آزمایش برج^۵ این مرکز از زمان تاسیس ایستگاه، سال ۱۹۸۴، به درستی درخشان است. تحقیق‌های مهم مرتبط با تحلیل، طراحی و آزمایش برج، سازه‌های شبیه به برج و اجزای برج در TTRS به وسیله متخصصین آن انجام شده است. تصویری از آزمایش برج در این ایستگاه آزمایش در شکل ۷-۲ آمده است [۷۶].

^۱ Pallavaram

^۲ Chennai

^۳ Structural Engineering Research Center, (SERC)

^۴ Council of Scientific and Industrial Research, (CSIR)

^۵ Tower Testing and Research Station, (TTRS)



شکل ۷-۲: آزمایش برج ۲۲۰ کیلو ولت [۷۶].

تحقیقات اصلی ایستگاه [۷۶]:

- توسعه پیکربندی بهینه برج‌های ارتباط و انتقال.
- مواد و مقاطع عرضی جایگزین فولاد برای برج‌ها و سازه‌های شبیه برج.
- فناوری‌های مقاوم‌سازی برای پی‌ها و برج‌های موجود.
- تحلیل گسیختگی برج‌های خط انتقال و سنجش‌هایی برای جلوگیری از خرابی.
- توسعه سیستم ترمیم فوری برای خطوط قدرت.
- مطالعه تجربی برج‌های دوگانه فولاد – $GFRP^1$.
- توسعه سیستم‌های سازه‌ای مهار برای خطوط انتقال قدرت و ارتباط.
- طراحی و شرح اتصالات مقطع سرد نورد شده.

تسهیلات اصلی این ایستگاه [۷۶]:

- آزمایش برج‌های مشبک مثلثی، مستطیلی و مربعی، برج‌های مهار و تلسکوپی طبق IEC 60652 و 1978-IS:802.
- بیشینه عرض پایه ۲۴ متر و بیشینه عرض بازو ۴۰ متر.
- بیشینه ارتفاع برج ۸۰ متر و بیشینه کشش رسانا ۱۰۰۰ کیلونیوتن.
- بیشینه نیروی برکنش در پایه ۷۵۰۰ کیلونیوتن.
- ظرفیت بارگذاری عرضی ۱۲۰۰۰ کیلونیوتن، طولی ۵۵۰۰ کیلونیوتن و قائم ۵۰۰۰ کیلونیوتن.
- تسهیلات بارگذاری هیدرولیکی حلقه بسته پیشرفته با سیستم کنترل دیجیتال در زمان واقعی.
- بستر آزمایش با مهارهای پیش‌تنیده.
- تسهیلات جرثقیل ۸۰ متری.

¹ Glass Fiber Reinforced Plastic, (GFRP)

- سنجش بار با سلول اندازه‌گیری بار
- سنجش انحنا با تئودولیت.
- ابزار دقیق کرنش‌سنج و سیستم برخط کسب داده^۱.
- دقت سیستم بار حدود ۱ درصد و ۵۰۰ کیلو نیوتن امکانات کالیبراسیون ظرفیت.
- تسهیلات شبکه ارتباط از راه دور زنده برای آزمایش برج.

پروژه‌های اصلی [۷۶]:

- آزمایش برج دو مداره ۵۰۰ کیلو ولتی و خود نگهدارنده ۸۰ متری برای شیلی^۲ و پرو^۳.
- برج‌های مهار شده ۳۰ و ۲۰ متری برای هند.
- برج تلسکوپی دو مداره ۴۰۰ کیلو ولتی برای هند.
- آزمایش برج‌های ۴ مداره ۲۳۰ کیلو ولتی پایه باریک با ۶۵۰ تن نیروی برکنش.
- آزمایش ایزولاتورهای چینی، پلیمر و شیشه‌ای.
- ارزیابی وضعیت برج‌های ارتباط و تلسکوپی.
- ارزیابی وضعیت برج‌های موجود صدا و سیما.
- طراحی برج مشبک ۱۰۰ متری برای ارتباط یکپارچه بسیار فرکانس بالا (VHF^۴) در امتداد خط ساحلی تامیل نادو^۵ به عنوان بخشی از پروژه کاهش خطر فاجعه ساحلی^۶.
- بررسی طراحی برج عبور رودخانه به ارتفاع ۲۳۶ متر و دو جریانی ۴۰۰ کیلو ولتی هند.
- طراحی دکل‌های مهاری و خود نگهدارنده ۵۰ متر در ۲۰ متر برای ارزیابی منبع باد در هند.
- طراحی دکل حسگر هواشناسی مهاری ۷۲ متری.
- مشتری‌های بین‌المللی از ایران^۷، مالزی^۸، مصر^۹، کانادا^{۱۰}، پرو^{۱۱} و غیره.

¹ Data Acquisition System, (DAS)

² Chile

³ Peru

⁴ Very High Frequency, (VHF)

⁵ Tamil Nadu

⁶ Coastal Disaster Risk Reduction Project

⁷ Iran

⁸ Malaysia

⁹ Egypt

¹⁰ Canada

¹¹ Peru

در این ایستگاه، بارگذاری عرضی^۱ به وسیله عملگرهای هیدرولیکی^۲ با ظرفیت ۱۲۰۰۰ کیلو نیوتن اعمال می‌شود که بر روی یک ساختار فونداسیون بتن مسلح مستقر شده‌اند [۷۴].

عملگرهای اعمال نیروی طولی شامل ۱۱ عملگرند که می‌توانند نیرویی تا ۵۵۰۰ کیلو نیوتن اعمال کنند. عملگرهای اعمال نیروی قائم در سطح زمین و جلوی پد آزمایش و در فاصله ۵۰ متری است و ظرفیت بارگذاری آن ۵۰۰۰ کیلو نیوتن است [۷۴]. تصویر ایستگاه ram طولی و قائم در شکل ۸-۲ آمده است [۷۶].



(ب)



(الف)

شکل ۸-۲: ایستگاه ram (الف) ایستگاه ram طولی، (ب) ایستگاه ram قائم [۷۶].

۲-۱-۱-۳ ایستگاه آزمایش مرکز تحقیق و گسترش برج‌های انتقال قدرت کالپا-تارو^۳

ایستگاه آزمایش مرکز تحقیق و گسترش انتقال قدرت کالپا-تارو دارای تجهیزات ناب و پیچیده‌ای است که آن را در میان بزرگترین و بهترین انواع خود در دنیا ممتاز می‌کند [۷۷].

در سال ۱۹۹۸، آزمایشگاه برج و مرکز تحقیق و توسعه انتقال قدرت کالپا-تارو ساخته شد. این ایستگاه قادر است برج‌های دو مداره را تا ظرفیت ۸۰۰ کیلوولت و برج‌های تک مداره تا ظرفیت ۱۲۰۰ کیلوولت را آزمایش نماید. این تسهیلات امکان آزمون نوعی برج‌های انتقال با ابعاد پی تا ۲۷ در ۲۷ مترمربع، ارتفاع ۸۵ متر و بازوهایی تا عرض ۴۰ متر را فراهم می‌آورد، [۷۴].

KPTL، با موفقیت، بیشتر از ۳۸۰ برج را برای مشتریان داخلی و خارجی با طیفی از ۲۲۰ کیلوولت تا ۱۲۰۰ کیلوولت آزمایش کرده است. این شرکت توسط یک تیم چند رشته‌ای از مهندسان متخصص، تسهیلات نرم‌افزار و سخت‌افزار پیچیده پشتیبانی می‌شود و خدمات مهندسی با ارزش برای مشتریان فراهم می‌کند، [۷۷].

از دیگر ویژگی‌های این ایستگاه [۷۷]:

¹ Transverse loading

² Hydraulic actuators

³ Kalpa-Taru Power Transmission Limited, (KPTL)

- شکل پایه برج تحت آزمایش می‌تواند مربعی یا مستطیلی باشد.
- بیشینه نیروی برکنش ۵۰۰ تن در هر پایه.
- بیشینه فشار ۶۲۵ تن در هر پایه.
- لنگر واژگونی ایمن ۲۷۰۰۰ تن در متر.
- ایستگاه کنترل مرکزی فشرده مبنی بر صفحه نمایش لمسی برای اعمال نیرو.
- صفحه نمایش آزمایش برای بازدیدکنندگان.
- ظرفیت سنجش کرنش در اعضا بحرانی که می‌تواند در لحظه به ظرفیت سنجش نیرو محوری تبدیل شود.
- تسهیلات آزمایش کاملاً خودکار برج با تکنولوژی SCADA.
- نسخه چاپی نتایج کالیبراسیون و آزمون بارگذاری و اوج بار در آزمایش مخرب می‌تواند به دست آید.
- از معکوس‌کننده‌ها یا درایوهای قابل تغییر AC^1 استفاده شده است به طوری که می‌توان سرعت بارگذاری متغیر را بدون استفاده از موتورهای اضافی برای وینچ^۲ حاصل کرد.
- شبیه‌سازی نصب برج از طریق جرثقیل.
- ضبط عمل آزمایش از طریق ۴ دوربین مدار بسته که در محل‌های مختلف جای داده شده‌اند.

تجهیزات اصلی ایستگاه [۷۷]:

- وینچ الکتریکی ۴۷ تن.
- ظرفیت سلول بار بالا تا ۴۰ تن.
- ایستگاه کنترل مرکزی با بهبوددهنده سیگنال^۳.
- دستگاه کشش Universal ۶۰ تن.
- صفحه نمایش آزمایش برای بازدیدکنندگان.
- جرثقیل با ۶۵ متر ارتفاع و شعاع بوم ۷۰ متر.

۲-۱-۱-۴ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال قدرت قوتی^۴

شرکت سازه‌های جیوتی^۵ ارائه‌کننده روش‌های مختلف برای خطوط انتقال قدرت ولتاژ بالا، ایستگاه‌های فرعی و خطوط توزیع است. این شرکت طیف وسیعی از خدمات را مانند طراحی، مشاوره مهندسی، آزمایش برج، ساخت و

¹ is a type of adjustable-speed drive used in electro-mechanical drive systems to control AC motor speed and torque by varying motor input frequency and voltage.

² winch

³Signal conditioner

⁴ Ghoti

⁵ Jyoti Structures Limited, JSL

مدیریت پروژه ارائه می‌دهد. این شرکت در سال ۱۹۷۴ تأسیس شد و در سال ۱۹۹۷ ایستگاه آزمایش برج قوتی را راه انداخت [۷۴].

این ایستگاه شامل دو بستر آزمایش اصلی و فرعی است. پد آزمایش اصلی می‌تواند برج انتقال با بیشینه ابعاد پایه ۲۶ در ۲۶ متر مربع را آزمایش کند در حالی که پد آزمایش فرعی برج انتقال با ابعاد پایه بالا تا ۱۵ در ۱۵ مترمربع را آزمایش می‌کند. انواع برج‌ها (مربعی و مستطیلی) شامل برج‌های مهاری، مشبک و تلسکوپی قابل آزمایش در این ایستگاه هستند. این ایستگاه دارای سیستم SCADA و HMI^۱ است و قادر به آزمایش برج تا ظرفیت ۱۲۰۰ کیلوولت است [۷۴].

۲-۱-۱-۵ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال قدرت گامون^۲

از سال ۱۹۸۴، گامون یکی از شرکت‌های پیشرو در زمینه پروژه‌های خط انتقال ولتاژ بالا و توزیع است. از سال ۱۹۹۴، این شرکت دارای تسهیلات طراحی، ظرفیت ساخت برج و آزمایش آن (۱۱۰۰۰۰ تن در سال) است و بالای ۶۰۰۰۰۰ تن سازه و برج تأمین کرده است که ۸۷۰۰۰ تن آن برای کشورهای مختلف است [۷۸]. این شرکت دارای گواهینامه‌های ISO 9001:2008، ISO 14001:2004 و OHSAS18001:2007 در زمینه طراحی، آزمایش و ساخت می‌باشد و برای آمریکا شمالی، آفریقا، خاورمیانه و جنوب شرقی آسیا برج ساخته است [۷۸].

ایستگاه آزمایش برج گامون واقع در واردا^۳ می‌تواند برج‌هایی با بیشینه ارتفاع ۸۵ متر، عرض پایه ۳۰ متر و ظرفیت ۱۲۰۰ کیلوولت را تا ۶۲ نقطه همزمان بارگذاری کند. این تسهیلات کاملاً اتوماتیک است و به تکنولوژی نرم‌افزار SCADA مجهز است [۷۴]. در این ایستگاه، بیش از ۶۰ نوع برج تا ظرفیت ۸۰۰ کیلوولت برای مشتریان داخلی و خارجی شامل برج‌های D/C ۷۶۵ کیلوولت، برج‌های مهاری S/C ۷۳۵ کیلوولت و تلسکوپی M/C ۲۷۵ کیلوولت طراحی و آزمایش شده‌اند.

۲-۱-۱-۶ ایستگاه آزمایش و تحقیق خط انتقال لارسن و توبرو (L & T)^۴

ایستگاه تحقیق و آزمایش خط انتقال L & T (TLTRS^۵) یکی از بزرگترین ایستگاه‌های آزمایش برج هند است و اولین ایستگاه خصوصی آزمایش هند است که مورد تایید اعتبار سنجی ملی آزمایشگاه‌های آزمایش و کالیبراسیون^۶ می‌باشد [۷۹]. تصویری از این ایستگاه در شکل ۲-۹ آورده شده است [۷۹].

^۱ HMI Systems can provide custom design solutions for electronics and software engineering.

^۲ Gammon

^۳ Wardha

^۴ Larsen & Toubro

^۵ Transmission Line Testing & Research Station, (TLTRS)

^۶ National Accreditation Board for Testing & Calibration Laboratories, (NABL)



شکل ۹-۲: ایستگاه آزمایش L & T [۷۹].

TLTRS از بدو تاسیس در نوامبر^۱ ۲۰۰۹، برای مشتریان بین‌المللی از اسپانیا^۲، عمان^۳، ابوظبی^۴ و مصر برج آزمایش کرده است [۷۹]. این ایستگاه با مساحت ۲۵ هکتار در کانچیپورام^۵ (نزدیک چنای) تاسیس شده است تا برج‌های خط انتقال با ولتاژهای مختلف را آزمایش کند. *TLTRS* خود را با ویژگی‌های طراحی بین‌المللی وقف می‌دهد و می‌تواند کفایت تمام اجزای سازه‌های خط انتقال و اتصالشان را در برابر بارهای طراحی آزمایش کند. به‌علاوه، دیدی از توزیع واقعی تنش و عملکرد سازه فراهم می‌کند [۷۹].

این ایستگاه تجهیزاتی دارد تا برج‌های مشبک با پایه مستطیلی یا مربعی، تلسکوپی، سازه‌های لوله‌ای و برج‌های مهاری تا ظرفیت ۱۲۰۰ کیلوولت را آزمایش کند. همچنین، جدا از تحلیل درستی فرض‌های انجام شده در محاسبات طراحی، از عملکرد برج مطابق ضوابط عملکرد مطلوب اطمینان حاصل می‌کند [۷۹].

اتاق کنترل آن، بزرگترین نوع خود در هند است و به گالری مشاهده ۳۶۰ درجه و بدون مانع مجهز شده است تا مهندسين بتوانند کل فرآیند آزمایش را بهتر کنترل کنند. این اتاق به ماشین آزمایش جهانی (*UTM*^۶) دیجیتالی

¹ November

² Spain

³ Oman

⁴ Abu Dhabi

⁵ Kanchipuram

⁶ Universal Testing Machine, (UTM)

ظرفیت بالا (۱۰۰ تن) برای کالیبراسیون سلول بار مجهز است. همچنین، یک سیستم خاص کنترل و اکتساب داده و بزرگترین تجهیزات برای پشتیبانی اجرا، دارد. تصویر داخل و خارج اتاق کنترل در شکل ۲-۱۰ آمده است [۷۹].



(ب)



(الف)

شکل ۲-۱۰: اتاق کنترل، الف) خارج اتاق کنترل، ب) داخل اتاق کنترل [۷۹].

ایستگاه به سیستم SCADA مجهز است و همراه با عمل اتوماتیک، نیمه اتوماتیک و دستی، حرکت وینچ‌ها کنترل می‌شود و از تئودولیت‌های دیجیتالی^۱ و سلول‌های کرنش‌سنج^۲ برای سنجش نیروها و انحنایها، در شرایط مختلف، استفاده می‌گردد [۷۴]. ویژگی یکتا دیگر این مرکز آزمایش، واحد ساخت نمونه برای انجام ساخت یا مونتاژ نمونه برج‌های آزمایش است. اصلاحات پیش‌بینی شده در اعضا برج در صورت شکست فرآیند آزمایش به سرعت انجام می‌شود. تسهیلات ساخت نمونه در ناحیه‌ای به مساحت ۱۸۱۱/۶ مترمربع تنظیم شده است و به ماشین کنترل عددی رایانه (CNC^۳) جهت تسریع فرآیند مجهز شده است و مشکلات انتقال اعضا برج مونتاژ شده از تسهیلات ساخت به ایستگاه آزمایش با استفاده از واحد ساخت نمونه حل شده است [۷۹].

امتیازات ایستگاه [۷۹]:

- سیستم دیده‌بانی و بارگذاری مرکزی رایانه‌ای شده^۴ برای شبیه‌سازی بارگذاری واقعی.
- آزادی مهندسین طراح برای انتخاب هر شکلی از برج برای دستیابی به بهینه‌سازی.
- وینچ‌های الکتریکی با درایوهای فرکانس متغیر در سرعتی که امکان بارگذاری نرم را ایجاد می‌کنند.
- دقت در آزمایش که با SCADA حاصل می‌شود.
- امکان آزمایش برج تا ۱۲۰۰ کیلو ولت با ۹۵ متر ارتفاع.

¹ Digital theodolites

² Strain gauge cells

³ Computer Numerical Control, (CNC)

⁴ Computerised central loading and monitoring system

- امکان آزمایش برج تا بار سنگین استثنایی ۱۰۰۰ تن در پایه و عرض پایه بزرگ تا ۳۵ متر. در جدول ۲-۲ اطلاعات فنی این ایستگاه آورده شده است [۷۹].

جدول ۲-۲: اطلاعات فنی ایستگاه L & T [۷۹].

ویژگی	ظرفیت
ابعاد کلی پی	۳۵×۳۵ متر در متر
بیشینه ارتفاع برج تحت آزمایش	۹۵ متر
بیشینه نیروی فشاری / بالابرنده هر پایه	۱۰۰۰ تن
لنگر واژگونی مجاز	۷۰۰۰۰ تن در متر
بیشینه گسترش بازو	۷۰ متر
بیشینه بار سیم عرضی	۱۰۰ تن در نقطه
بیشینه بار سیم طولی	۷۰ تن در نقطه
بیشینه بار سیم قائم	۶۰ تن در نقطه
سیستم سنجش بار	سلول بار از نوع کرنش سنج
نصب برج	جرثقیل
آزمایش مواد و کالیبراسیون	UTM دیجیتالی ۱۰۰ تن

۲-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو برزیل

ایستگاه آزمایش برج برزیل بزرگترین در آمریکا است و در شهر بلو هوریزنت^۱ واقع شده است. ایستگاه آزمایش، بر روی نمونه با مقیاس کامل طیف گسترده‌ای از سازه‌ها شامل تیرک، برج‌های مهاری و برج‌های مشبک تا ارتفاع ۷۵ متر آزمایش انجام می‌دهد و مهم‌ترین شرایط و متغیرها را شبیه‌سازی می‌کند [۷۴].

نیرو عرضی کل تا ۲۸۰ تن و نیرو طولی کل تا ۲۲۰ تن به‌طور همزمان می‌تواند اعمال شود و کرنش سنج‌ها به‌طور همزمان خوانده می‌شوند. وجود یک پد ثانویه پیش‌مونتاز را تسهیل می‌کند و زمان آزمایش را کاهش می‌دهد [۷۴]. در جدول ۳-۲ بعضی ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آورده شده است [۷۴].

جدول ۳-۲: ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آزمایش برزیل [۷۴].

ویژگی	ظرفیت
ظرفیت بارگذاری (کیلوولت)	۷۶۵
بعد سکو آزمایش (مترمربع)	۲۶×۲۶
ارتفاع برج (متر)	۷۵
لنگر واژگونی بیشینه (تن در متر)	۱۶۰۳۰
بیشینه نیرو برکنش/ فشار در پایه (تن)	۴۵۰/۴۰۰

ایستگاه فوق متعلق به شرکت *KEC* هند می‌باشد، شرکت *KEC* از سال ۱۹۷۰ بیشتر از ۶۰۰ برج را در این آزمایش کرده و نتایج قابل اعتماد برای مشتریان خود در سراسر آمریکا حاصل کرده است، و همچنین گواهی‌نامه‌های *ISO 9001* سیستم مدیریت کیفیت، *ISO 14001* سیستم مدیریت محیطی و *OHSAS 18001* سیستم مدیریت ایمنی و سلامتی حرفه‌ای را دریافت نموده است، [۷۳]. همچنین این شرکت بیشتر از ۲۲۰۰ برج در ۳ ایستگاه هند آزمایش نموده است. در جدول ۴-۲ ویژگی‌های ۳ ایستگاه هند و ایستگاه برزیل آورده شده است [۷۳].

جدول ۴-۲: ویژگی‌های ایستگاه آزمایش متعلق به *KEC* [۷۳].

¹ Belo Horizonte

ویژگی	هند			برزیل
	نگپور	جیپور	جبالپور	
ظرفیت آزمایش (کیلوولت)	۱۲۰۰	۴۰۰	۸۰۰	۷۶۵
پیکربندی پایه	مربع، مستطیل، ستون تکی، برج با طناب کشیده شده	مربع	مستطیلی تا بعد ۱۸ متر، مربعی تا بعد ۲۴ متر	مربعی، ۲۶ متر
ارتفاع دکل عرضی - طولی (متر)	۹۰، ۹۰	۴۵، ۴۸	۵۰، ۵۸	۷۵، ۷۵
وسیله اعمال نیرو	وینچ‌های الکتریکی با درایوهای فرکانس متغیر و SCADA	وینچ‌های الکتریکی	وینچ‌های الکتریکی	وینچ‌های مکانیکی

۲-۱-۳ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو اسپانیا^۱

این ایستگاه آزمایش در سویل اسپانیا واقع شده است و مجهز به نرم‌افزاری است که امکان اعمال و سنجش همزمان نیرو در ۳ جهت را فراهم می‌کند و اجازه می‌دهد تا همزمان نیرو بر همه سیلندرها^۲، با یک سرعت کنترل شده به وسیله عملگر، افزایش یابد. گام‌های مختلف اعمال نیرو به‌طور دستی برنامه‌ریزی می‌شود و بار در هر گام به اندازه زمان لازم نگهداشته می‌شود. تصویری از این ایستگاه در شکل ۲-۱۱ آورده شده است [۷۴].

جابه‌جایی سازه با سیستم لیزر^۳ سنجیده می‌شود و اجرای آزمایش از طریق اینترنت قابل دنبال کردن است [۷۴].

اتاق کنترل تقریباً در ۸۰ متری پایه کلی، با یک دید کامل روی برج در حال آزمایش، قرار می‌گیرد. این اتاق به یک واحد مرکزی مجهز است که در آن تمام آزمایش‌ها کنترل می‌شوند. در یک صفحه نمایش^۴ مقادیر اعمال شده در هر نقطه و انحناها در نقاط پیش‌بینی شده، به‌موقع، دیده می‌شوند و آزمایش با یک دوربین ثبت می‌شود [۷۴].

¹ Spain

² cylinders

³ Laser

⁴ Screen



شکل ۲-۱۱: ایستگاه آزمایش برج اسپانیا [۷۴].

سلول‌های بار که به نقطه بارگذاری سازه متصل شده‌اند، نیروی برآیند اعمال شده را می‌سنجند. سلول‌های بارگذاری موجود ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ تن هستند [۷۴].

در این ایستگاه، درخصوص سیستم امنیتی به کار رفته شده برای تسهیلات آزمایش توجه ویژه شده است، چرا که در هنگام آزمایش هر اتفاقی ممکن است رخ دهد مانند یک گسیختگی پیش‌بینی نشده در یک عضو یا اضافه بار پیش‌بینی نشده در یک سیلندر، برای جلوگیری این موارد، دو سیستم امنیتی در ایستگاه وجود دارد [۷۴]:

۱- خطا یا شکست در یک سیلندر: رایانه کنترل کننده آزمایش، به طور خودکار، مقادیر خطای بالاتر از ۰/۱ درصد را اصلاح می‌کند.

۲- گسیختگی در سازه: رایانه، به طور خودکار، ورود انرژی سیلندرها را مسدود می‌کند.

در جدول ۲-۵ بعضی ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آورده شده است [۷۴].

جدول ۲-۵: ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آزمایش اسپانیا [۷۴].

ویژگی	ظرفیت
بعد سکو آزمایش (متر در متر)	۲۰×۲۰
لنگر واژگونی بیشینه (تن در متر)	۱۲۰۰۰
بیشینه ارتفاع ایستگاه آزمایش (متر)	۷۴ و ۷۰
بیشینه ارتفاع برج مورد آزمایش (متر)	۷۲

ویژگی	ظرفیت
بیشینه نیرو بالا بر و فشار در پایه (تن)	۷۵۰
بیشینه بار یک نقطه (تن)	۵۰

۴-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو چین^۱

ایستگاه آزمایش برج انتقال سازمان تحقیق ساخت قدرت الکتریکی^۲ در شمال شهرک لیانگشیانگ^۳، یک قطب حمل و نقل در حومه جنوب شرقی پکن، واقع شده است. این ایستگاه در سال ۱۹۵۸ تاسیس شده است و به عنوان یکی از آزمایشگاه‌های مهم دولت چین در سال ۲۰۰۷ انتخاب شد و تاکنون بیشتر از ۸۰۰ مورد آزمایش برای نمونه برج انتقال داخلی و خارجی انجام داده است.

در جدول ۶-۲ بعضی ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آورده شده است [۷۴].

این ایستگاه بارها بهسازی شده و به‌طور پیوسته تجهیزات آزمایش خود را بهبود داده است و بر تحقیق سازه‌ای، طراحی بهینه و آزمایش برج انتقال تمرکز کرده است و قادر است تا آزمایش مقاومت مکانیکی برج انتقال چند مداره ۵۰۰ کیلوولتی، دومیاده ۷۵۰ کیلوولتی و تک مداره با سطح ولتاژ بالاتر را انجام دهد [۷۴].

جدول ۶-۲: ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آزمایش چین [۷۴].

ویژگی	ظرفیت
بعد سکو آزمایش (متر در متر)	۲۴×۲۴
لنگر واژگونی بیشینه (تن در متر)	۱۵۴۰۰
ارتفاع بیشینه ایستگاه آزمایش (متر)	۶۰ (قاب طولی) و ۵۴ (قاب عرضی)
ارتفاع بیشینه برج تحت آزمایش (متر)	۵۰
نیرو بیشینه برکنش و فشاری در پایه (تن)	۴۰۰
بار بیشینه یک نقطه (تن)	۴۸ (۲۴ نقطه عرضی و ۲۴ نقطه طولی)

¹ China

² Electric Power Construction Research Institute, (EPCRI)

³ Liangxiang

ایستگاه دارای ۲ محوطه مونتاژ برج با ابعاد ۱۰۰ متر در ۲۰ متر و ۴۵ متر در ۴۰ متر است که برای مونتاژ کردن برج و انبار مصالح برج استفاده می‌شوند [۷۴].

ایستگاه آزمایش به ۲ جرثقیل یکی ۱۰ تنی و دیگری ۳۰ تنی مجهز است. جرثقیل ۳۰ تنی با بوم ۲۷ متری، به راحتی، توانایی مونتاژ کردن یا پیاده کردن هر نوعی از برج را دارد [۷۴].

بستر آزمایش بتن مسلح این ایستگاه جهت برپایی برج‌های تحت آزمون با سطح ۲۴ متر در ۲۴ متر و ضخامت دال ۲/۳ متر است. صفحه بالا پی ۹ مجرای پیش اجرا شده با مقطع عرضی T معکوس در راستای شرقی- غربی دارد. عمق مجراها ۰/۷ متر بوده و فاصله بین مجراها ۲/۷ متر است [۷۴].

نیروی برکنش این فونداسیون در پایه برج ۴۰۰ تن است و لنگر واژگونی بیشینه ۱۵۴۰۰ تن در متر است. فونداسیون به ۳ تیر فولادی با نیروی مقاوم رو به بالا ۴۰۰ تنی، ۳۰۰ تنی و ۱۵۰ تنی و مهارهای ضربدری افقی متناظر مجهز است [۷۴].

برج بارگذاری طولی ۶۰ متر ارتفاع و ۴۲ متر عرض دارد و از ۳۰۰ تن مواد فولادی استفاده می‌کند. برج بارگذاری عرضی ۵۴ متر ارتفاع و ۱۲ متر عرض دارد و از ۱۰۰ تن مواد فولادی استفاده می‌کند. ۶ لایه تیر افقی فولادی نصب می‌شوند و نقاط هدایت طناب‌هاب فولادی دارای ظرفیت بیشینه ۲۰ تن می‌باشد، [۷۴].

سیستم بارگذاری هیدرولیکی عرضی و طولی نیروهای لازم را بر برج آزمایش اعمال می‌کند، سیستم بارگذاری هیدرولیکی طولی به ۲۰ سیلندر هیدرولیکی بارگذاری مجهز است که ۸ سیلندر هیدرولیکی خروجی ۴۰ تن، ۶ سیلندر خروجی ۲۰ تن و ۶ سیلندر دیگر هر کدام خروجی ۱۲ تن دارند. بیشینه دامنه جابه‌جایی سیلندر هیدرولیکی ۳/۸ متر است. به علاوه، ۴ وینچ الکتریکی با خروجی ۱ تا ۵ تن دارد. سیستم بارگذاری هیدرولیکی عرضی به ۱۶ سیلندر بارگذاری هیدرولیکی مجهز است که ۴ سیلندر هیدرولیکی خروجی ۴۰ تن، ۶ سیلندر خروجی ۲۰ تن و ۶ تای دیگر هر کدام خروجی ۱۲ تن دارند. همچنین ۸ وینچ الکتریکی با خروجی ۲ تا ۸ تن وجود دارد [۷۴].

سیستم کنترل و اندازه‌گیری بار مبنی بر رایانه، بار اعمال شده به وسیله سیستم بارگذاری هیدرولیک را کنترل و اندازه‌گیری می‌کند و بارها را در هر سطحی ثبت می‌کند. این سیستم به ۳۶ کانال مجهز است تا با ۳۶ سیستم بارگذاری سیلندر هیدرولیکی، که قبلاً بیان شد، همراه شود. سیستم بارگذاری خودکار علاوه بر این که بارگذاری همزمان در تمام نقاط بارگذاری را محقق می‌کند، هر سطح بارگذاری را خودکار ثبت می‌کند. در مقایسه با بارگذاری به وسیله وینچ، زمان بارگذاری به طور موثر کاهش می‌یابد بنابراین صحت بارگذاری بهبود داده می‌شود [۷۴].

ماشین کالیبراسیون نیرو برای کالیبره کردن حسگرهای نیرو، قبل و بعد آزمایش، همچنین برای اطمینان حاصل کردن از صحت اطلاعات بارگذاری و قابلیت اعتماد استفاده می‌شود. این ماشین خروجی ۵۰ تن با دقت ۰/۰۲ درصد و ضریب دقت تحلیل ^۱ ۰/۱ درصد دارد. همچنین به نرم‌افزار نظارت رایانه و صفحه نمایش مجهز است [۷۴]. تصویر این ایستگاه در شکل ۲-۱۲ آمده است [۷۴].

¹ Resolution factor



شکل ۲-۱۲: ایستگاه آزمایش برج چین، الف) برج فولادی، ب) ستون فولادی، ج) آزمایش بارگذاری [۷۴].

۲-۱-۵ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو ژاپن^۱

ایستگاه آزمایش برج ژاپن در شهر تامانو^۲، حدود ۲۵ کیلومتر جنوب شهر اوکایاما^۳ واقع شده است و مساحت ۴۵۶۰۰ متر مربع را در بر می‌گیرد. این ایستگاه که متعلق به شرکت AG آجیکاوا^۴ است، تسهیلات بارگذاری قائم، عرضی و طولی دارد. تصویری از این ایستگاه در شکل ۲-۱۳ آمده است [۷۴].



شکل ۲-۱۳: ایستگاه آزمایش برج در ژاپن، شرکت AG آجیکاوا [۷۴].

¹ Japan

² Tamano

³ Okayama

⁴ AG Ajikawa

در جدول ۷-۲ بعضی ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آورده شده است [۷۴].

جدول ۷-۲: ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه ژاپن [۷۴].

ویژگی	ظرفیت
بعد سکو آزمایش (متر در متر)	۳۰×۳۰
ارتفاع بیشینه برج تحت آزمایش (متر)	۸۵ (با امکان افزایش تا ۱۲۰ متر)
نیرو بیشینه برکنش و فشاری در پایه (تن)	۱۰۰۰
بار بیشینه یک نقطه (تن)	۷۰ (۴۸ نقطه بارگذاری)

۱۲ وینچ با ظرفیت ۳۵ تن برای اعمال نیرو در هر دو جهت عرضی و طولی نصب می‌باشد. به علاوه، ۱۵ موتور زنجیری با ظرفیت ۳۰ تن به عنوان وسایل فرعی اعمال نیرو در جهت‌های قائم، عرضی و طولی استفاده می‌شوند. این ایستگاه می‌تواند برج‌های انتقال را تا ارتفاع ۸۵ متر (با قابلیت افزایش ارتفاع تا ۱۲۰ متر) را آزمایش کند. پایه ایستگاه دارای ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر و بیشینه نیرو برکنش ۱۰۰۰ تن است [۷۴].

بارگذاری به وسیله سلول‌های بار کالیبره می‌شود و کرنش‌سنج‌های دیجیتالی در هر نقطه تکیه‌گاهی قرار داده می‌شوند. ۴۸ نقطه بارگذاری به وسیله ۳ کرنش‌سنج دیجیتالی سنجیده می‌شود. وینچ‌ها یا موتور زنجیری به صورت دستی و خودکار کنترل می‌شوند. انحنای در هر دو جهت طولی و عرضی با استفاده از یک ترانزیت^۱ روی زمین سنجیده می‌شوند [۷۴].

هر عملی را می‌توان در اتاق کنترل به وسیله دوربین‌های تلویزیونی در هر دو جهت طولی و عرضی دیده‌بانی کرد. همواره، جهت و سرعت باد به وسیله یک بادسنج مشاهده می‌شود تا اثرات آن در نتایج آزمایش در نظر گرفته شود [۷۴].

۶-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو عربستان سعودی^۲

ایستگاه در سال ۱۹۹۱، توسط شرکت قدرت و مخابرات البابتین^۳ راه‌اندازی شد. این ایستگاه در خاورمیانه منحصر به فرد است و روی سازه‌های انتقال قدرت، طبق استانداردهای بین‌المللی، آزمایش انجام می‌دهد.

تصویری از این ایستگاه در شکل ۲-۱۴ آمده است [۷۴].

¹ Transit

² Saudi-Arabia

³ Al-Babtain



شکل ۲-۱۴: ایستگاه آزمایش عربستان سعودی [۷۴].

در

جدول ۲-۸: بعضی ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه آورده شده است [۷۴].

جدول ۲-۸: ویژگی‌های فنی مرتبط با ظرفیت کلی ایستگاه عربستان سعودی [۷۴].

ظرفیت	ویژگی
۲۴×۲۴ (برای برج) ۲ (برای دکل)	بعد سکو آزمایش (متر در متر)
۱۷۰۰۵	لنگر واژگونی بیشینه (تن در متر)
تا ۴۵ متر برای ارتفاع بین ۳۵ تا ۵۵ متر و تا ۲۱ متر برای سایر ارتفاع‌ها	طول بیشینه بازو (متر)
۸۰ (برای برج)-۴۵ برای دکل	ارتفاع بیشینه برج تحت آزمایش (متر)
۷۵ (۱۶ نقطه عرضی، ۱۸ نقطه طولی، ۱۲ نقطه قائم)	بار بیشینه یک نقطه (تن)

سنجش انحنا برج‌های تحت آزمایش به وسیله تئودولیت‌های نوری انجام می‌شود. از یک جرثقیل با ۸۵ متر ارتفاع و طول تیر که پد X^1 را می‌پوشاند، برای فرآیند نصب استفاده می‌شود. یک رایانه اختصاصی همراه با نرم‌افزار برای

¹ $X-pad$

ابزار کنترل بار و سنجش‌های مشاهده‌شده در دسترس است. جهت دیده‌بانی برخط برج حین آزمایش از دو دوربین که به درستی تعیین محل شده‌اند، استفاده می‌شود [۷۴].

۷-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو رومانی^۱

ایستگاه آزمایش الکترومونتاز^۲ در بخارست^۳ واقع شده است. این ایستگاه آزمایش برج برای طراحی و آزمایش نمونه انواع برج فولادی مشبک، مهاری و تلسکوپی مناسب است و محدودیتی برای نوع مواد استفاده شده در ساخت تکیه‌گاه‌های تحت آزمایش وجود ندارد [۸۰].

بارهای قائم، طولی و عرضی و باد با طناب‌های فولادی که با وینچ‌های الکتریکی در یک سرعت ثابت و کم کشیده می‌شوند، اعمال می‌شود. تصویر وینچ‌های الکتریکی در شکل ۲-۱۵ آمده است [۸۰].



شکل ۲-۱۵: وینچ‌های الکتریکی [۸۰].

در این ایستگاه به برج تحت آزمایش ۶۶ نیرو می‌توانند همزمان اعمال و سنجیده شوند، نیروها به وسیله سلول‌های بار سنجیده می‌شوند. نیروها مستقل به برج‌های تحت آزمایش اعمال می‌شوند و از اتاق کنترل به وسیله SCADA مدیریت می‌شوند. در اتاق کنترل گروه شاهد می‌توانند آزمایش را بطور زنده دنبال کنند. اتاق کنترل در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است [۸۰].

¹ Romania

² Electromontaj

³ Bucharest



شکل ۲-۱۶: اتاق کنترل [۸۰].

در شکل ۲-۱۷ تصویری از آزمایش بارگذاری بر یک برج انتقال قدرت آورده شده است [۸۰].



شکل ۲-۱۷: آزمایش بارگذاری [۸۰].

ایستگاه آزمایش قادر است تا آزمایش نوعی برج‌های انتقال قدرت چند مداره را با ارتفاع حداکثر ۸۰ متر، با ابعاد پایه ۳۵ متر در ۳۵ متر پایه، با نیروی فشاری ۸۰۰ تن و نیروی کششی ۷۳۰ تن انجام دهد [۸۰].

۶۶ واحد وینچ جهت اعمال نیروهای طولی و عرض و قائم می‌توانند نیرویی بین ۵ تا ۸۰ تن را فراهم کنند.

کالیبره کردن سلول‌های بار قبل و بعد هر آزمایش در ایستگاه آزمایش برج آزمایشگاه انجام می‌شود. جابه‌جایی‌های طولی و عرضی در هر گام سنجیده می‌شوند [۸۰]. طراحی و آزمایش‌های نمونه بر طبق استاندارد IEC 60652:2002 در مقیاس واقعی انجام می‌شود [۸۰].

نرم‌افزار آزمایش و سیستم SCADA به وسیله یک شرکت رومانیایی طراحی، سازنده و فراهم کننده روش‌ها و تجهیزات خودکار ساخته شده است.

در جدول ۲-۹ اطلاعات فنی این ایستگاه آورده شده است [۸۰].

جدول ۲-۹: ویژگی‌های فنی ایستگاه آزمایش الکترومونتاز [۸۰].

ویژگی	ظرفیت
ابعاد کلی فونداسیون	۳۵×۳۵ متر در متر
بیشینه وزن برج	۱۲۰ تن
بیشینه ارتفاع برج تحت آزمایش	۸۲/۳ (۹۰) متر
بیشینه نیروی فشاری / برکنش هر پایه	۸۳۰ / (۱۰۰۰) ۷۰۰ تن
لنگر واژگونی مجاز	۵۰۰۰۰ تن در متر
بیشینه گسترش بازو	۷۰ متر
بیشینه بار سیم عرضی	(۱۰۰) ۹۰ تن در نقطه
بیشینه بار سیم طولی	(۷۵) ۶۰ تن در نقطه
بیشینه بار سیم قائم	(۵۰) ۴۵ تن در نقطه
ظرفیت بیشینه نیروی قائم	۵۰۰ تن (۲۰ نقطه)
سیستم سنجش بار	سلول بار از نوع کرنش سنج
جرثقیل برای نصب برج	جرثقیل Comansa (ارتفاع ۸۲/۳ متر با طول تیر ۵۵ متر و ظرفیت ۱۲ تن)
سنجش انحنا	تئودولیت نوری

ویژگی	ظرفیت
اعمال نیرو	وینچ‌های الکتریکی کنترل شده به وسیله درایوهای فرکانس متغیر و SCADA

۸-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو سارایوو^۱

از سال ۱۹۷۰ این ایستگاه موسسه تحقیق تجربی سازه‌های مشبک فلزی^۲ نام گرفت که مخفف IMRK در زبان بوسنیایی برای آن در نظر گرفته شد.

امکانات آزمایش ایستگاه [۷۹]:

- یک فونداسیون گسترده که امکان نصب برج با بعد پایه متفاوت را فراهم می‌آورد.
- برج عرضی
- برج طولی
- جرثقیل
- وسایل کشش
- سلول بار بی سیم جهت سنجش و داینامومتر مکانیکی.

ابعاد و ظرفیت امکانات آزمایش [۷۹]:

ابعاد و ظرفیت تسهیلات آزمایش در جدول ۲-۱۰ آمده است [۷۹].

جدول ۲-۱۰: ابعاد و ظرفیت تسهیلات آزمایش [۷۹].

ویژگی	ظرفیت
بعد فونداسیون گسترده (متر در متر)	۱۷×۴۰
ارتفاع برج عرضی (متر)	۵۰
ارتفاع برج طولی (متر)	۵۰
ارتفاع جرثقیل (متر)	۵۷
طول تیر (متر)	۴۰
باربری تیر	در انتها تیر ۱۰ کیلونیوتن و در وسط تیر ۲۰ کیلونیوتن

ویژگی‌های فنی بیان شده موارد زیر را ممکن می‌کنند [۷۹]:

¹ Sarajevo

² Institute for experimental research of metal lattice structures

- تحقق بارگذاری افقی به شکل نیرو متمرکز در محدوده ارتفاعی ۰ تا ۵۰ متر بالای فونداسیون گسترده (بستر آزمون).
- قابلیت اعمال همزمان ۵۰ نیرو متمرکز روی برج (۲۰ نیرو در راستا عرضی، ۱۶ نیرو در راستا طولی و ۱۴ نیرو در راستا قائم).
- به‌طور خاص، ایستگاه آزمایش *IMRK* قادر به انجام موارد زیر است [۷۹]:
- آزمایش برج‌های با بیشینه پایه ۱۶ متر در ۱۶ متر و بیشینه ارتفاع ۵۰ تا ۵۵ متر (در این ایستگاه، برج تا ارتفاع ۵۷ متر نیز آزمایش شده است).
- امکان اعمال نیرو کششی متمرکز تا ۱۲۰ کیلونیوتن در یک راستا به وسیله سیستم *tirfor* و قرقره و سنجش نیرو با استفاده از سلول بار و داینامومتر مکانیکی.
- دیده‌بانی نیرو اعمال‌شده روی سلول بار توسط رایانه مرکزی با نرم‌افزار اختصاصی که تمام بارهای مربوطه را نشان می‌دهد.
- آزمایش مکانیکی به وسیله بارگذاری استاتیکی برج‌های خط انتقال تا سطح ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت و لنگر واژونی بیشینه ۵۰۰۰۰ کیلونیوتن در متر.

۹-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو اسکوم^۱

ایستگاه آزمایش برج انتقال اسکوم، در سال ۱۹۸۰ راه‌اندازی شد و تنها تسهیلات در نوع خود در آفریقا است که توانایی آزمایش برج‌های انتقال را طبق استاندارد *IEC 60652* دارد [۸۱]. ایستگاه آزمایش اسکوم به علت دارا بودن سیستم حلقه بسته با ظرفیت کنترل تا ۳۰ نقطه الصاق بار به طور همزمان، در دنیا مطرح است [۸۱]. ایستگاه آزمایش برج اسکوم برای آزمایش برج انتقال کشورهایی مثل ایالات متحده امریکا (USA^2)، برزیل، تایلند^۳، نیجریه^۴ و نامیبیا^۵ مقرون به صرفه است [۸۱]. در این ایستگاه، از زمان تاسیس بالای ۲۰۰ مورد آزمایش انجام شده است و امکانات ایستگاه آزمون اسکوم را برای آزمایش برج‌های ۷۶۵ کیلوولت تا ارتفاع ۶۰ متر تقویت شده است، [۸۱].

۱۰-۱-۲ ایستگاه آزمایش برج‌های انتقال نیرو اراک

آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک، بزرگترین و مجهزترین آزمایشگاه آزمون برج‌های انتقال نیرو در خاورمیانه می‌باشد که انجام آزمون نوعی بر روی انواع سازه‌های انتقال نیرو را بر طبق الزامات استاندارد *IEC 60652-2002* به انجام می‌رساند. آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو، واقع در نزدیکی شهر اراک، به عنوان

¹ Eskom

² United States of America, (USA)

³ Thailand

⁴ Nigeria

⁵ Namibia

یکی از آزمایشگاه‌های مرجع وزارت نیرو و تنها آزمایشگاه آزمون نوعی برج‌های انتقال و پایه‌های توزیع نیرو مورد تأیید در ایران می‌باشد. پژوهشگاه نیرو در سال ۱۳۸۳ آغاز به بهره‌برداری از آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو نمود، و تاکنون این آزمایشگاه موفق به انجام حدود ۱۵۵ آزمون نوعی بر روی انواع دکل‌های انتقال نیرو از جمله برج‌های مشبک، تلسکوپی و بتنی و نیز حدود ۴۰ تست بر روی انواع پایه‌های روشنایی و بتنی گردیده است، شکل ۱ نمای کلی از این آزمایشگاه را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱۸. نمای آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع (اراک)

زمینه‌های کاری

آزمایشگاه سازه‌های انتقال نیرو دارای سه آزمایشگاه مجزا در زمینه‌های تست دکل‌های انتقال نیرو، تست پایه‌های روشنایی و بتنی و آزمایشگاه مقاومت مصالح می‌باشد.

امکانات و ظرفیت‌ها موجود:

- تست پد شماره ۱: بستری مربع شکل با اضلاع ۲۰ متر می‌باشد که توسط رابط‌های خاصی، قدرت تحمل نیروهای عکس‌العمل پایه‌های دکل را تا ۶۷۵ تن به ازای هر پایه، دارا می‌باشد. شکل ۲-۱۹

- تست پد شماره ۲: بستری مستطیل شکل با ابعاد 10×20 متر که عموماً برای تست دکل‌های مشبک با فاصله پشت به پشت کمتر از ۱۰ متر و نیروهای عکس‌العمل روی هر پایه حداکثر ۳۷۵ تن و یا دکل‌های تلسکوپی با گشتاور حداکثر ۱۰۰۰ تن متر استفاده می‌شود. شکل ۱۹-۲
- تست پد شماره ۳: با ابعاد 10×22 متر صرفاً جهت تست دکل‌های تلسکوپی با گشتاور حداکثر ۶۰۰۰ تن متر می‌باشد. شکل ۱۹-۲



شکل ۱۹-۲ بستر آزمون شماره ۱، ۲ و ۳

- حد نهایی تعداد بارهای هم‌زمان وارده به دکل: ۳۰ خط اعمال نیرو بصورت اتوماتیک، که توسط ۳۰ وینچ الکتریکی اعمال می‌گردد. شکل ۲-۲۰ و شکل ۲-۲۱.



شکل ۲-۲۰ وینچ‌های اعمال نیرو



شکل ۲-۲۱ نمای روبروی اتاق وینچ‌های اعمال نیرو

- حد نهایی نیروهای قابل اعمال: ۴۰ تن به ازای هر خط اعمال نیرو
- حد نهایی ارتفاع برای اعمال نیرو: ۷۲ متر

- آزمایشگاه تست پایه‌های روشنایی و بتنی قابلیت تست انواع پایه‌های خطوط توزیع از قبیل بتنی و پیش‌تنیده و پایه‌های روشنایی تا ارتفاع ۲۰ متر را بصورت افقی دارد.
- آزمایشگاه مقاومت مصالح نیز قابلیت تست مقاومت فشاری بتن و نیز سایر تست‌های مورد نیاز بر روی مصالح از قبیل دانه‌بندی و سایش مصالح را دارد.

۱۱-۱-۲ سایر ایستگاه‌های آزمایش برج‌های انتقال نیرو

ایستگاه آزمایش برج انتقال نیرو در اندونزی (بانتن)، که توسط شرکت بوکاکا تکنیک اوتاما^۱ اداره می‌گردد. ایستگاه آزمایش برج در آلمان (واقع در شهر مانهایم^۲) که از اموال گروه ABB می‌باشد، وضعیت فعلی امکانات آن تخریب شده است.

ایستگاه برج انتقال نیرو در ایتالیا که این ایستگاه آزمون نیز متعلق به گروه های ABB می‌باشد و در شهر لکو^۳ در حدود ۵۰ کیلومتری شمال میلان قرار دارد. امکانات آزمون شامل دو بستر آزمون با ابعاد ۲۰ در ۲۰ و همچنین ابعاد ۱۰ در ۱۰ می‌باشد.

۲-۲ برخی از آزمون‌های متداول در حوزه انتقال و توزیع نیرو

۱-۲-۲ آزمون خزش در بازوی مرکب برج‌های خط انتقال

با توجه به عمر کم بازوهای چوبی برج‌های انتقال، استفاده از بازوی مرکب ساخته شده از پلیمر مسلح شده با فیبر شیشه‌ای (GFRP^۴) به عنوان یک جایگزین بازوی چوبی برج‌ها انتقال مورد توجه واقع شده است [۸۲] [۸۳] [۸۴].

شکست مکانیکی بازوهای مرکب به علت کماتش، خزش، شوک‌های حرارتی و انواع مختلف خستگی اتفاق می‌افتد. ساختار بازوی برج به شکلی است که اغلب تحت بار بهره‌برداری دچار خزش می‌شود. خزش زمانی اتفاق می‌افتد که ابعاد یک ماده جامد در فرآیند آهسته تحت فشار ثابت تغییر کند [۸۵]. در واقع تنش‌های طولانی مدت کمتر از مقاومت تسلیم مواد سبب تغییر شکل مواد با بارگذاری استاتیکی طی زمان می‌شوند [۸۶]. به علاوه، اعمال بار استاتیکی بیشتر و مدت زمان طولانی‌تر باعث می‌شود مواد تغییر شکل بیشتری داشته باشند و متعاقباً منجر به خرابی سازه شوند [۸۷].

¹ Bukaka Teknik Utama

² Mannheim

³ Lecco

⁴ glass fibre reinforced polymer, (GFRP)

کارهای تجربی روی خزش با استفاده از نمونه‌هایی از مواد بازوهای مرکب برای درک بیشتر پاسخ مواد و تخمین عمر سرویس آن‌ها انجام شد [۸۸] [۸۹] [۹۰] [۹۱] [۹۲]. به هر حال، رفتار بازوی مرکب با مقیاس کامل تحت بار ثابت در دوره طولانی مورد توجه قرار نگرفته است. علاوه بر این، بازوی مرکب در مقایسه با چوب و فولاد برای بازار جدید است و عمر بهره‌برداری آن در برج‌های انتقال هنوز کاملاً مشخص نیست [۹۳] [۹۴]. بنابراین باید تجهیزات آزمایشگاهی برای تامین آزمون تنش خزشی تک محوری و طولانی مدت روی مقیاس واقعی بازوی مرکب تهیه شود [۸۴].

در این قسمت، با توجه به اهمیت تشخیص خزش در بازوهای انتقال خلاصه‌ای از تئوری خزش و روش آزمایش موجود برای آن آورده خواهد شد.

خزش:

خزش تمایل مواد به تغییر شکل ماندگار تحت اثر تنش‌های مکانیکی ناشی از قرار گرفتن در معرض مقادیر بالای تنش در دراز مدت است که به صورت تغییر در اندازه و شکل مواد ظاهر می‌شود [۹۵]. در کل مطالعه خزش شامل پیش‌بینی عمر بهره‌برداری سازه‌ای که باید همواره یک بار ثابت مشخص را تحمل کند، می‌شود [۹۶] [۹۷] [۹۸]. مطالعات خزش به دو دسته مرسوم (وابسته به زمان) و روش شتاب گرفته (وابسته به دما) تقسیم می‌شود [۹۹].

یک ماده می‌تواند در هر دو شرایط خطی و غیرخطی کاملاً الاستیک باشد. کرنش ϵ وابسته به زمان است و مستقیماً به تنش اعمال شده σ وابسته است [۱۰۰]. کرنش یک ماده کاملاً الاستیک مانند پلیمر متناسب با تنش اعمال شده است و همچنین حین تغییر شکل انرژی ذخیره می‌کند و زمانی که تنش رفع شود از آن برای بازگشت به شکل اصلی خود استفاده می‌کند و از سوی دیگر به شرطی که این مواد تحت دمای بالا مانند مایع عمل کنند [۱۰۱] [۱۰۲] ویسکوالاستیک نامیده می‌شوند [۱۰۳] [۱۰۴] [۱۰۵] [۱۰۶] که در این صورت تغییر شکل شان تابعی از زمان خواهد بود [۱۰۷].

در کل تغییر شکل مواد پلیمری هزاران سال طول می‌کشد و مطالعه خزش با استفاده از روش وابسته به زمان (مرسوم) عملی نیست [۱۰۸] [۱۰۹]. بنابراین، باید یک روش مناسب با استفاده از گرما دادن در دوره زمانی کوتاه‌تر اتخاذ شود. نتیجه این روش می‌تواند برای به دست آوردن خصوصیات خزش در دمای اتاق در مدت طولانی‌تر برون‌یابی شود. این کار تجربی، روش شتاب گرفته یا مدل برهم نهی زمان – دما نامیده می‌شود [110].

استفاده از اصل برهم نهی زمان – دما ($TTSP^1$) با تولید منحنی خزش پیش‌بینی عملکرد مواد را فراتر از زمان آزمایش ممکن می‌کند. تعیین منحنی خزش در مدل $TTSP$ شامل ترسیم کرنش خزشی در طول زمان می‌شود تا طول عمر سازه پیش‌بینی شود [۱۱۱]. به این دلیل که بعضی از مواد می‌توانند مدت طولانی‌تری در حالت

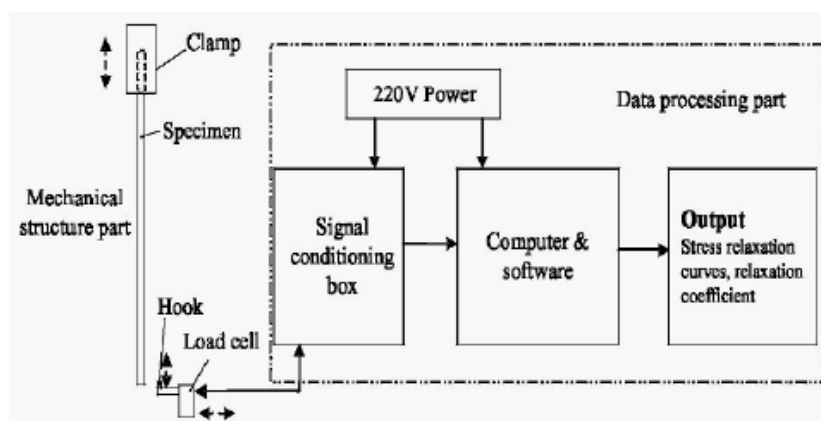
¹time-temperature superposition principle, (TTSP)

بهره‌برداری بمانند و ناگهانی از بین روند. تحلیل خرابی می‌تواند از رفتار آن در یک مدت کوتاه‌تر و دمای بالاتر برون‌یابی شود [۹۹] [۱۱۲] [۱۱۳] [۱۱۴].

نظریه آسودگی از تنش:

معمولاً خزش باعث رهایی از تنش ناشی از بار ثابت می‌شود. نیروی فشاری یا کششی وارد بر یک ماده ویسکوالاستیک باعث می‌شود که کرنش مطابق پاسخ ویسکوالاستیک گسترش یابد [۱۱۵] [۱۱۶]. در همین زمان، در کرنش ثابت تنش اعمال شده به آرامی کاهش می‌یابد. این شرایط را بیشتر مواد ویسکوالاستیک تجربه می‌کنند [۱۱۷].

تحقیق انجام شده توسط هانت و همکاران^۱ شیوه آسودگی از تنش را برای تحلیل رفتار خزش تیر پیاده‌سازی کرد. آن‌ها بار خمشی بر نمونه تیر قائم اعمال کردند و تغییر شکل آن را ثبت کردند. تغییرات جابه‌جایی انتهای تیر به وسیله گیج^۲ لیزری که مستقیماً به کامپیوتر وصل بود ثبت شدند. نتایج نشان دادند که اگرچه مواد مختلف رفتار یکسانی در آسودگی از تنش ندارند، آزمایش تیر طره به خوبی می‌تواند ویژگی‌های مواد مرکب را حین آسودگی از تنش توصیف کند. شکل ۲-۲۲ اجزای آزمایش تیر طره قائم را نشان می‌دهد [۸۷].



شکل ۲-۲۲ آزمایش تیر طره [۸۷].

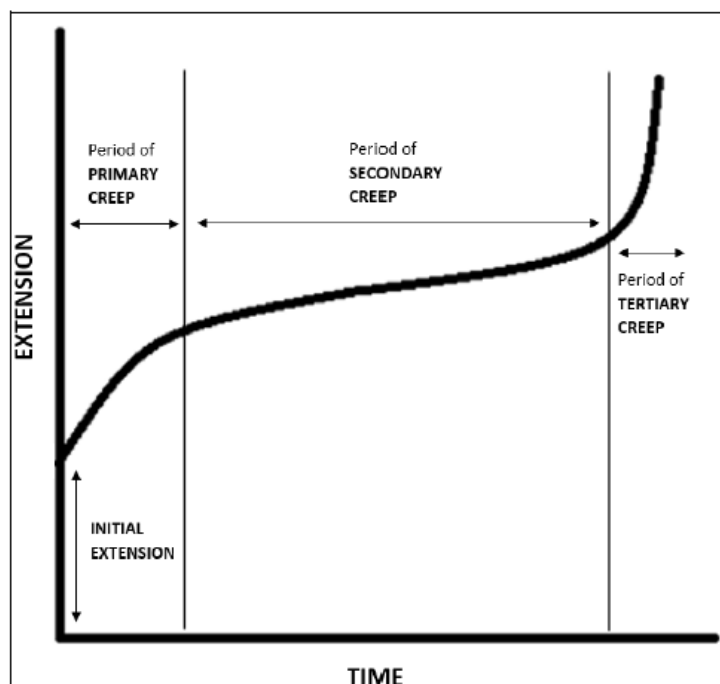
آزمایش خزش:

آزمایش خزش یک روش تجربی است که با کنترل سرعت برای مشاهده و تحلیل تغییر شکل اندازه‌گیری شده در طول زمان انجام می‌شود. این شیوه آزمایش برای تشخیص ویژگی‌های خزش یک نمونه در معرض بار فشاری یا کششی در دمای ثابت و در دوره طولانی زمان استفاده می‌شود. در طول آزمایش، نرخ تغییر شکل مواد نمونه در دمای ثابت و تنش اعمال شده، نرخ خزش نامیده می‌شود و می‌توان نموداری از خزش - زمان برای تحلیل بیشتر به دست آورد [۸۴]. مطالعه‌ی خزش در دمای بالا در یک محفظه انجام می‌شود تا بتوان دمای آن را کنترل کرد. فرآیند تنظیم دما برای حداقل کردن اثر انبساط حرارتی روی نمونه مورد آزمایش حائز اهمیت است [۱۱۸] [۱۱۹].

¹Hunt et al.

² gage

در کل خزش به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود (شکل ۲-۲۳). سرانجام، خزش سوم زمانی رخ می‌دهد که نرخ خزش تا شکستن یا گسیختگی مواد شتاب گیرد [۱۱۹].



شکل ۲-۲۳ نمودار خزش [۸۴].

یک نمودار شکل ۲-۲۳ مشخص می‌کند که مواد تحت تنش به آرامی تغییر شکل می‌دهند و از آنجا که رفتار خزش مواد در طول زمان مشخص نبوده و دارای مراحل جدا شده‌ای نیست نقطه‌ای شکست یک ماده به ندرت قابل پیش‌بینی است [۸۴].

روش مرسوم آزمایش خزش:

رفتار خزش یک ماده با استفاده از روش مرسوم می‌تواند مطالعه شود. این روش به حداقل زمان آزمایش، در حدود ۱۰۰۰۰ ساعت، برای تولید اطلاعات مطلوب نیاز دارد. برای داشتن یک تحلیل کامل از روش این آزمایش، داده‌های به دست آمده باید به طور خطی برای پیش‌بینی رفتار طولانی مدت برون‌یابی شوند [۱۲۰]. این آزمایش قابل اعتمادترین روش برای ارزیابی شرایط خزش در دوره آزمایش است اگرچه نمی‌تواند شرایط خزش را در طولانی مدت (بیشتر از زمان آزمایش) پیش‌بینی کند [۸۴].

روش شتاب گرفته:

استفاده از TTSP با تولید منحنی خزش پیش‌بینی عملکرد مواد را فراتر از زمان آزمایش ممکن می‌کند [84].

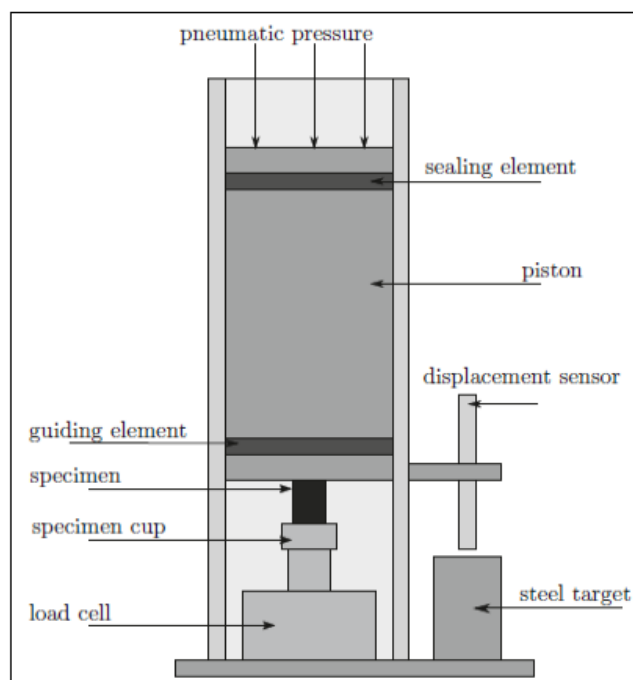
دستگاه آزمایش خزش:

یک وسیله که تغییرات مواد را بعد از تحمل فشارهای مختلف اندازه‌گیری می‌کند، دستگاه آزمایش خزش نامید می‌شود. این دستگاه در تشخیص کرنش یک شی تحت فشار اهمیت دارد و با تحلیل وضعیت خزش در تهیه منحنی

خزش وابسته به زمان کمک می‌کند. عملکرد اصلی دستگاه خزش تعیین پایداری مواد و رفتار آن در برابر تنش است [۸۴].

معمولاً از دستگاه آزمایش خزش بار ثابت استفاده می‌شود که شامل سکوی بارگذاری، پی، وسایل ثابت و بوته آزمایش می‌باشد. وسایل ثابت میله‌های کشش و فشارند [۱۲۱]. در سکوی بار، جسم با نرخ ثابت فشار تحمل می‌کند. گیره‌ها برای نگه داشتن مواد آزمایش در موقعیت معین استفاده می‌شوند. وسایل کرنش‌سنج برای اندازه‌گیری کرنش استفاده می‌شوند و حرکت شی را در دستگاه ثبت می‌کنند. تیر بار^۱ حرکت را از گیره به کرنش‌سنج دیجیتالی انتقال می‌دهد. محفظه گرمایش شی را احاطه کرده و دما را حفظ می‌کند [۸۴].

دستگاه آزمایش خزش فشاری روی پلیمر در دمای بالا بر پایه تغییر دما از ۲۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شد [۱۲۲]. روشی مناسب برای اعمال نیرو نیاز است که بارگذاری و برداری روی نمونه را به طور کنترل شده و منعطف در دمای بالا ممکن کند. در یک تسهیلات آزمایش خزش کششی یک پیستون آلومینیومی داخل یک استوانه به آسانی حرکت می‌کند. پیستون سرعت کشیدن نمونه را تنظیم می‌کند. برای یک نوع نمونه انتخاب شده با قطر ۱۰ میلی‌متر، ۱۹۶۰ نیوتن برای رسیدن به تنش ۲۵ مگاپاسکال نیاز است. در شکل ۲-۲۴ *Error!* **Reference source not found.** تنظیمات آزمایش خزش کششی نشان داده شده است [۸۴].

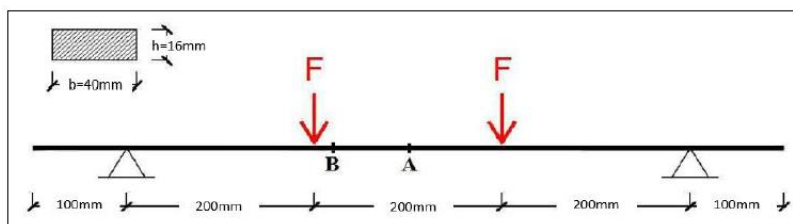


شکل ۲-۲۴ تسهیلات آزمایش خزش کششی [۸۴].

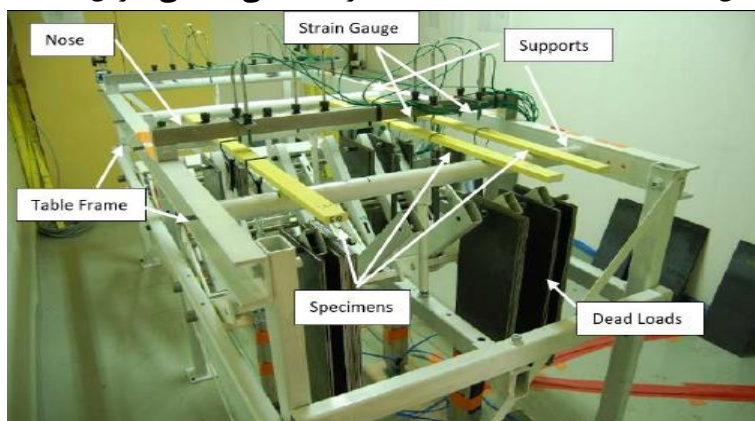
طبق تحقیقی دیگر، مطالعه‌ای برای ارزیابی *TTSP* انجام شد تا رفتار خزش *GFRP* را بررسی کند [۱۲۳]. نتایج نشان می‌دهند که *TTSP* به پیش‌بینی رفتار خزش *GFRP* کمک می‌کند. این آزمایش‌ها مطابق شکل ۲-۲۵ و شکل ۲-۲۶ انجام شدند. تنظیمات تجربی طبق استاندارد اروپا *EN ISO 14125:1988* طراحی شدند [۱۲۳]. قاب تجهیزات از مقطع *U* شکل فولادی استاندارد و تکیه‌گاه نمونه از لوله با قطر ۴۸ میلی‌متر ساخته شد. همزمان

¹ load beam

۱۲ آزمایش در تجهیزات قابل انجام هستند. دهانه نمونه‌ها می‌تواند ۶۰۰ یا ۸۰۰ میلی‌متر باشد و نیرو به وسیله یک اهرم اعمال می‌شود که امکان ۷ برابر شدن وزن اعمال شده را فراهم می‌کند [۸۴].

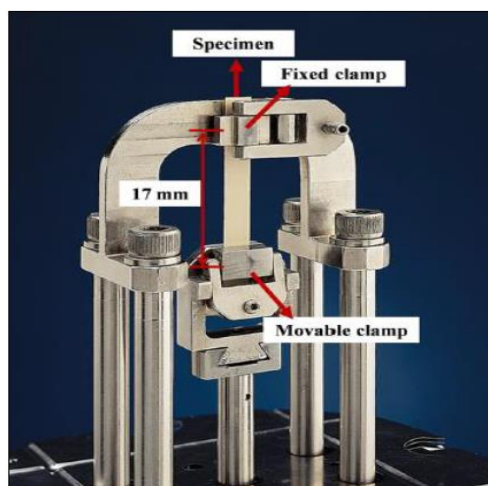


شکل ۲-۲۵ نماینده شماتیک دستگاه آزمایشگاهی خمشی خزش [۱۲۴].



شکل ۲-۲۶ دستگاه آزمایش خزش متداول [۱۲۴].

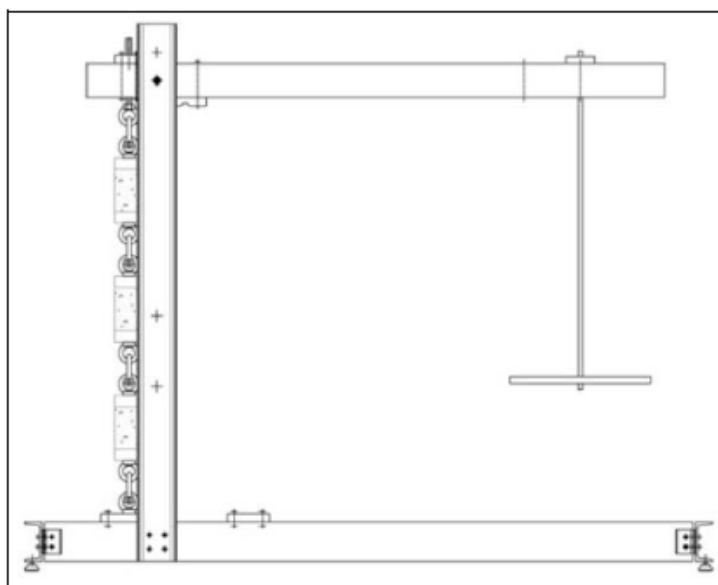
در مطالعه‌ای روش تحلیل خزش روی یک تحلیل کننده مکانیکی دینامیکی ($DMA^1 2980$) به وسیله یک محفظه نمونه در هوای خشک مطابق شکل ۲-۲۷ انجام شد. دمای نمونه‌ها با طول گام ۱۰ درجه سانتی‌گراد از ۳۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تغییر داده شد و هر دما برای ۲۰ دقیقه ثابت نگه داشته شد و ۲۰ دقیقه دوره بازیابی یا تعادل بین گام‌ها در نظر گرفته شد [۸۴].



¹ Dynamic mechanical analyser 2980, (DMA 2980): The DMA 2980 uses a non-contact, direct drive motor to provide the oscillatory force which deforms the sample material. The motor is built from high performance composites and other materials which ensure low system compliance and allow the motor to deliver reproducible forces over a wide dynamic range 0.0001 to 18N.

شکل ۲-۲۷ تسهیلات آزمایش کششی خزش [۸۴].

برای انجام آزمایش مکانیکی تک محوری خزش، یک ساختار فلزی در انتهای نمونه نصب می‌گردد تا آن را محکم نگه دارد و یک بار مرده به انتهای دیگر اعمال می‌گردد. یک مبدل دیفرانسیل متغیر خطی ($LVD\bar{T}^1$) برای سنجش انحنای در انتها آزاد نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد. $LVD\bar{T}$ و ترموکوبل‌های خشک و مرطوب به یک سیستم اکتساب داده متصل می‌گردند که امکان ثبت قرائت‌ها را در هر دقیقه و دیده‌بانی اطلاعات را در زمان واقعی فراهم شود. معمولاً، $LVD\bar{T}$ در فاصله ۷۰ میلی‌متری از فک فلزی نگه‌دارنده‌ی انتهای دیگر نمونه، به عنوان فاصله موثر، قرار می‌گیرد. به علاوه، نقطه اعمال بار در ۵ میلی‌متری از $LVD\bar{T}$ ثابت می‌گردد. این تنظیمات آزمایشگاهی برای آزمایش کشش تک‌محوری در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده است [۸۴].



شکل ۲-۲۸ تنظیمات آزمایشگاهی برای آزمایش کشش تک‌محوری [۸۴].

آزمایش کشش خزش تک محوری مناسب‌ترین روش برای تخمین عمر بهره‌برداری تحت خزش است [۸۴].

معمولاً آزمایش خزش فلزات دوره‌ای طولانی از زمان طول می‌کشد و این آزمایش کوتاه‌تر از عمر بهره‌برداری سازه واقعی است. بنابراین، محاسبات و تحلیل برای به دست آوردن رفتار و اطلاعات خزش حیاتی است. آزمایش‌ها اطلاعات کافی و علمی برای تفسیر تغییر شکل نمونه را فراهم می‌کنند [۱۲۵] [۱۲۶] [۱۲۷] [۱۲۸]. در طول آزمایش یک انتها ثابت است و انتهای دیگر در معرض نیروی کششی ثابت در دمای ثابت قرار می‌گیرد. نرخ کرنش با توجه به زمان تعیین می‌شود [۱۲۸] [۱۲۹] [۱۳۰] [۱۳۱] [۱۳۲] [۱۳۳].

آزمایش خزش باید طبق استاندارد *ASTM* انجام شود. الزامات در اجرای آزمایش کششی خزش مطابق زیر است [۸۴]:

¹ linear variable differential transformer, ($LVD\bar{T}$)

- *ASTM E 21-66T* دمای آزمایش کشش مواد را در مدت زمان کوتاه افزایش می‌دهد و قابل اعمال بر فلزاتی است که در برابر خزش بسیار مقاوم هستند و در دماهای نسبتاً بالا استفاده می‌شوند.
- *ASTM E 151-64* آزمایش تنش مواد فلزی در دمای بالا با گرمایش سریع و نرخ کرنش معمولی یا سریع را توصیف می‌کند.

۲-۲-۲ آزمون مکانیکی اینزولاتورهای پست (مقره):

یکی از آزمون‌های مکانیکی که بر روی مقره‌ها انجام می‌گردد آزمون کشش مقره می‌باشد، این آزمون نیازمند قابی جهت قرارگیری و برپایی مقره می‌باشد تا با استفاده از جک هیدرولیک فرآیند آزمون انجام شود. یکی از استانداردهایی که جهت انجام آزمون اینزولاتورهای کامپوزیت استفاده می‌گردد *IEC 61952* است.

خصوصیات فنی موردنیاز برای انجام آزمون:

- حداکثر نیروی اعمالی 50 kN

- حداکثر عدم قطعیت در اندازه‌گیری ۰.۵۶۳

- ولتاژ مورد نیاز

✓ ۳۸۰ ولت، ۵۰ هرتز جهت راه اندازی پمپ هیدرولیک

✓ ۲۲۰ ولت، ۵۰ هرتز جهت سیستم اندازه‌گیری

سازه قاب:

- قاب برای تحمل نیروی 50 kN ، شکل ۲-۲۹

- سیستم هیدرولیک جهت اعمال نیرو، شکل ۲-۳۰

- سیستم اندازه‌گیری، شامل:

✓ سلول‌های بار، شکل ۲-۳۱

✓ واحد کنترل

✓ نرم افزارهای مربوط به اندازه‌گیری و کنترل

- فک‌های نگهداشتن نمونه، شکل ۲-۳۲

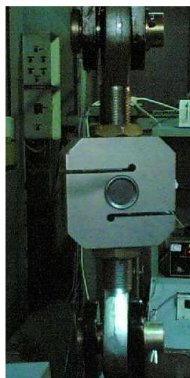
- جعبه تامین ولتاژ



شکل ۲- ۲۹ قاب آزمایش جهت اعمال نیرو



شکل ۲- ۳۰ سیستم هیدرولیک برای تولید نیرو



شکل ۲- ۳۱ سلول بار جهت اندازه‌گیری نیرو



شکل ۲-۳۲ فک های آزمایش

۳-۲-۲ تست مکانیکی بازوهای عایق ساخته شده از مواد غیر سرامیکی:

در دهه‌های اخیر بسیاری از مفاهیم طراحی خط انتقال قدرت بر خلاف افزایش تقاضا باعث افزایش محدودیت‌های محیطی می‌شوند. یکی از دغدغه‌ها مساحت زمین اختصاص داده شده به خط انتقال است که به ولتاژ و مشخصات فنی آن وابسته است. مشکلات در برابر تاسیس خطوط جدید انتقال قدرت عبارت‌اند از: قیمت بالا و دسترسی محدود زمین، محدودیت‌های قانونی خصوصاً در نواحی شهری که باعث تلاش برای کاهش مساحت زمین مورد نیاز برای این خطوط شده‌اند. حیدری و همکاران^۱ اثر قیمت زمین بر طراحی خط انتقال قدرت را در نواحی شهری بررسی کردند [۱۳۴]. یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای کاهش مساحت زمین اختصاص داده شده به خط انتقال استفاده از عایق‌های ساخته شده از مواد غیر سرامیکی مانند پلیمر است. این جایگزین حدود ۹۰ درصد وزن عایق را کاهش می‌دهد که کنترل آن را آسان، شکستگی و آسیب ساخت و قیمت آن را کمتر می‌کند. این عایق‌های پلیمری باعث عملکرد بهتر دی‌الکتریک همراه با مقاومت در برابر آسیب و بارهای شوک مکانیکی می‌شوند. روش دوم استفاده از برج‌های ساخته شده از بازوهای مرکب پلیمری را که مانند عایق عمل می‌کنند، پیشنهاد می‌دهد. علی‌پور و همکاران^۲ برای بیشتر متراکم کردن خط انتقال بازوهای پلیمری را معرفی کردند [۱۳۵].

مطالعات نشان می‌دهند بازوهای مرکب مناسب جایگزینی بازوهای فولادی هستند تا بتوان ولتاژ را بدون اصلاح هندسه برج افزایش داد. همچنین بازوهای با عایق مرکب پلیمری امکان کاهش فاصله افقی بین دو جریان را فراهم می‌کند و سبب متراکم شدن خط انتقال می‌شود. استفاده از بازوی مرکب به جای بازوی فولادی با عایق سرامیکی باعث کاهش چشمگیر مساحت زمین اختصاص داده شده به خط انتقال می‌شود [۱۳۶].

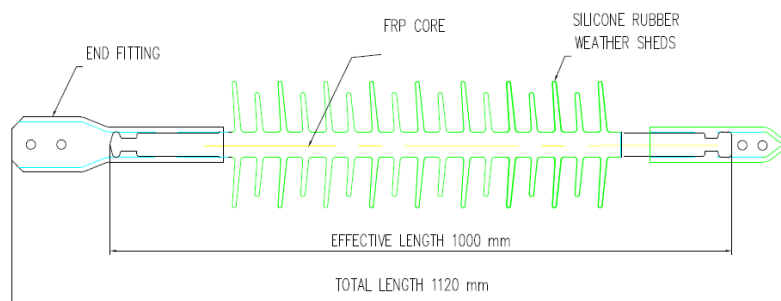
¹ Heidari and et al.

² Alipour and et al.

جهت آشنایی بیشتر با روند آزمایش مکانیکی بازوی مرکب در ادامه تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی روی عملکرد مکانیکی و شبیه‌سازی اجزا محدود بازوی مرکب یک برج ۶۶ کیلوولتی تشریح می‌شود.

آماده‌سازی اعضا بازو:

شکل ۲-۳۳ هندسه عضو عایق‌شده FRP را که در ساختمان بازوی یک خط انتقال استفاده شده است، نشان می‌دهد. این اعضا شامل یک هسته، اتصالات انتهایی فلزی و یک محفظه لاستیکی سیلیکونی می‌شوند. هسته یک میله مرکب است که بارهای مکانیکی را تحمل می‌کند. فیبر تقویت کننده مورد استفاده $glass-E$ (۷۵ درصد وزن) است. میله مرکب با فرآیند ریخته‌گری ساخته شده است طوری که تقویت کننده به رزین آغشته و کشیده می‌شود. اتصالات انتهایی که اعضا بازو را اعضا برج وصل می‌کنند از فولاد نرم ساخته و به انتها میله ضمیمه شده‌اند. محفظه لاستیکی سیلیکونی عایق الکتریکی است و از میله مرکب حفاظت می‌کند. از طریق فرآیند قالب‌ریزی پیوسته، محفظه لاستیکی سیلیکونی روی میله مرکب گذاشته می‌شود. برجستگی‌ها به عنوان عایق محفظه عمل می‌کنند. محفظه لاستیکی برای ایجاد چسبندگی و مرز شیمیایی کافی روی میله قرار داده شده است تا از آسیب آلودگی آب در سطح جلوگیری کند [۱۳۶].



شکل ۲-۳۳: هندسه عضو بازوی مرکب مورد بررسی [۱۳۶].

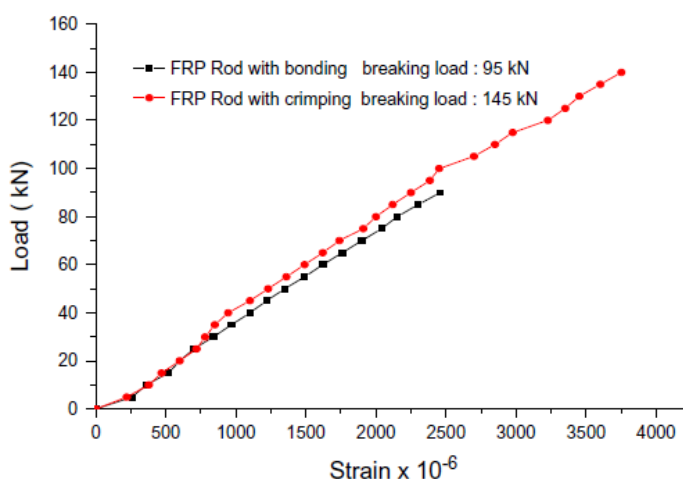
ویژگی‌های بازوی مرکب مورد بررسی که مطابق دستورالعمل $IS: 5613:1985$ و $IS: 802:1995 RA 2006$ ساخته شده است [۱۳۷] [۱۳۸] و روی نمونه‌های بریده شده از آن آزمایش تجربی شده است در جدول ۲-۱۱ آمده است. E_{11} و E_{22} ثابت‌های الاستیک استفاده شده در تحلیل اجزا محدود بازو مرکب، ν_{12} ضریب پواسون، G_{11} مدول برشی و σ_u مقاومت کششی نهایی هستند [۱۳۶].

جدول ۲-۱۱: ویژگی‌های مواد مقاطع FRP [۱۳۶].

شماره مقطع	E_{11} (N/mm ²)	E_{22} (N/mm ²)	12ν	G_{11} (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)
۱	۵۰۰۰	۲۰۰۰	۰/۳۲	۲۲۵۰۰	۷۰۰
۲	۶۰۰۰	۳۰۰۰	۰/۴۱	۳۲۰۰۰	۸۰۰
۳	۴۰۰۰	۱۵۰۰	۰/۲۶	۱۶۰۰۰	۶۵۵

تهیه اتصالات انتهایی اعضا بازو:

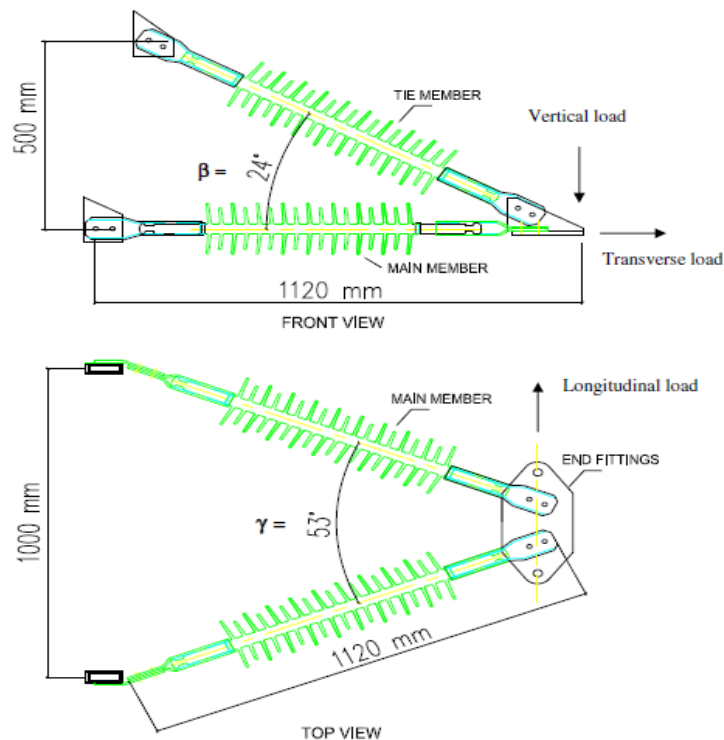
اعضای بازو داخل یک بازوی مقیاس کامل مونتاژ شده‌اند. اعضا با گیره‌های فلزی موجود در دو انتهای میله *FRP* ثابت شده‌اند تا به ثابت کردن بازو به بدنه برج کمک کنند. دو نوع اتصال مرز چسبیده با استفاده از چسب اپوکسی و دیگری فرآیند چفت شدن برای گیره‌های انتهایی در نظر گرفته شده است. مقاومت گیره‌های فلزی انتهایی تحت بارگذاری کششی با استفاده از دستگاه بارگذاری هیدرولیکی ۲۰۰ کیلو نیوتن تعیین شده است. از شکل ۲-۳۴ برداشت می‌شود که میله‌ها با انتهای چفت شده مقاومت بیشتری از میله با مرز چسبیده نشان می‌دهند [۱۳۶]. بنابراین، اعضای بازو با گیره‌های انتهایی فلزی در دو انتها چفت شدند [۱۳۸] [۱۳۹].



شکل ۲-۳۴: رفتار نیرو- کرنش میله *FRP* با گیره‌های فلزی [۱۳۶].

اعضای بازو مرکب:

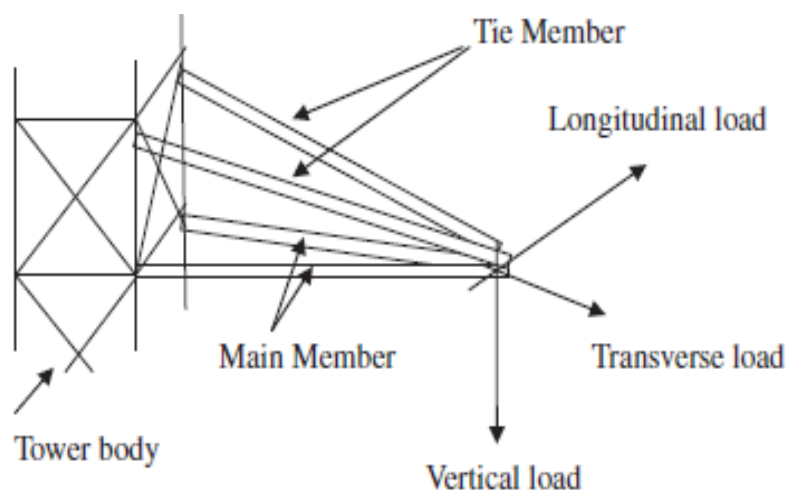
بازو مرکب در شکل ۲-۳۵ نشان داده شده است. بازو شامل دو عضو اصلی افقی با زاویه ۷ برابر ۵۳ درجه در صفحه افقی، می‌شود تا در برابر بارهای طولی و عرضی مقاومت کند. همچنین دارای دو عضو آویز با زاویه β برابر ۲۴ درجه در صفحه قائم است تا در برابر بار قائم مقاومت کند و توزیع تنش بین دو عضو اصلی افقی را کاهش دهد [۱۳۶].



شکل ۲-۳۵: بازوی مرکب برای خط ۶۶ کیلوولتی [۱۳۶].

تحلیل سازه‌ای بازوی مرکب:

تحلیل بازوی مرکب، ابتدا، با استفاده از روش تحلیلی و سپس با مدل اجزا محدود انجام می‌شود. نیروی خارجی روی بازو برج ۶۶ کیلوولت برای منطقه باد ۲ (۳۹ متر بر ثانیه) بنابر دستورالعمل *IS: 802:1995* در نظر گرفته شده است. برای تحلیل مواد ریخته شده، الاستیک خطی و شکننده در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل با استفاده از معادلات بنا شده بر مکانیک سازه‌ای انجام شده است. ضوابط طوری در نظر گرفته شده است که زمانی که هیچ یک از اعضای سازه‌ای به مقاومت نهایی تحت بار سرویس اسمی نرسیده‌اند ایمنی سازه حاصل شود. نمای بازوی مرکب متصل شده به بدنه برج در شکل ۲-۳۶ آورده شده است [۱۳۶].



شکل ۲-۳۶: نمای بازوی مرکب متصل شده به بدنه برج [۱۳۶].
نیروی محوری در اعضای بازو با استفاده از روش مقاطع به صورت زیر به دست آمده است:

$$F1 = \frac{T}{\cos(\frac{\gamma}{2})} + V \times \cot\beta \quad (1-2)$$

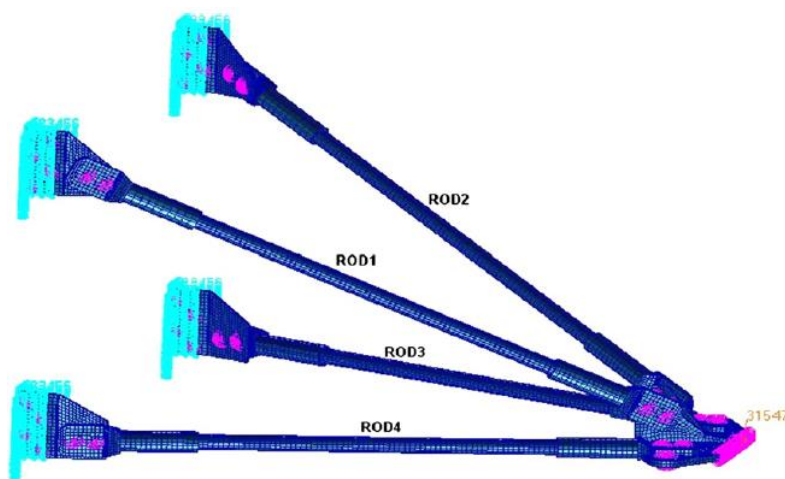
$$F2 = \frac{V}{\sin\beta} \quad (2-2)$$

$$F3 = \frac{L}{2 \times \sin(\frac{\gamma}{2})} \quad (3-2)$$

$F1$ نیرو در اعضای اصلی بازوی مرکب در اثر بارهای عرضی و قائم، T نیروهای عرضی در سطح، γ زاویه بین دو عضو اصلی بازو در صفحه افقی، V نیروی قائم در سطح و β زاویه بین عضو آویز و اصلی در صفحه قائم است. $F2$ و $F3$ به ترتیب نیروها در آویزهای بازو مرکب در اثر بار قائم و نیروها در اعضای اصلی بازوی مرکب در اثر بار طولی و L نیروی طولی در انتهای بازوی مرکب می‌باشد [۱۳۶].

تحلیل اجزا محدود بازوی مرکب:

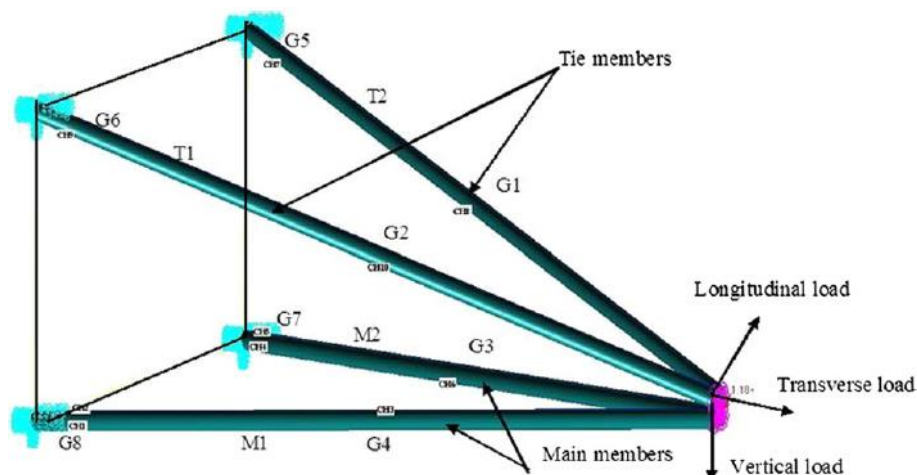
با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزا محدود *MSC-FEA2010.2.3* بازوی مرکب مدل می‌شود. مدل ایجاد شده برای تحلیل رفتار خم شدن و تخمین نیروهای اعضای بازو استفاده می‌شود. یک مدل اجزا محدود سه بعدی با اعضای سالیید سه بعدی *HEX 8* تهیه می‌شود تا نماینده مواد مرکب اعضای ریخته شده باشد [۳۵]. ویژگی‌های مواد برای مقاطع ریخته شده، به طور تقریبی، از آزمایش‌های نمونه کششی به دست آمده‌اند. شکل ۲-۳۷ مدل اجزا محدود کل بازو با شرایط مرزی و نیروها را نشان می‌دهد [۱۳۶].



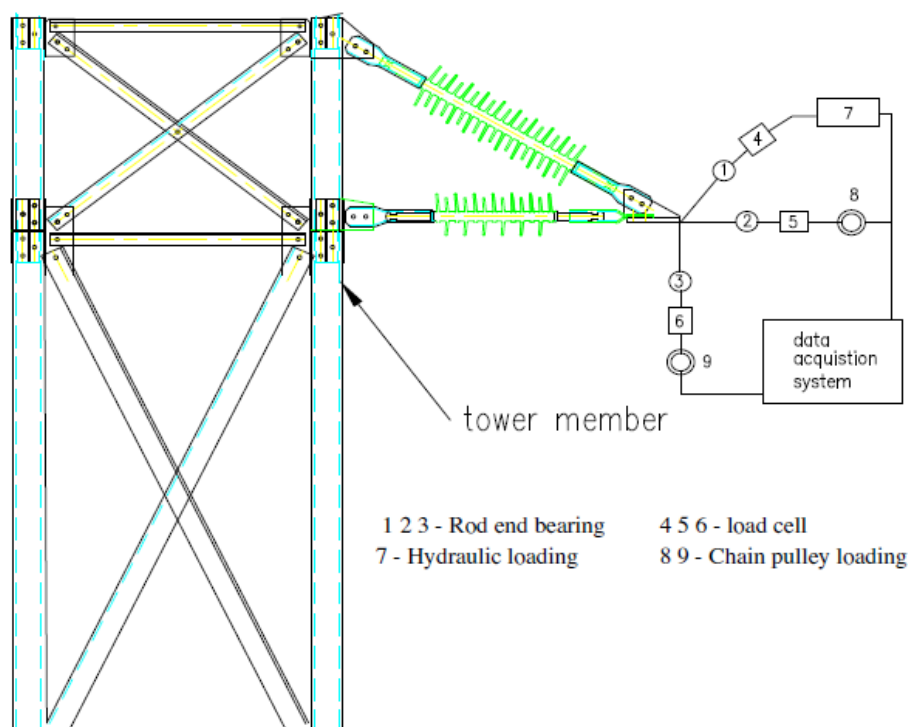
شکل ۲-۳۷: مدل اجزا محدود با شرایط مرزی و نیروها [۱۳۶].

آزمایش مکانیکی بازو:

برای مطالعه عملکرد مکانیکی، بازو به یک پایه که مانند برج عمل می‌کند، وصل شده است. نیروها مطابق *IS 802* در راستای عرضی، قائم و طولی اعمال شده‌اند. کرنش‌سنج‌ها روی اعضای بازو، مطابق شکل ۲-۳۸ نصب شده‌اند (چهار کرنش‌سنج در انتهای اعضای بازو در کنار بدنه برج و چهار کرنش‌سنج دیگر در وسط اعضا). نمای شماتیک آزمایش مکانیکی بازو در شکل ۲-۳۹ و عکس بازو تحت آزمایش مکانیکی در شکل ۲-۴۰ آورده شده است. نیروی مکانیکی در امتداد سه راستا از طریق پایه انتهایی میله که به راس بازو ضمیمه شده به آن اعمال می‌شود (شکل ۲-۳۹). سلول‌های کالیبره شده نیرو در سه راستا نیروی اعمال شده به اعضای بازو را می‌سنجند [۱۳۶].



شکل ۲-۳۸: نمای شماتیک کرنش‌سنج‌ها روی اعضای بازو حین آزمایش مکانیکی [۱۳۶].



شکل ۲-۳۹: نمای شماتیک آزمایش مکانیکی بازو [۱۳۶].



شکل ۲-۴۰ عکس بازو تحت آزمایش مکانیکی [۱۳۶].

برای آزمایش بار استاتیکی، بارهای عرضی و قائم ثابت نگه داشته و بار طولی به تدریج افزایش داده شد. در طول آزمایش، جابه‌جایی راس بازو و کرنش‌ها در اعضای بازو ثبت شده‌اند. کرنش‌های تجربی که متناظر با هر گام بارگذاری هستند به طور خودکار در سیستم اکتساب داده ثبت شده‌اند [۱۳۶].

نتایج تحلیل روش اجزا محدود با توجه به رفتارهای مدل نشده سبب بروز اختلافی در حدود ۹ تا ۱۱ درصد با نتایج آزمایشگاهی متناظر است، که این موضوع اهمیت انجام آزمون را بروی بازوی مرکب نشان می‌دهد [۱۳۶].

با استفاده از بازوی مرکب برای خط انتقال ۶۶ کیلوولتی، عرض زمین اختصاص داده شده به خط انتقال تنها ۱۵ متر در برابر ۱۹ متر که معمولاً توسط نیروگاه‌های برق هند در نظر گرفته می‌شود، است. بنابراین، نتایج استفاده از بازوی مرکب سبب متراکم شدن خطوط انتقال می‌گردد [۱۳۶].

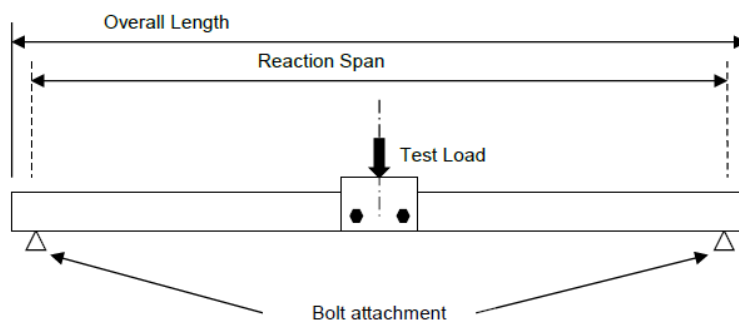
۴-۲-۲ آزمون‌های مکانیکی کراس آرم‌های توزیع:

کراس آرم‌های توزیع در نزدیک انتهای بالایی پایه‌های توزیع نصب می‌گردند، وظیفه نگهداری هادی‌های شبکه توزیع و انتقال وزن هادی‌ها و بارهای وارده به هادی‌های شبکه توزیع را به پایه‌ها دارند. کراس آرم‌های توزیع به شکل یک تیر و از مصالح مختلفی نظیر فلز، الوار چوبی، چوب‌های لایه لایه و انواع کامپوزیت می‌باشند. استانداردهای آزمون-های مکانیکی که جهت ارزیابی کفایت کراس آرم‌ها معمول است به شرح زیر می‌باشد:

- الزامات استاندارد ملی ایمنی الکتریکی^۱
- *CSA C116*، کراس آرم‌های پلیمری مسلح شده با الیاف (*FRP*)
- استاندارد داخلی تاسیسات (آمریکا)
- بارهای مکانیکی وارد بر کراس آرم‌های توزیع چوبی، *RUS Bulletin 1724E-151*
- دفترچه مشخصات تولید محصول
- *IEEE STD C135.80-2012* استاندارد *IEEE* برای اتصالات خطوط توزیع

یکی از مسائل مهمی که در آزمون کراس آرم وجود دارد این است که با تمام سخت افزار و سناریوهای بارگذاری شناخته میدانی مورد آزمون قرار گیرد. زمانی که کراس آرم در کنار سخت افزارهای مربوطه اسمبل می‌گردد به مانند یک سیستم عمل می‌کند و بین اجزای مختلف این سیستم اندرکنش و عکس العمل‌هایی رخ می‌دهد. هر یک از قسمت‌های اسمبل شده کراس آرم مانند تیر اصلی کراس آرم، واشرها، پیچ‌ها، و نگهدارنده‌ها ممکن است گسیخته شوند.

آزمون بالانس شده خمشی ۳ نقطه‌ای یکی از آزمون‌هایی است که بطور گسترده‌ای برای کراس آرم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. *ASTM D198-15*، روش آزمون استاندارد برای آزمون استاتیکی الوارها در ابعاد سازه‌ای می‌باشد و *ASTM D8019-15*، روش آزمون استاندارد برای تعیین مدول خمشی کامل مقطع و مقاومت خمشی کراس آرم‌های *FRP* می‌باشد. شکل ۲-۴۱ تا شکل ۲-۴۳ نحوه انجام آزمون سه نقطه‌ای را بر روی کراس آرم نمایش می‌دهد. سناریو بارگذاری غیرممتقارن بود را در شکل ۲-۴۴ نمایش داده شده است. انواع سناریوهای غیر بالانس، بارگذاری قائم، بارگذاری جانبی، شکست یراق و آزمون دیواره کامپوزیت کراس آرم در شکل ۲-۴۵ تا شکل ۲-۵۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۱ نمودار آزمون ۳ نقطه ای

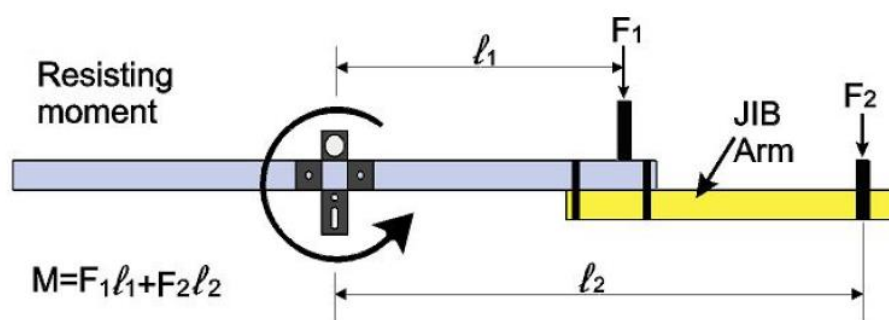
¹ National Electric Safety Code (NESC)



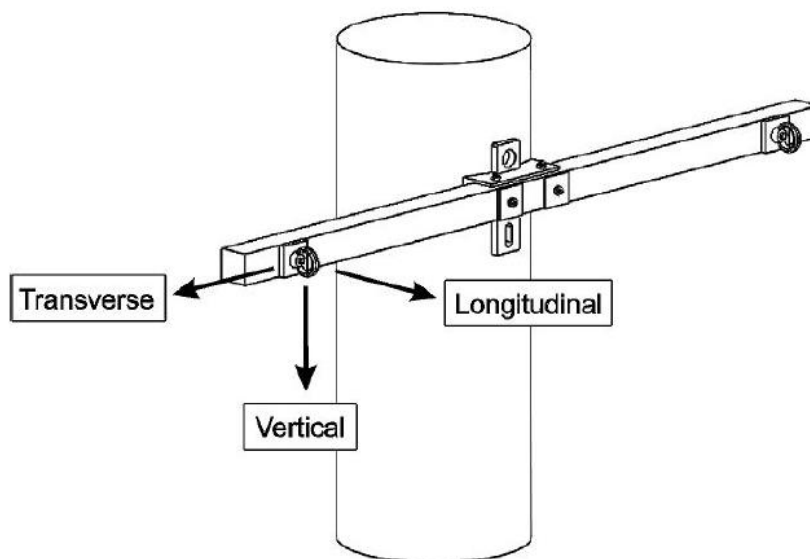
شکل ۲-۴۲ نمای برپایی آزمون سه نقطه‌ای، پیش از انجام آزمون



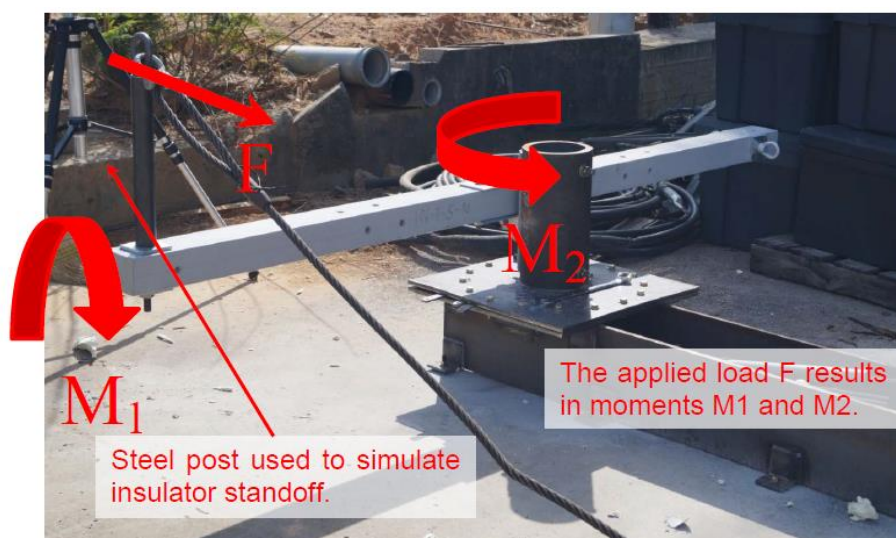
شکل ۲-۴۳ نمای آزمون سه نقطه‌ای، پس از انجام آزمون و گسیختگی طولی



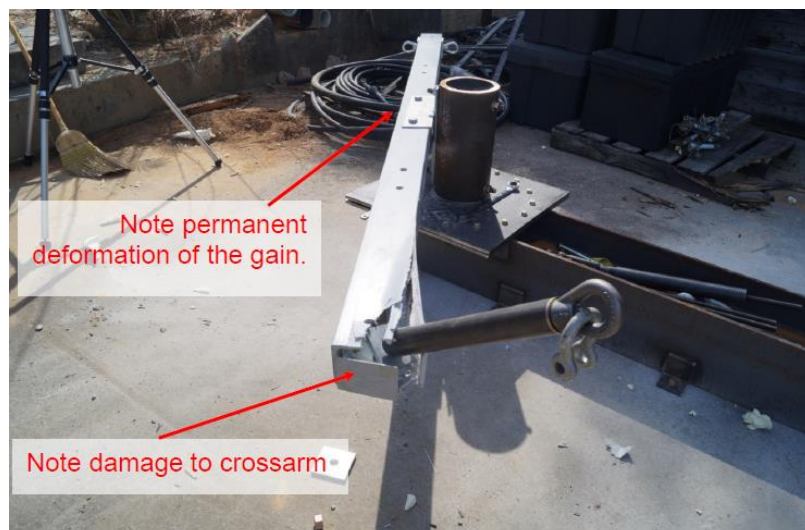
شکل ۲-۴۴ نمای آزمون سه نقطه‌ای غیرمتقارن



شکل ۲-۴۵ آزمون کراس آرم به همراه یراق آلات، تحت بار غیر بلانس



شکل ۲-۴۶ برپایی آزمون کراس آرم به همراه یراق آلات، تحت بار غیر بلانس



شکل 47-۲ انجام آزمون کراس آرم به همراه یراق آلات، تحت بار غیر بالانس و مود شکست مربوطه



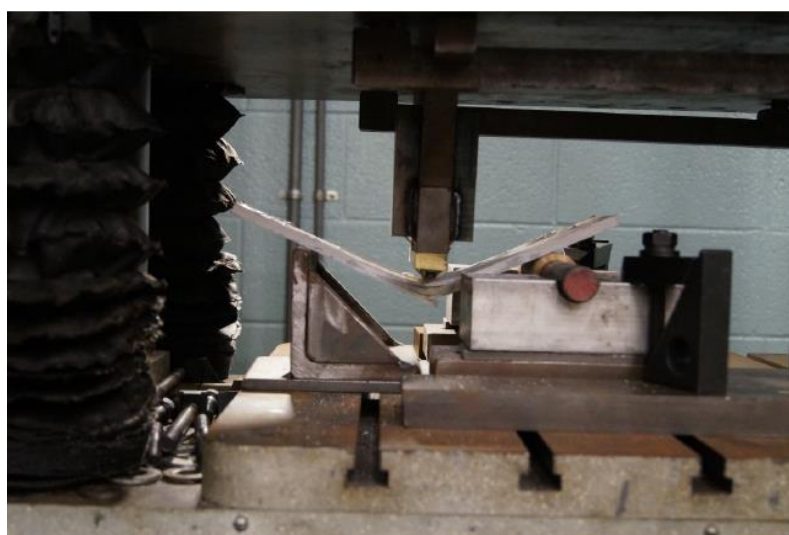
شکل 48-۲ آزمون کراس آرم تحت بار قائم



شکل 49-۲ آزمون کراس آرم تحت بار جانبی



شکل ۲-۵۰ شکست یراق در آزمون بار قائم و جانبی کراس آرم



شکل ۲-۵۱ آزمون خمش سه نقطه برای دیواره کراس آرم

۲-۲-۵ آزمون مکانیکی پایه‌های توزیع و روشنایی

پایه توزیع اصلی ترین سازه در بخش توزیع نیرو می‌باشند و به جهت اینکه همواره تحت اثر بارهای سرویس قرار دارند و بارهای ناگهانی نظیر ضربه و یا تصادف در آن‌ها به وفور مشاهده می‌گردد به همین سبب به جهت ارزیابی عملکرد آن‌ها بسیار مورد توجه واقع شده‌اند. پایه‌های توزیع و روشنایی در انواع بتنی، فولادی، چوبی و کامپوزیت تولید می‌گردند. آزمایش‌هایی که برای ارزیابی آن‌ها وجود دارد آزمایش مکانیکال، و مقاومت مصالح می‌باشد که در زیر مجموعه اصلی آزمایش‌های سازه واقع می‌گردد، از لحاظ تکنولوژی آزمایش‌های فوق آزمایش‌های متداولی می‌باشند که از دیرباز انجام می‌پذیرفتند، هرچند در آزمایشگاه‌های مختلف روش‌های متفاوتی جهت تأمین گیرگاه آن‌ها به عمل می‌آید که در ادامه به چند مورد از روش‌ها استاندارد مرسوم آن ارائه می‌گردد. البته در کنار آزمون‌های

مرسوم فوق در محیط آزمایشگاه، آزمایش‌های میدانی نیز جهت پایش سلامت پایه‌های توزیع صورت می‌پذیرد، که بطور معمول از فناوری‌هایی که در بخش‌های قبل در خصوص آن‌ها صحبت شده استفاده می‌گردد، بطور مثال در شکل ۲-۵۲ با استفاده از حسگرهای لرزه‌ای و آزمون ضربه سعی بر استخراج خصوصیات دینامیکی پایه توزیع تلسکوپی فلزی و چوبی نموده اند.

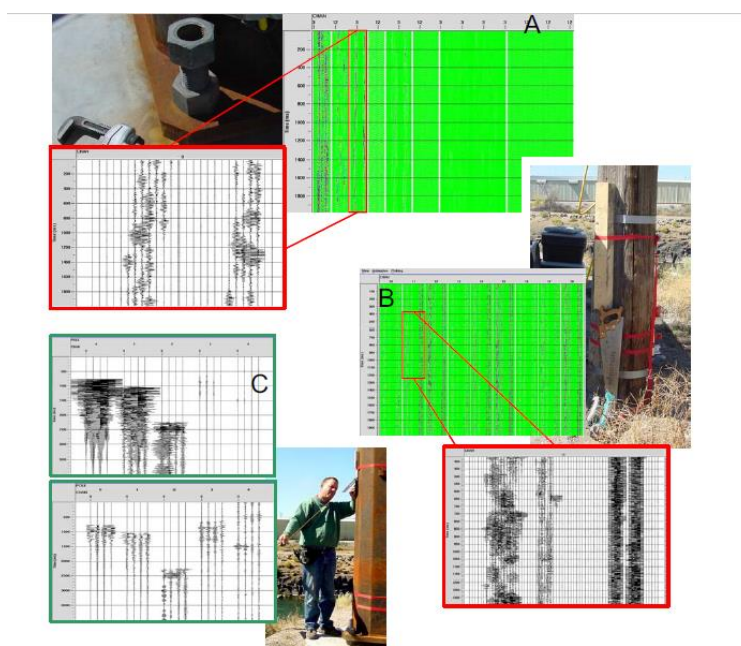
در شکل ۲-۵۳ برای تأمین گیرگاه مناسب پایه بتنی هشت وجهی از گیرگاه بتنی مودولار یا مقطعی کاملاً مشابه پایه استفاده شده است که توسط رادهای قائم در کف آزمایشگاه مهار شده است، [۱۴۰].

شکل ۲-۵۴ و شکل ۲-۵۵ استفاده از الوار در تکیه‌گاه بتنی جهت مهار پایه توزیع یکی از روش‌های مرسوم می‌باشد، که البته در صورت قرارگیری نامناسب می‌تواند همراه با خطا باشد، [۱۴۱].

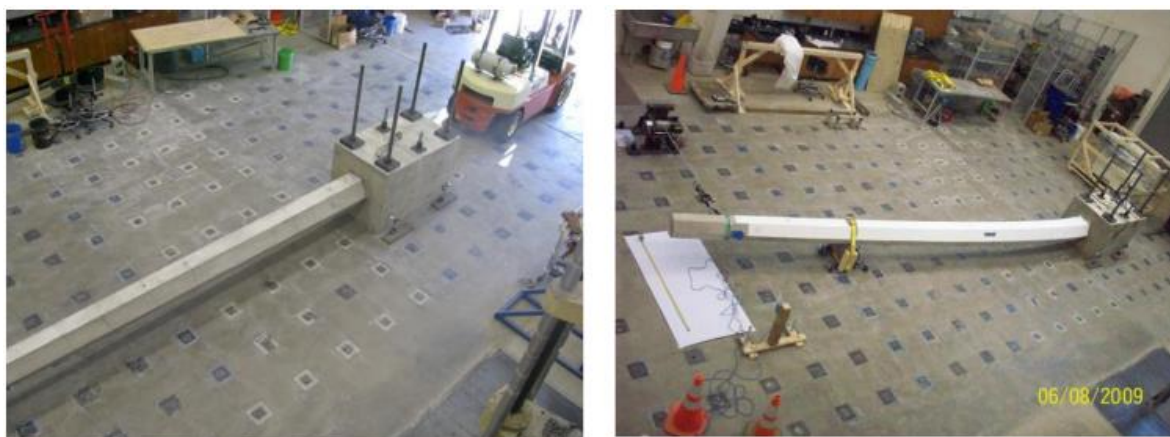
شکل ۲-۵۶ استفاده از الوار به همراه جک در تکیه‌گاه بتنی جهت مهار پایه توزیع می‌تواند یکی دیگر از روش‌های مرسوم می‌باشد، که البته در صورت قرارگیری نامناسب می‌تواند همراه با خطا باشد، [۱۴۱].

در شکل ۲-۵۷ به منظور مهار پایه کامپوزیتی از قاب فولادی و بندهای بافته شده در ابتدای پایه استفاده شد، و برای حذف اثر وزن پایه در پاسخ آزمون در رأس پایه از گاری استفاده شده است.

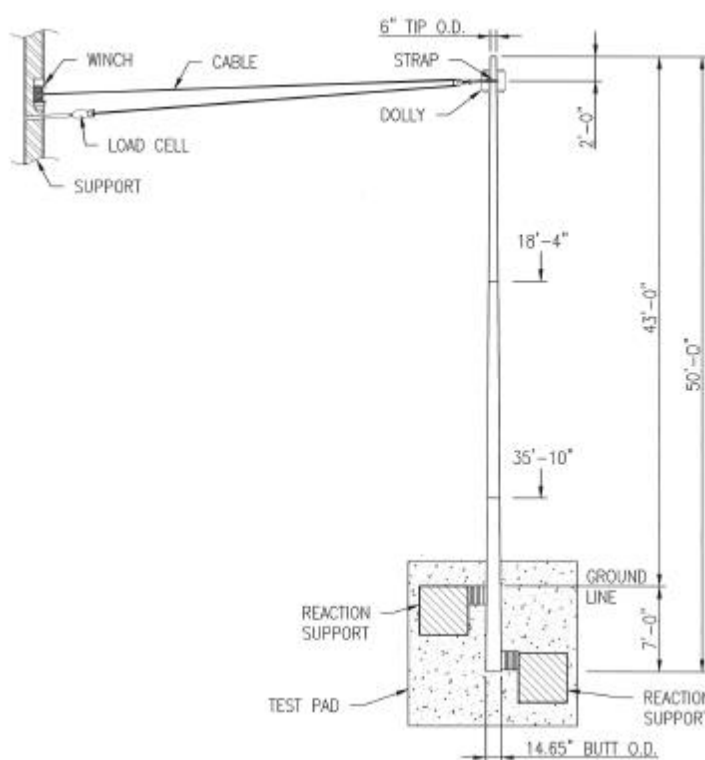
شکل ۲-۵۸ آزمون مقاومت دیواره پایه‌های کامپوزیت را به پیچ‌های متصل شده به آن نمایش می‌دهد، با کمک جک‌ها هیدرولیک و یا وینچ اتصالات مربوطه کشیده می‌گردد تا به یکی از مودها شکست اتفاق بیافتد و یا نیروی وارده به مقدار مورد انتظار برسد، مودهای خرابی این آزمون در واقع با افزایش سائز سوراخ، پاره‌گی دیواره، تسلیم شدن پیچ همراه خواهد بود.



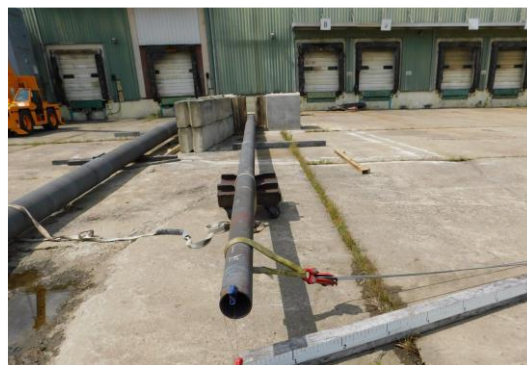
شکل ۲-۵۲ استفاده از پایش براساس لرزش پایه‌های توزیع، برای بررسی وضعیت پایه، [۱۴۲]



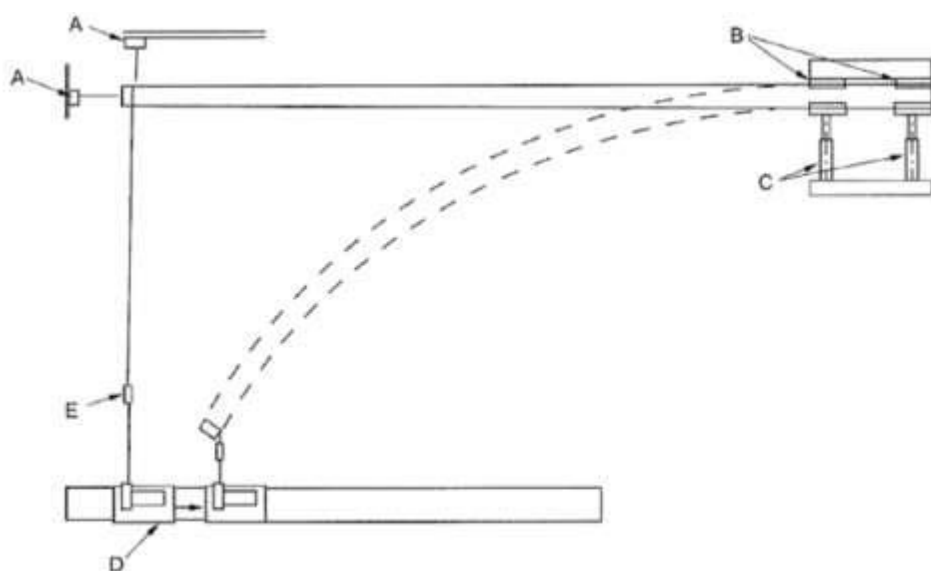
شکل ۲-۵۳ استفاده از گیرگاه بتنی با مقطع کاملاً مشابه به مقطع هشت وجهی پایه بتنی، و انجام آزمون مکانیکال، [۱۴۰]



شکل ۲-۵۴ نمای شماتیک استفاده از گیرگاه بتنی و قراردادی الوار جهت مهار پایه توزیع، [۱۴۱]



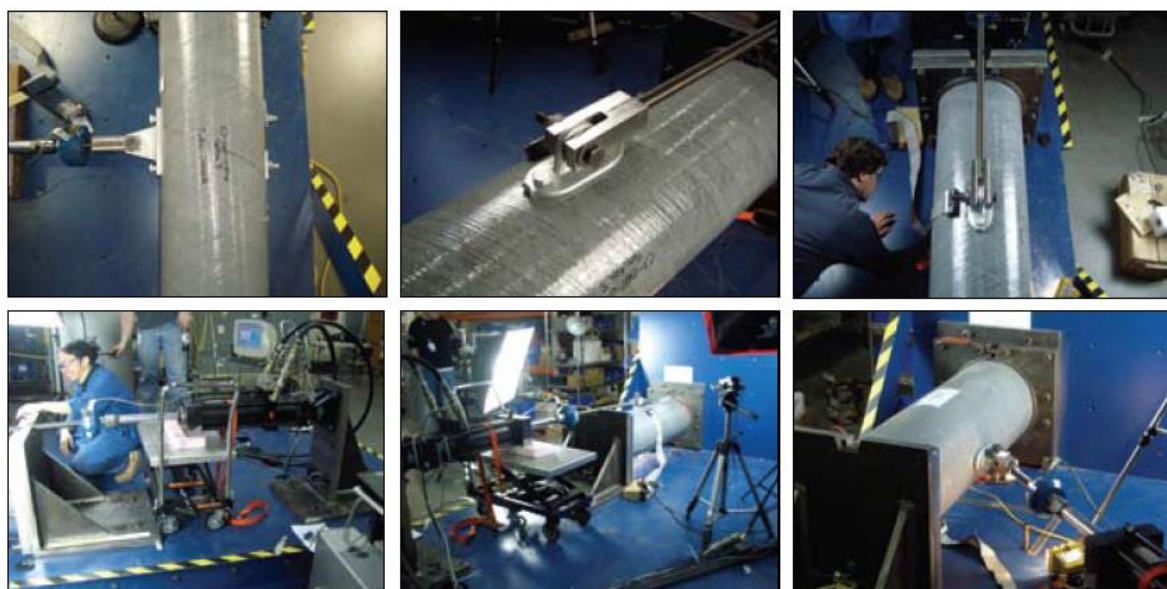
شکل ۲-۵۵ استفاده از گیرگاه بتنی و قراردادی الوار جهت مهار پایه توزیع، [۱۴۱]



شکل ۲-۵۶ نمای شماتیک استفاده از گیرگاه بتنی و قراردادی الوار به همراه جک جهت مهار پایه توزیع، [۱۴۱]



شکل ۲-۵۷ نحوه مهار پایه کامپوزیت در قاب فولادی با کمک بندهای بافته شده، و تعبیه گاری برای راس پایه، [۱۴۳]



شکل ۲-۵۸ آزمون کشیدن اتصالات پیچی متصل به پایه‌های کامپوزیت به منظور ارزیابی توانایی مصالح پایه کامپوزیت به نیروهای وارد شده از پیچ‌ها، [۱۴۳]

فصل سوم

شناخت روند تغییرات و توسعه روش‌های ارزیابی سازه‌های صنعت برق با توجه به رویکرد جدید دنیا نسبت به تولید انرژی

مقدمه فصل سوم:

محدود بودن منابع انرژی فسیلی و آلاینده‌گی زیست محیطی آن‌ها در تولید انرژی الکتریکی سبب جلب توجه دولت‌ها و سازمان‌های جهانی در استفاده از منابع انرژی نامحدود و بدون آلودگی زیست محیطی شده است. منابعی نظیر انرژی خورشید، باد، آب، انرژی زمین گرمایی و انرژی جاذبه ماه تحت عنوان انرژی‌های تجدیدپذیر معرفی می‌گردند که از انرژیهای طبیعی و قابل دسترس به وجود می‌آیند، شکل ۱-۳. چشم انداز استفاده از این انرژی در کشور ما نیز همانند سایر کشورهای توسعه یافته از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده به گونه ایکه دولت در برنامه پنجم توسعه برنامه ریزی لازم را صورت داده لذا با توجه به سیاستهای جهانی توسعه این انرژیها در کشور ما بمنظور حل مشکلات و ایجاد اشتغال ناپذیر خواهد بود بررسیهای صورت گرفته در این رابطه حاکی از این بوده که توسعه استفاده از انرژیهای نو می تواند نقش بسزایی در افزایش درجه امنیت سیستم انرژی کشور ایفا نماید.



شکل ۱-۳. انرژی‌های تجدیدپذیر

جهت استفاده از هر یک از انرژی‌های تجدیدپذیر فوق مسلماً نیاز به سازه‌ای می‌باشد تا فرآیند تبدیل به انرژی الکتریکی انجام گردد. در ادامه به توضیحاتی درخصوص آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر در آمریکا پرداخته می‌شود، در این آزمایشگاه انواع سازه‌هایی که در خصوص تولید انرژی برق استفاده می‌گردد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱-۳ آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر

با توجه به رویکرد دنیا نسبت به تولید انرژی الکتریکی در سال‌های اخیر، ارزیابی عملکرد سازه‌های این رویکرد و بمنظور افزایش قابلیت اطمینان اینگونه سازه‌ها لازم است، البته با توجه به ساختار سازه‌های فوق کاملاً مشخص است که اغلب اینگونه از سازه‌ها با سازه‌های عمرانی متداول از لحاظ ارزیابی تفاوت چندانی ندارند. در ادامه به معرفی آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر^۱ پرداخته می‌شود، این آزمایشگاه تنها آزمایشگاهس است که در این خصوص که مورد تأیید موسسه اعتبارسنجی آزمایشگاه‌های آمریکا^۲ و موسسه استاندارد آمریکا می‌باشد.

آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر دارای توانی آزمایش در رنج آزمایشگاهی تا صحرایی، وات تا مگاوات، اعضای یک سازه تا یک سازه کامل است، که امکانات این آزمایشگاه شامل:

- رنج کاملی از دینامومتر و تجهیزات آزمون سازه‌ای.
- مهندسين و تکنيسين‌های واجد شرایط برای آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی.
- رده بزرگی از حسگرهای تجاری و سخت افزارهای مربوطه
- مرکز تحقیقات و ساخت مواد مرکب
- آزمون در محیط واقعی آب می‌باشد.

در این آزمایشگاه تاکنون بیش از ۱۵۰ پره توربین بادی و همینطور اجزاء و پره‌های توربین‌های آبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به دلیل گستره مختلف بارها و شرایط محیطی که برای پره‌های توربین‌ای بادی وجود دارد بتوان گفت ارزیابی پره‌های توربین‌ها یکی از کاملترین ارزیابی‌هایی است که در خصوص سازه به عمل می‌آید. در این مرکز آزمایشگاه آزمون تمام مقیاس پره‌های توربین انجام می‌گردد در واقع انجام این آزمون‌ها کمک به طراحی سیستم‌هایی با قابلیت اطمینان بالا می‌کند.

اعتبارسنجی سازه‌ای مقیاس کامل پره‌های توربین بادی زیر نظر کمیته بین المللی الکتروتکنیک استاندارد - ۶۱۴۰۰ ۲۳ از طریق بکارگیری سازمان بین المللی استاندارد سازگار با کیفیت ۱۷۰۲۵ می‌باشد. آزمایشگاه سازه

¹ National Renewable Energy Laboratory (NREL)

² American Association of Laboratory Accreditation.

NREL آزمایش‌های خصوصیات مواد، آزمون بارگذاری استاتیکی و خستگی را بر روی پره‌های توربین بادی انجام می‌دهد.



شکل ۳-۲. آزمون بارگذاری استاتیکی بر روی پره توربین بادی

آزمایش شناسایی خصوصیات دینامیکی نیز در *NREL* نیز بر روی سازه‌ها به منظور شناخت خصوصیات ذاتی سازه شامل وزن، میرایی و سختی سازه بخصوص در پره‌های توربین انجام می‌پذیرد.



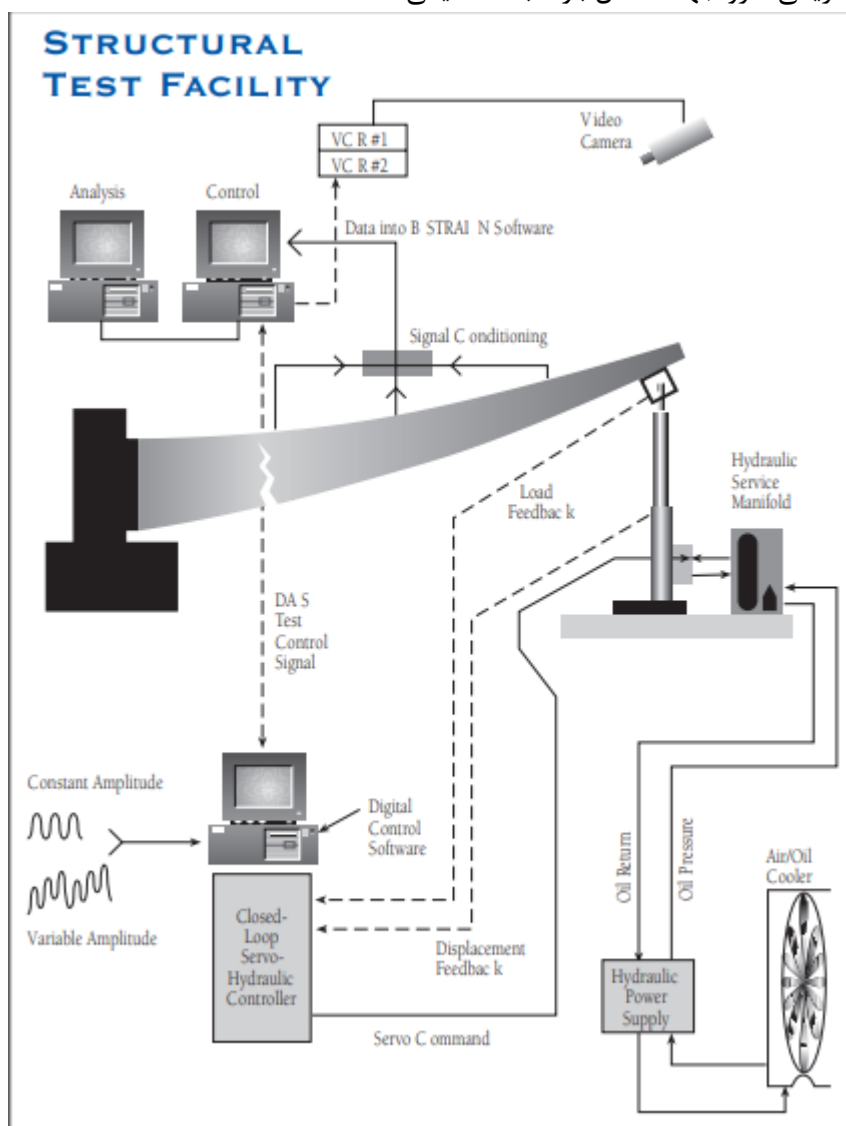
شکل ۳-۳. ارزیابی خستگی پره توربین بادی

خصوصیات فنی آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر شامل:

سازه‌های زیربنایی و سخت افزارها:

- توانایی آزمون پره‌های توربین و اجزای مرتبط آن را در مقیاس کیلو ولت تا مگا ولت دارد، پره‌های توربین و اجزای مرتبط تا طول ۵۰ متر، شکل ۳-۴.

- ۱۸۰۰ متر مربع از فضای آزمایشگاه برای مستقر کردن تجهیزات و انجام آزمون
- پنج تکیه‌گاه و نشیمن با ظرفیت تحمل لنگری از ۱۰۰ کیلونیوتن-متر تا ۱۶.۷ مگانیوتن-متر
- سیستم‌های سرو هیدرولیک مدولار، با ظرفیت جریان هیدرولیکی ۶۸۰ لیتر در دقیقه
- عملگرهای هیدرولیک سرو با بازه اعمال نیروی ۵ تا ۵۰۰ کیلونیوتن، و دامنه حرکت ۱.۵ متر
- قاب سازه‌ای با ظرفیت ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن
- وینچ‌های الکتریکی سرو جهت اعمال بار شبه استاتیکی



شکل ۳-۴. تجهیزات شماتیک آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر

تجهیزات ابزار دقیق و کسب داده:

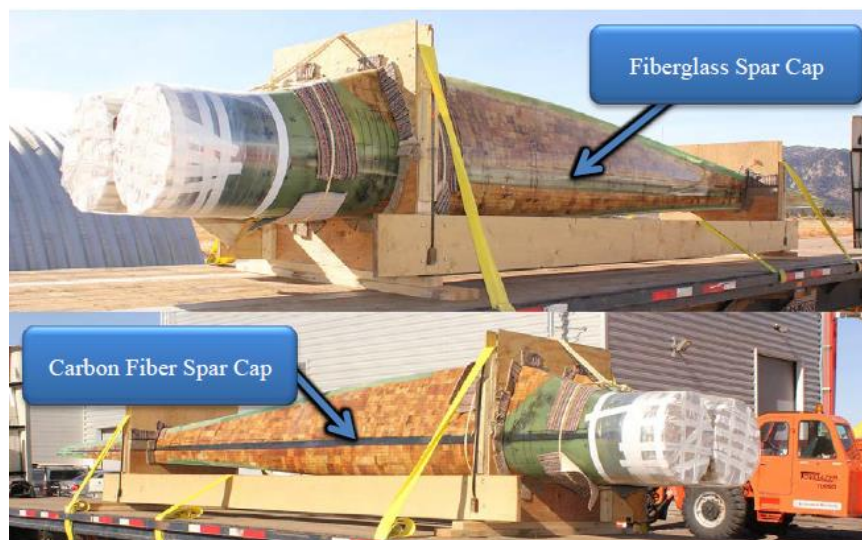
- سیستم اکتساب داده‌ای با تعداد ۱۰۰ کانال

- نرم افزار اکتساب داده‌ی سفارشی متناسب با ارزیابی استاتیک و ارزیابی خستگی
- سیستم چند کاناله آزمون مودال
- سیستم ۴۸ کاناله فیزیکی آکوستیک جهت ارزیابی سازه از طریق انتشار آکوستیک، شکل ۳-۵
- ردیاب لیزر *API* برای تشخیص خصوصیات سطوح و اندازه‌گیری جابه جایی سه بعدی
- مبدل فیبر نوری از شرکت میکرون اپتیک
- دوربین های حرارتی *Flir* برای سنجش حرارت فعال و غیرفعال
- رده وسیعی از حسگرهای اندازه‌گیری تنش و کرنش
- تصویر دیجیتال همبسته برای اندازه‌گیری میدان کرنش و جابجایی



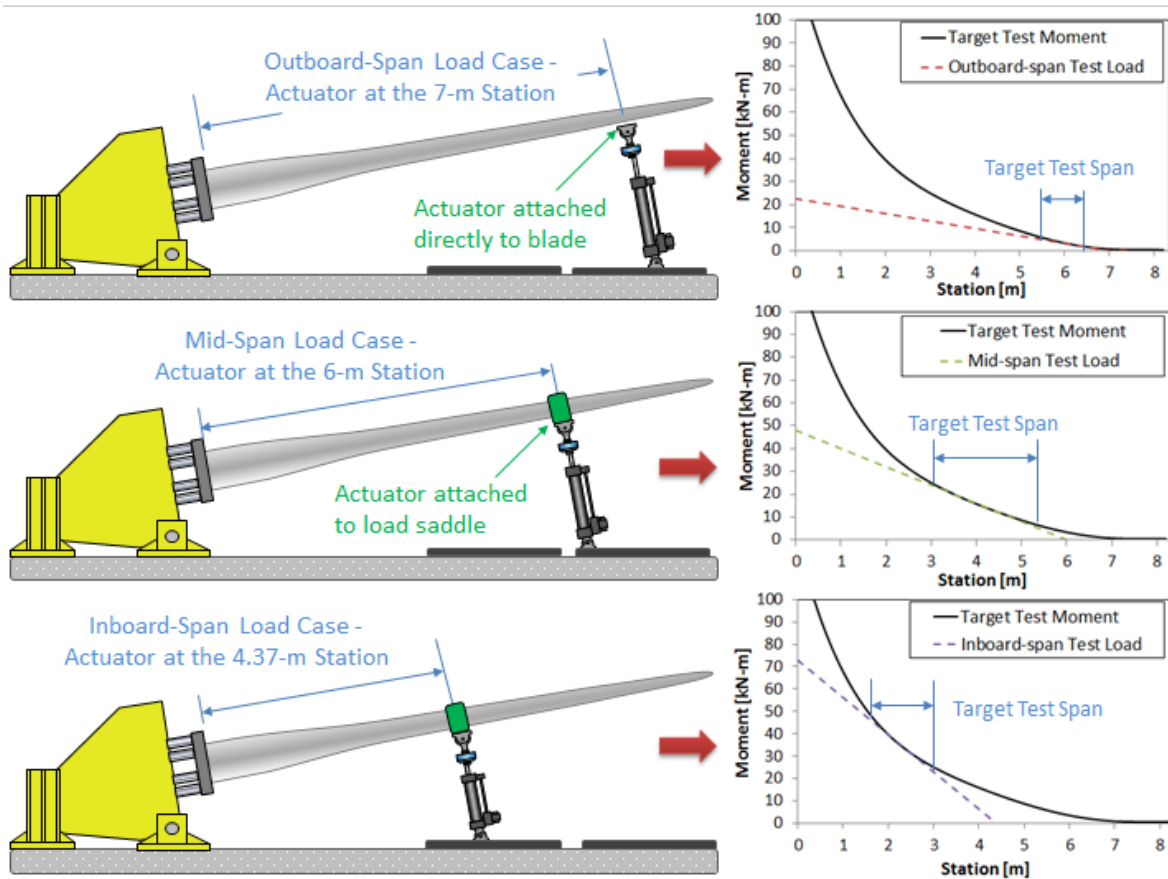
شکل ۳-۵. استفاده از حسگرهای انتشار صوتی نصب شده بر روی پره توربین بادی

تجهیزات متنوع این آزمایشگاه چه از لحاظ تجهیزات ابزار دقیق و الکترونیک و تجهیزات نوین اندازه‌گیری و چه از لحاظ سخت افزارهای فیزیکی جهت برپایی و آزمون پرها توربین بادی امکانات کاملی را فراهم آورده است. در ادامه به ارائه توضیحات و تصاویری از آزمون‌هایی که بر روی پره‌های توربین بادی در این آزمایشگاه انجام می‌شود پرداخته می‌گردد. شکل ۳-۶ حمل پره های توربین بادی از جنس الیاف شیشه و کربن به آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر آمریکا را نشان می‌دهد، ابعاد پرها (طولی تقریبی ۸ متر) در مقایسه با تریلی کاملاً مشخص می‌باشد.

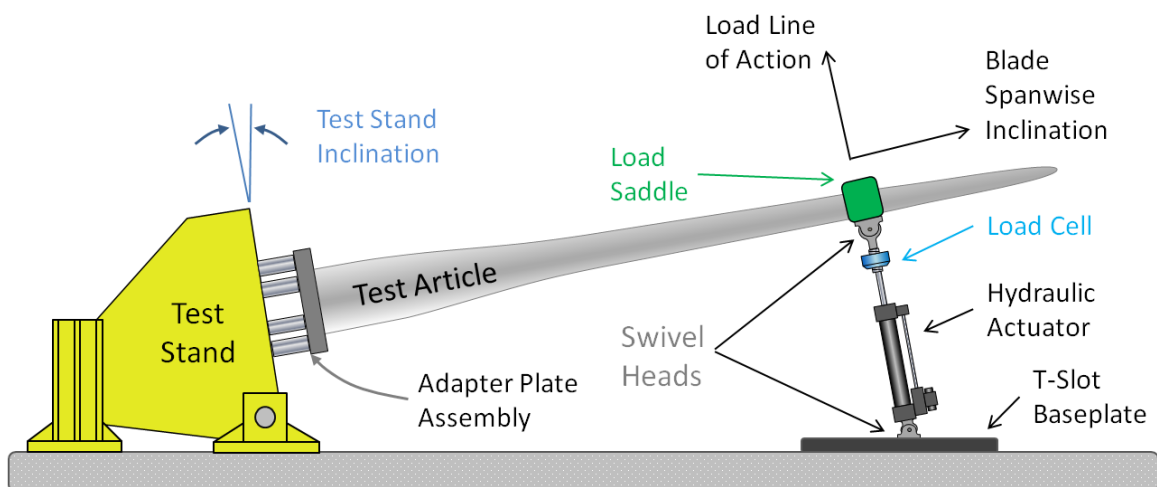


شکل ۳-۶. حمل پره های توربین بادی از جنس الیاف شیشه و کربن به آزمایشگاه

شکل ۳-۷ نمایش شماتیک برپایی مکانیکی پره توربین بادی جهت انجام آزمون لنگر در انتها، میانه و ساق ابتدایی پره، و پاسخهای حاصل از انجام آزمون فوق را نمایش می‌دهد، همانطور که دیده می‌شود برپایی مکانیکی پره توسط گیرگاهی مناسب که بر روی بستر آزمایشگاه ثابت شده است صورت می‌پذیرد و اعمال نیرو توسط عملگرهای هیدرولیک که از یک سمت بر روی بستر ثابت شده‌اند و سمت دیگر به پره متصل جهت اعمال نیرو متصل شده است، شکل ۳-۸. شکل ۳-۹ رابط اتصال پره به گیرگاه توربین بادی را نمایش می‌دهد و همچنین حسگرهای کرنش که بر روی پره قرار گرفته‌اند را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۷. نمایش شماتیک برپایی فیزیکی پره توربین بادی جهت انجام آزمون لنگر در انتها، میانه و ساق ابتدایی پره، و پاسخها- حاصل از انجام آزمون فوق



شکل ۳-۸. نمایش شماتیک اجزای برپایی فیزیکی پره توربین بادی جهت انجام آزمون لنگر



شکل ۳-۹. رابط اتصال پره توربین بادی به گیرگاه با زاویه متغیر و نمایش اتصال کرنش سنج بر روی پره توربین بادی



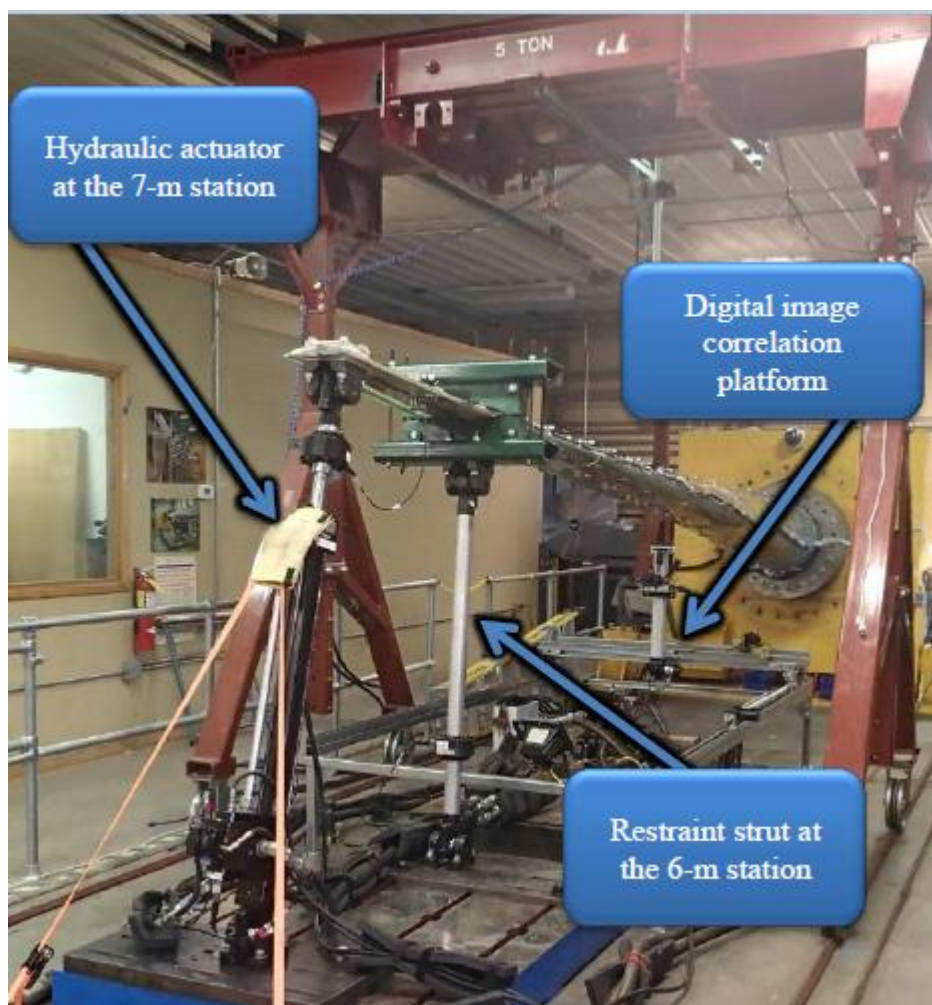
شکل ۳-۱۰. نمای کلی از برپایی پره توربین بادی جهت انجام آزمون لنگر با اعمال نیرو توسط عملگر هیدرولیک در انتهای پره

شکل ۳-۱۰ نمای برپایی پره توربین بادی جهت انجام آزمون لنگر با اعمال نیرو توسط عملگر هیدرولیک در انتهای پره را نمایش می‌دهد، طول پره هفت متر از جنس الیاف کربن می‌باشد. گیرگاه در محل اتصال پره شرایطی مشابه شرایط واقعی از لحاظ درصد گیرداری و آزادی تکیه‌گاه به منظور چرخش و اصطکاک در هنگام آزمون فراهم می‌آورد.



شکل ۳-۱۱. دو روش متفاوت اتصال عملگر به پره توربین بادی، سمت راست روش اتصال زینی، و سمت چپ روش اتصال مستقیم

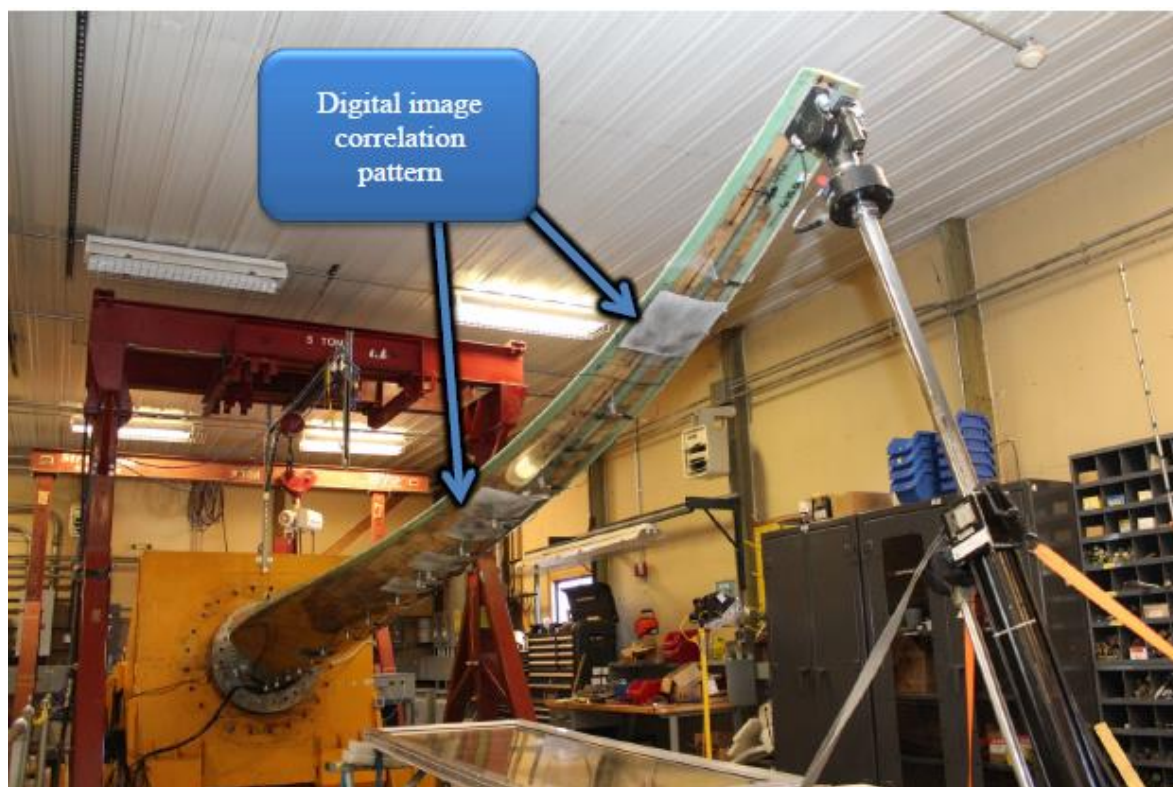
به منظور ایجاد شرایط واقعی تر آزمون روش‌های متفاوتی جهت اتصال عملگر به پره جهت اعمال نیرو وجود دارد روش که شکل ۳-۱۱ دو روش متفاوت اتصال زینی و اتصال مستقیم را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲. مهار متحرک در فاصله ۶ متری از تکیه‌گاه، اعمال نیرو در انتهای پره، و دستگاه همبسته ساز تصویر دیجیتال به منظور اندازه‌گیری میدان کرنش

در شکل ۳-۱۲ اندازه‌گیری میدان کرنش را از روش همبستگی تصاویر نمایش می‌دهد. صفحات الگو در محل‌های مد نظر جهت اندازه‌گیری میدان کرنش به روی پره چسبانده می‌شود، شکل ۳-۱۳، که در اثر تغییرات کرنش تصاویر تهیه شده توسط دوربین‌های مستقر امکان ثبت میدان کرنشی را از طریق همبستگی تصاویر دیجیتال فراهم می‌نماید.

همین‌طور در جهت انجام آزمون‌های بیشتر و مطابق با شرایط واقعی پره‌ها بطور معمول در تونل باد نیز تحت آزمون محیل واقعی قرار می‌گیرند.



شکل ۳-۱۳. چسباندن صفحات الگو جهت ثبت تصاویری دیجیتال

همانطور که مشاهده می‌گردد جهت ارزیابی سازه‌های مرتبط با انرژی‌های تجدید پذیر از تجهیزات نوین آزمایشگاهی استفاده می‌گردد، که گاهی در آزمون‌های استاندارد مشاهده نمی‌گردد. آنچه که مسلم است استفاده از این تجهیزات امکان ارزیابی صحیح یک سازه را بخصوص اگر که استاندارد معینی جهت ارزیابی آن وجود نداشته باشد فراهم می‌کند. تکنولوژی‌های نوین سبب می‌گردند تا بطور دقیق و خارج و قالب‌های استاندارد بتوان رفتار دقیق یک سازه را شناسایی کرد، و این شناسایی سبب افزایش قابلیت اطمینان در استفاده از آن سازه می‌گردد. ضرورت استفاده اینگونه از ارزیابی‌ها با توجه به ناشناخته بودن رفتار سازه، ناشناخته بودن عدم قطعیت‌های مختص به بار وارده و مختص به مصالح و هندسه سازه، اهمیت سازه تعیین می‌گردد، هر چه رفتار سازه شناخته شده‌تر باشد آزمون‌های ساده‌تری پاسخ‌گوی ارزیابی آن‌ها خواهد بود.

۳-۱-۱ تونل باد

مهمترین هدف آزمایش آیرودینامیکی ناپایا^۱ فراهم آوردن اطلاعات کمی مورد نیاز از رفتار تمام مقیاس آیرودینامیکی سه بعدی سازه‌هایی است که تحت اثر جریان شدید هوا قرار دارند. توربین‌های بادی رفتار آیرودینامیکی بسیار پیچیده‌ای را در محیط واقعی از خود نشان می‌دهند و تمام کدهای طراحی توربین‌های بادی

¹ Unsteady Aerodynamics Experiment (UAE)

برای حالت ۲ بعدی جریان هوا می‌باشند، این در حالی است که آزمایش‌های میدانی نشان می‌دهد که عملکرد توربین بادی تحت اثر جریان هوا بسیار متفاوت از فرضیات کدهای طراحی می‌باشد.

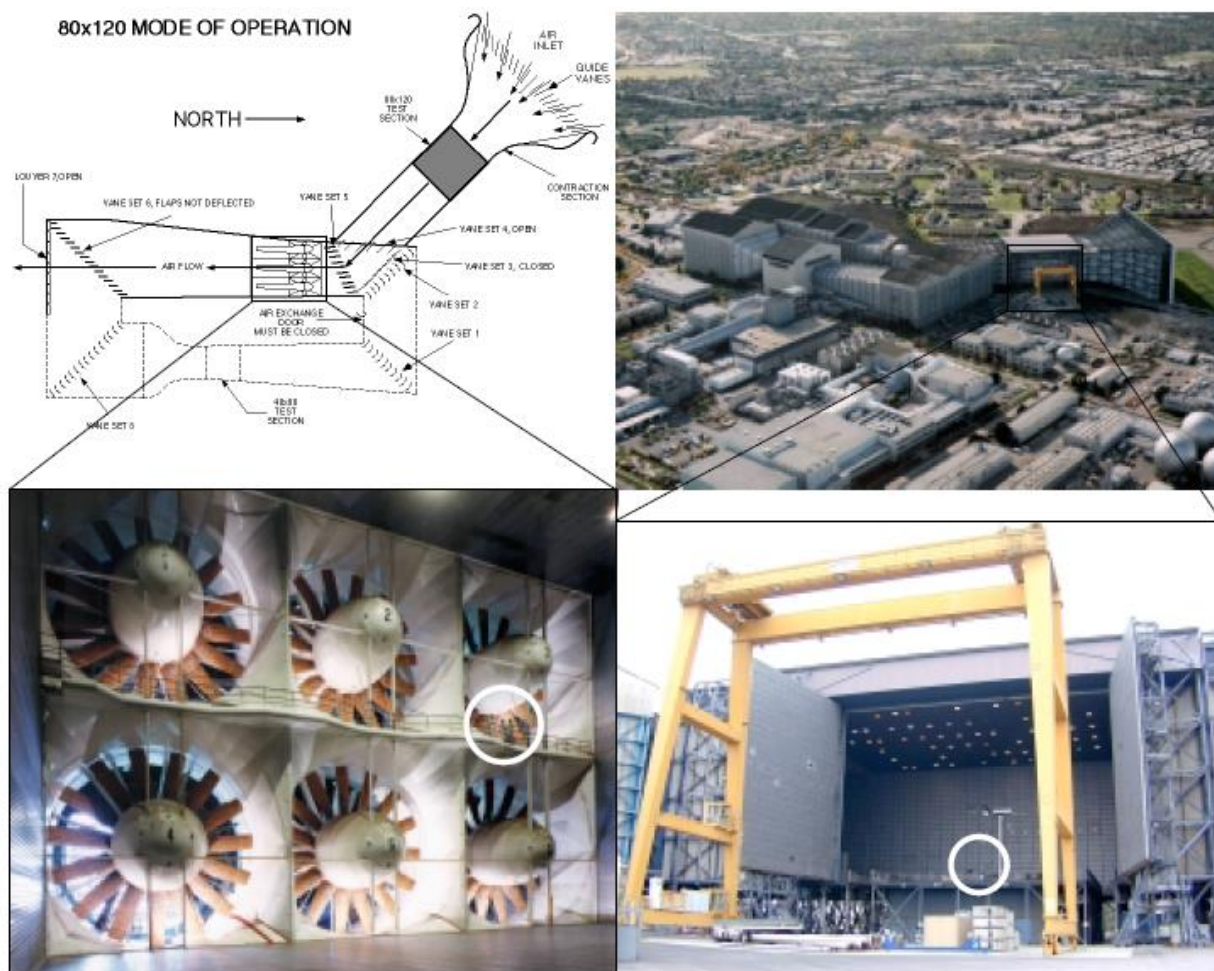
بارهای دینامیکی شدید بر اثر جریان‌های آشفته جوی همواره بر توربین بادی اعمال می‌گردد، به همین جهت آزمایش تونل باد فرصت دست‌یابی به اثرات میدانی را بر روی توربین بادی فراهم می‌آورد.

در تمام این سال‌ها تنها تونل باد با ابعاد مناسب جهت قرارگیری توربین بادی با حداکثر قطر ۱۰ متر که در حال فعالیت است تونل باد ناسا^۱ می‌باشد، مقطع عرضی این تونل باد برابر با ۲۴.۴ متر در ۳۶.۶ متر است، شکل ۳-۱۴. از سال ۱۹۸۷ در آزمایشگاه ملی انرژی‌های نو در مرکز ملی تکنولوژی باد (NWTG) واقع در کلرادو (یعنی آزمایشگاه تونل باد ناسا) آزمایش سه بعدی تونل باد بر روی توربین‌های بادی انجام می‌گردد، [۱۴۴].

هدف از این تونل باد اندازه‌گیری دقیق مقادیر آیرودینامیکی بر روی توربین‌های بادی براساس هندسه و دینامیک یک توربین تمام مقیاس در محیط واقعی می‌باشد. این اطلاعات برای صحت سنجی و توسعه مدل‌های مهندسی توربین بادی به منظور طراحی و آنالیز ماشین‌های پیشرفته انرژی بادی است.

در این خصوص تیم‌های تحقیقاتی زیر نظر *NREL* و *UNE* به تولید اطلاعات به منظور صحت سنجی مدل‌های نیمه تجربی با انجام آزمایش بر روی توربین‌ها بادی طراحی شده در تونل باد پرداختند و پاسخ‌های ۳ بعدی حاصل را برای بدست آوردن پارامترهای طراحی مورد استفاده قرار دادند. مهمترین پارامترهایی که به طور معمول اندازه‌گیری می‌گردد شامل فشار بر روی سطح پره‌ها، زاویه اعمال فشار، دینامیک جریان فشار در پنج ناحیه از پره است. علاوه بر پارامترهای طراحی آیرودینامیکی فوق پاسخ‌های سازه‌ای شامل لنگر پایه پره توربین، لنگر خمشی محور اصلی توربین در سرعت‌های پایین، ممان پیچشی بدنه توربین، انحراف نوک پره و شتاب بدنه توربین قابل اندازه‌گیری می‌باشد، همچنین جابجایی‌های بدنه توربین به دلیل انحراف و پیچش بدنه، انحراف محور روتار از آکس ابتدایی و وضعیت استقرار پره‌ها نیز اندازه‌گیری می‌شود، [۱۴۴]. بطور معمول در توربین‌ها سرو موتورها به صورت بسیار دقیق انحراف پره‌ها و پیچش بدنه را با دقت بسیار بالا کنترل می‌کنند.

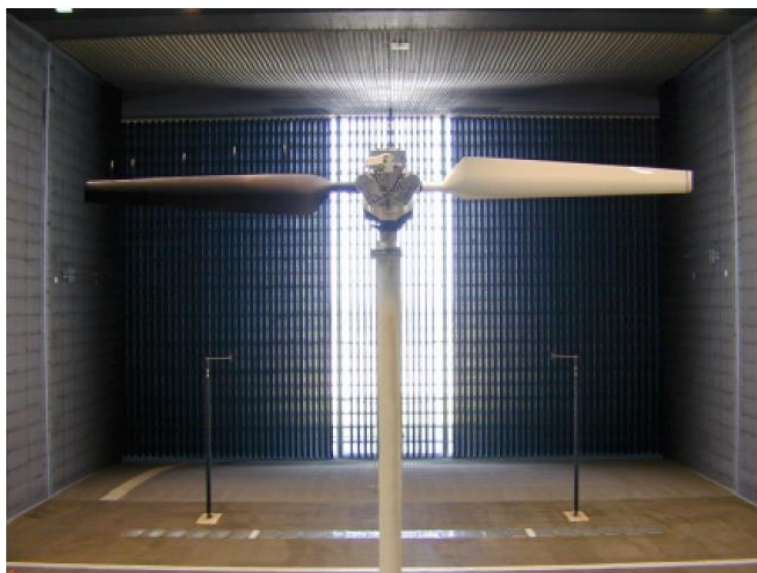
¹ National Aeronautics and Space Administration (NASA)



شکل ۳-۱۴. مرکز تحقیقاتی ناسا، مجموعه انجام آزمون‌های آیرودینامیکی تمام مقیاس، [۱۴۴]

۳-۱-۱-۱-۱ مشخصات تونل باد ناسا:

همانطور که پیشتر بیان شد مقطع عرضی این تونل باد برابر با ۲۴.۴ متر در ۳۶.۶ متر است. این تونل باد شامل شش فن شش پره می‌باشد که هر کدام با یک موتور الکتریکی با توان ۴۵۰۰ کیلو وات (۶۰۰۰ اسب بخار) به گردش در می‌آیند، همچنین علاوه بر فن‌های فوق ۶ فن پانزده پره موجود می‌باشد، که هر کدام با یک موتور الکتریکی ۱۶۸۰۰ کیلو وات (۲۲۵۰۰ اسب بخار) به گردش در می‌آیند، که در مجموع توان کل مصرفی مجموعه فن‌ها ۱۰۶ مگاوات می‌باشد. سیستم کنترل سرعت متغییر فن‌ها که با سیستم کنترل زاویه پره‌ها همراه شده است کنترل دقیق سرعت باد را در مقطع آزمون فراهم می‌آورد. در مقطع آزمون سرعت باد به طور پیوسته از صفر تا پنجاه متر بر ثانیه می‌تواند تغییر کند. جهت اندازه‌گیری سرعت باد از باد سنج‌های صوتی با دامنه فرکانس ۱۰ هرتز استفاده شده است. شکل ۳-۱۵ برپایی یک توربین بادی را در مقطع آزمون این تونل باد نمایش می‌دهد، [۱۴۴].



شکل ۳-۱۵. توربین بادی برپا شده در مقطع آزمون تونل باد ناسا، [۱۴۴]

۳-۱-۱-۲ دیگر تونل بادهای شاخص در دنیا

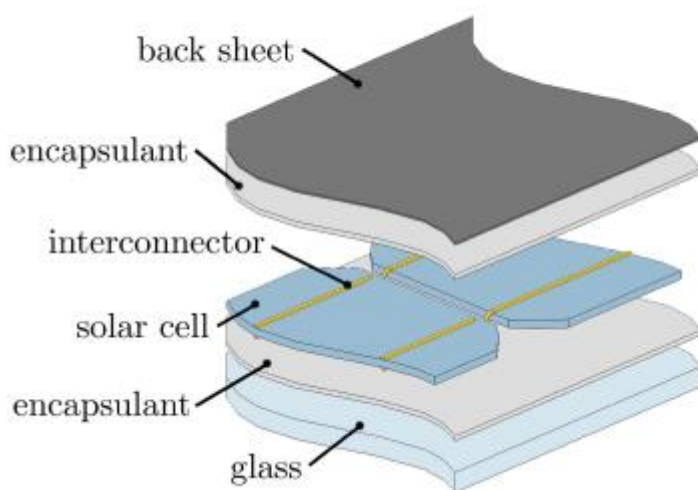
در حال حاضر در دنیا در ۸۷ تونل باد جهت آزمون‌های ایرودینامیک در حال فعالیت می‌باشند، که بسیاری از آنها با ابعاد بسیار کوچک جهت آزمون نمونه‌های مقیاس شده می‌باشند، تنها تعداد انگشت شماری از آنها دارای ابعادی می‌باشند که امکان انجام آزمون تمام مقیاس تا ابعادی مشخص در آنها امکان‌پذیر می‌باشد، در جدول ۳-۱ تعدادی از معروفترین تونل‌های باد دنیا که ابعادی بزرگتر نسبت به سایر تونل‌های باد دارند را نشان می‌دهد. بازه عملکردی آنها از لحاظ سرعت باد، بصورت فرو صوتی، فراصوتی و محدوده سرعت باد در جو می‌باشد، [۱۴۴].

جدول ۳-۱ بزرگترین تونل‌های باد دنیا، [۱۴۴]

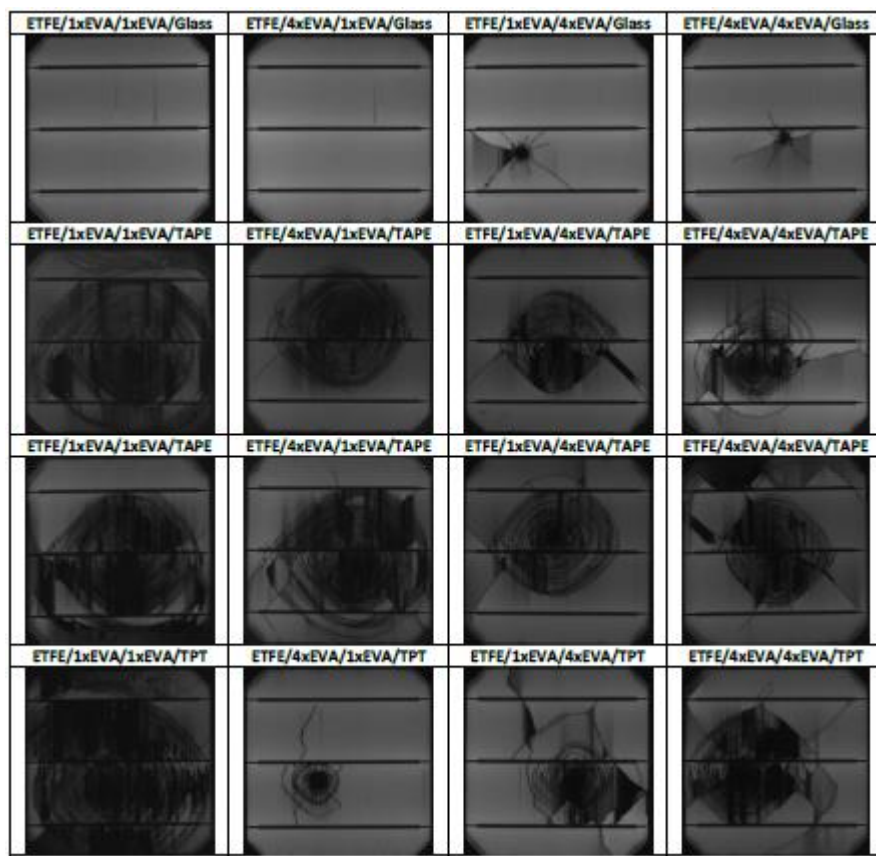
نام	وضعیت فعلی	ابعاد (عرض X ارتفاع X طول)	استفاده	محل	ویژگی‌ها
مرکز تحقیقاتی ناسا، مجموعه انجام آزمون‌های آیرودینامیکی تمام مقیاس، که توسط نیروی هوایی آمریکا اداره می‌گردد	فعال	۲۴.۳۸ متر در ۳۷ متر؛ ۱۲ متر در ۲۴ متر	سرعت باد فروصوتی	در منطقه کوهستانی کالیفرنیا، آمریکا	بزرگترین تونل باد در دنیا
موسسه مرکزی آیرودینامیک	فعال	24 متر در 14 متر در ۲۴ متر		ژوکوفسکی، روسیه	
GVPM	فعال	۱۴ متر در ۳.۸ متر در ۳۶ متر؛ ۴ متر در ۳.۸ متر در ۴ متر	ساختمان، پل، و مقاصد عمومی آزمون‌های آیرودینامیک	میلان، ایتالیا	تونل بادی مدار بسته به صورت عمودی با دو بخش آزمایش: یکی برای شرایط جوی (با حداکثر سرعت ۱۶ متر بر ثانیه)، و دیگری برای شرایط هوانوردی (با حداکثر سرعت باد ۵۵ متر بر ثانیه) با امکان آزمایش با جت باز / بسته
تونل باد ONERA Modane	فعال	قطر ۸ متر در ۱۴ متر	سرعت باد حدود فروصوت، جوی	ONERA Modane, فرانسه	بزرگترین تونل باد مداوم در جهان، ۰.۰۵ تا ۱ ماخ
تونل باد RWDI	فعال	قطر ۷.۳۲ متر؛ قطر ۳.۶۶ متر	مهندسی باد و ساختمان-های مقیاس شده	گولف، انتاریو، کانادا	دو تونل باد
موسسه مرکزی آیرودینامیک: T-104		قطر ۷ متر		ژوکوفسکی، روسیه	

۳-۱-۲ آزمون مکانیکی سلول‌های خورشیدی

ماژول‌های فتوولتائیک از لایه‌های متفاوتی تشکیل شده‌اند، شکل ۳-۱۶، همواره در معرض بار ضربه ناشی از تگرگ، و نیروهای مختلفی که به واسطه باد آن‌ها وارد می‌گردد می‌باشند و به همین سبب باید نسبت به این عوامل مقاومت کافی داشته تا بتوانند عملکرد مناسبی از خود نشان دهند. [۱۴۵]، *Error! Reference source not found.* شکل ۳-۱۷.



شکل ۳-۱۶. لایه‌های مختلف یک پنل خورشیدی



شکل ۳-۱۷. خسارت ناشی از ضربه تگرگ بر روی صفحات سلول‌های خورشیدی،

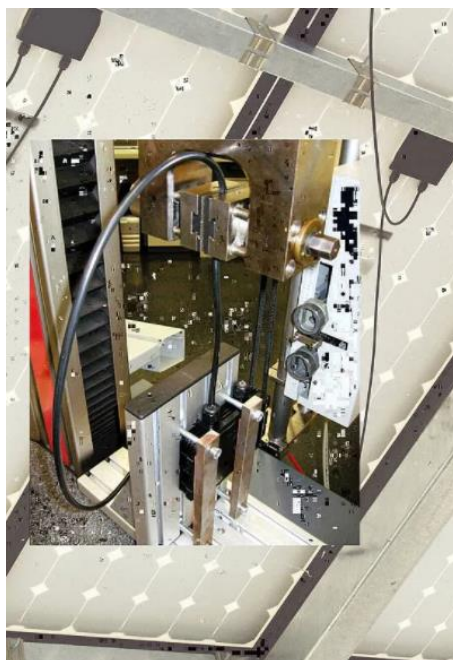
از اینرو به منظور افزایش قابلیت اطمینان آن‌ها و بهره‌وری بالاتر لازم است بتوانند الزامات استانداردهای مشخصی را تامین نمایند، که براساس آزمون‌های مکانیکال می‌باشند، [۱۴۵].

آزمون‌هایی که برای ماژول‌های فتوولتائیک تعریف می‌گردد شامل آزمون مقاومت در مقابل پوسته شدن فیلم تدلار^۱ (شکل ۳-۱۸)، آزمون بیرون کشیده شدن کابل و جعبه اتصال (شکل ۳-۱۹)، تست پانچ بر روی شیشه ایمنی مقاوم برای تامین استاندارد ISO 614 حالت A و B (شکل ۳-۲۰)، آزمون خمش ۴ نقطه‌ای (شکل ۳-۲۱)

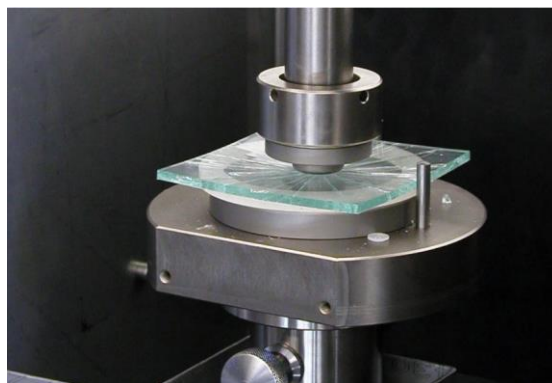
¹ Peel test on Tedlar film



شکل ۳-۱۸. شامل آزمون مقاومت در مقابل پوسته شدن فیلم تدلار، [۱۴۵]



شکل ۳-۱۹. آزمون بیرون کشیده شدن کابل و جعبه اتصال، [۱۴۵]



شکل ۳-۲۰. تست پانچ بر روی شیشه ایمنی، [۱۴۵]



شکل ۳-۲۱. آزمون خمش ۴ نقطه‌ای، [۱۴۵]

با توجه به استقبال استفاده از ماژول‌های فتوولتائیک در سال‌های اخیر و رشد استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر، آزمون‌های بیان شده در این بخش در خصوص صفحات خورشیدی برای کسب استانداردهای لازم توسط شرکت‌های سازنده الزامی می‌باشد، تا این صفحات در شرایط سخت محیطی بدون هیچ گونه کاهشی در عملکرد خود بتوانند به سرویس دهی ادامه دهند. آزمایش‌های مطرح شده شامل فناوری جدیدی نمی‌باشند تنها نوعی از آزمایش‌ها مکانیکال موجود می‌باشند.

۳-۱-۳ انرژی زمین گرمایی^۱

انرژی زمین گرمایی به انرژی حرارتی که در پوسته جامد زمین وجود دارد گفته می‌شود. این انرژی اغلب در جهت تولید الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد. فناوری مورد استفاده در طرح‌های تولید برق از انرژی زمین گرمایی شامل نیروگاه‌های بخار خشک، نیروگاه‌های تبدیل بخار سیال و نیروگاه چرخه دوگانه است.

انرژی زمین گرمایی برخلاف سایر انرژی‌های تجدیدپذیر محدود به فصل، زمان و شرایط خاصی نبوده بدون وقفه قابل بهره‌برداری است. همچنین قیمت تمام شده برق در نیروگاه‌های زمین گرمایی با برق تولیدی از سایر نیروگاه‌های متعارف (فسیلی) قابل رقابت بوده و حتی از انواع دیگر انرژی‌های نو بسیار ارزانتر است.

منابع انرژی زمین گرمایی شامل، منابع آب داغ، منابع بخار خشک، منابع تحت فشار زمین، تخته سنگ‌های خشک داغ، منابع ماگمایی می‌باشند. که در بین آن‌ها با توجه سهولت و امکان‌پذیری استفاده سه منبع ابتدایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

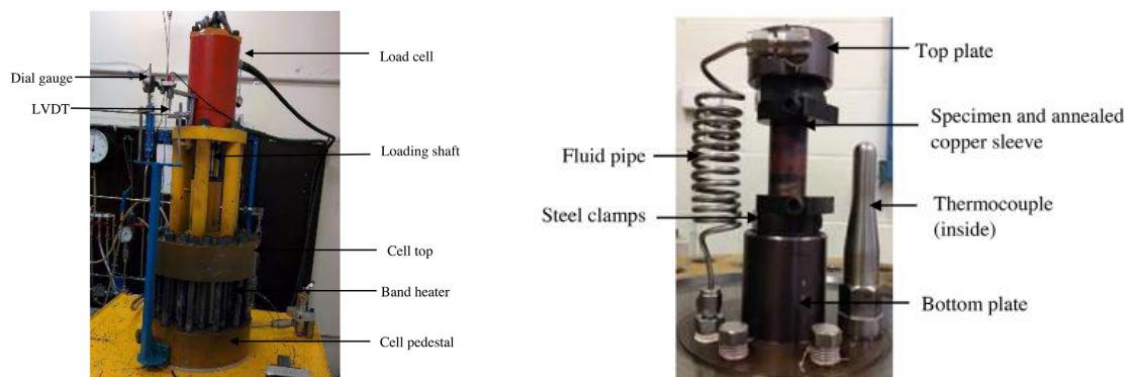


شکل ۳-۲۲ سایت یک نیروگاه زمین گرمایی با استفاده از منابع آب داغ، در نزدیکی کالیفرنیا، [۱۴۶]

همانطور که مشاهده می‌گردد مشابه بسیاری از سازه‌های عمرانی و بخصوص نیروگاهی تمامی سازه‌های موجود در اینگونه نیروگاه‌ها سازه‌هایی می‌باشند که در آزمایشگاه‌های سازه تنها بخشی (بطورمثال اتصال آن‌ها و ...) از آن‌ها

¹ Geothermal Energy

قابل ارزیابی می‌باشد. در این میان جهت بهره جستن از انرژی زمین گرمایی در هر یک از منابع فوق نیاز به دسترسی به اعماق زمین می‌باشد، که از لایه‌های مختلف خاک و سنگ عبور باید کرد، که هر یک از لایه‌های زمین در این مسیر دارای خصوصیات مکانیکی خاصی می‌باشند که لازم است از لحاظ مکانیکی مورد بررسی قرار گیرد، یکی از آزمون‌هایی که در بسیاری از مراجع به آن اشاره شده است استفاده از آزمون سه محوری تحت فشار و دمای بالا می‌باشد، [۱۴۷].



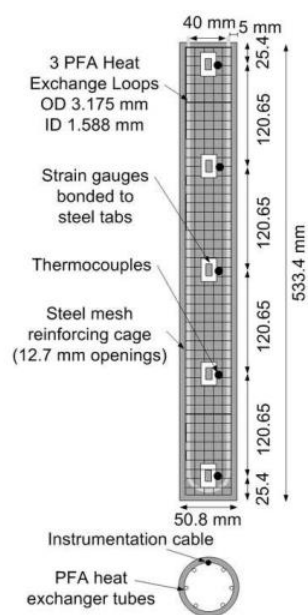
شکل ۳-۲۳ دستگاه آزمون سه محوری تحت فشار و دمای بالا به همراه نمای داخلی دستگاه، [۱۴۷]

یکی از روش‌هایی که بطور گسترده در استفاده از انرژی زمین گرمایی متداول می‌باشد استفاده مستقیم از انرژی زمین گرمایی می‌باشد، این امر در نقاطی که آب گرم با دمای حداکثر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد موجود می‌باشد با پمپاژ آب قابل استفاده در ساختمان خواهد بود، و یا استفاده از دمای زمین در اعماقی از زمین که در تمام طول سال دارای عددی تقریباً ثابت می‌باشد، استفاده از انرژی زمین در این حالت با استفاده از **شمع‌های انرژی** امکان‌پذیر می‌باشد.

شمع‌های انرژی می‌توانند از نوع شمع‌های سازه‌ای و یا شمع‌های غیر سازه‌ای باشند که با قراردادن یک مدار گردش آب با استفاده از لوله، امکان استفاده از اختلاف دمای محیط خارجی زمین را با اعماق زمین در شمع‌ها فراهم آورند، در اینگونه شمع‌ها به دلیل تغییر دمای شمع در طول آن در مقایسه با خاک اطراف بر ظرفیت باربری شمع تاثیر خواهد داشت، لذا برای تعیین دقیق ظرفیت باربری آزمون ظرفیت باربری شمع‌ها انجام می‌پذیرد، تفاوتی که این آزمون با آزمون معمول باربری شمع دارد استفاده از جریان سنج، کرنش سنج و ترموکوپل در ارتفاع شمع می‌باشد که با توجه به تبادل گرمایی که اتفاق می‌افتد رفتار باربری شمع را پایش می‌کنند، [۱۴۸] [۱۴۹] [۱۵۰].



شکل ۳-۲۴ نمایش استفاده از شمع‌های انرژی در زیر یک مجتمع، [۱۴۸]



شکل ۳-۲۵ نمایش شماتیک ابزار نصب شده بر روی یک شمع انرژی جهت پایش آن، [۱۵۰]

فصل چهارم

بررسی فنی و اقتصادی فناوری‌های نوین در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

مقدمه فصل چهارم:

در این فصل به بررسی فنی و اقتصادی فناوری‌های نوینی که در ارزیابی سازه‌های صنعت برق کاربرد دارند پرداخته می‌شود و همچنین کاربرد آن‌ها در ارزیابی سازه‌های مختلف در حوزه‌های تولید، انتقال و توزیع مورد بررسی قرار می‌گیرد. ویژگی‌های متمایز کننده و کاربردی هر یک از فناوری‌ها بیان می‌گردد. هدف اصلی این فصل در نهایت آماده سازی شاخصه‌های مختلف برای هر فناوری جهت اولویت بندی این فناوری‌های نوین در فصل بعدی می‌باشد.

۴-۱ بررسی فنی و اقتصادی آزمایش خستگی دینامیکی در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

همانطور که در گزارش پیش بیان شد، بارهای چرخه‌ای وارد شده به اعضای سازه سبب شکست یا گسیختگی اعضا در ظرفیت مقاومتی کمتر از مقاومت استاتیکی آن عضو می‌گردند، از این رو آگاهی از رفتار خستگی مصالح تحت بارهای چرخه‌ای که به آن‌ها وارد می‌گردد از اهمیت بالایی برخوردار است. خستگی در تمامی مصالح سازه‌ای به نوعی وجود دارد، و با گسترش ترک‌های به مرور زمان افزایش می‌یابد. به همین سبب استفاده از آزمون‌های خستگی دینامیکی می‌تواند تخمین مناسبی از عمر مفید مصالح فراهم آورد و این موضوع سبب می‌گردد تا در زمان مناسب تمهیداتی به منظور جایگزینی و یا ترمیم اعضا خسته شده صورت پذیرد و از ایجاد آسیب‌های بیشتر در سازه و یا مختل شدن عملکرد آن جلوگیری به عمل آید.

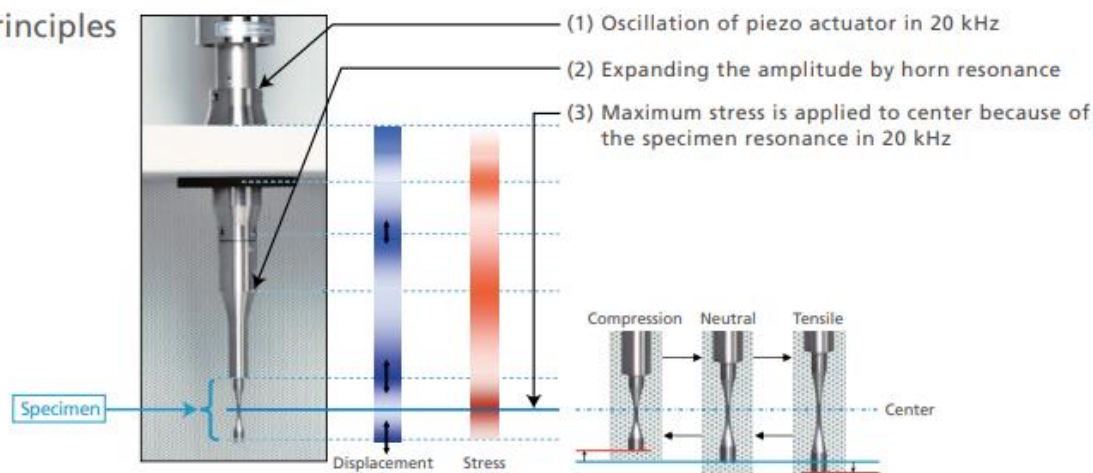
۴-۱-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

همواره آگاهی از عمر مفید یک سازه یکی از مسائل مهم در صنعت برق است، بخصوص توجه به این موضوع که بسیاری از سازه‌های صنعت برق تحت بارهای چرخه‌ای قرار دارند، و تخمین عمر این گونه سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از مصالح نوین در اجزای سازه سبب شده تا طول عمر بهره‌برداری آن‌ها از 10^7 به 10^9 (۱ گیگا) چرخه افزایش یابد. برای شناسایی چنین رفتاری دیگر روش‌های سنتی آزمایش خستگی با استفاده از جک‌های هیدرولیکی و یا جک‌های الکترونیرو با دامنه فرکانسی کم کاربردی نخواهد داشت و باید از روش آزمون خستگی التراسونیک استفاده گردد. روش خستگی التراسونیک توانایی تشخیص خستگی تمامی مصالح سازه‌ای را با دقت بسیار بالایی فراهم می‌آورد.

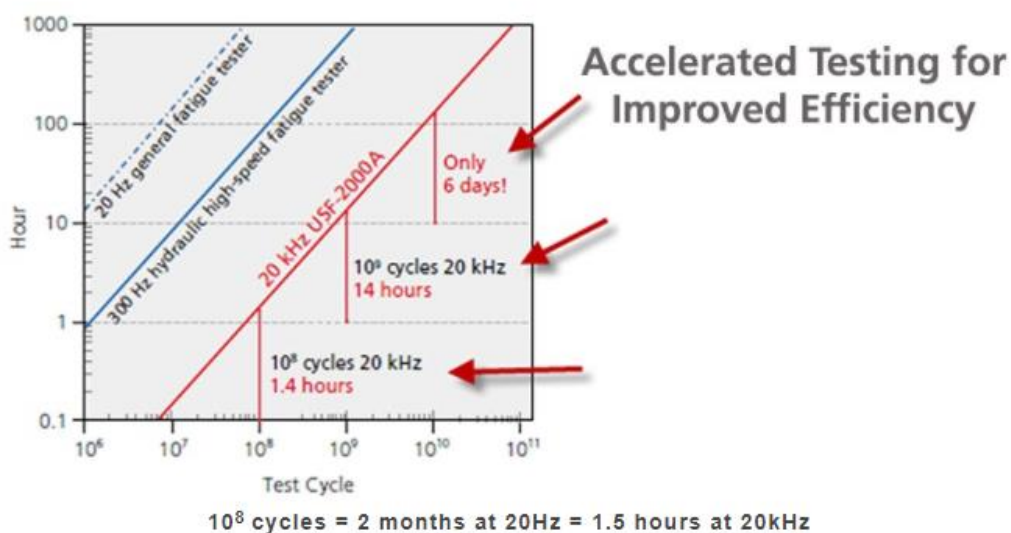
روش التراسونیک نسبت به روش‌های سنتی شامل مزایای فنی زیر می‌باشد:

- ✓ بارگذاری تا فرکانس ۲۰ کیلو هرتز، شکل ۱-۴
- ✓ کاهش چشمگیر زمان آزمایش، شکل ۲-۴
- ✓ امکان انجام آزمایش خستگی برای مصالح ترد مانند بتن
- ✓ امکان بررسی طول عمر مصالح، شروع خستگی و گسترش ترک خوردگی
- ✓ ابعاد کوچک دستگاه جهت آزمایش خستگی، شکل ۳-۴

■ Principles



شکل ۱-۴ نمونه مورد استفاده در دستگاه آزمون خستگی التراسونیک مدل USF-2000A از شرکت شیمادزو^۱، [۱۵۱]



شکل ۲-۴ تاثیر استفاده از دستگاه آزمون خستگی التراسونیک در کاهش زمان آزمایش، [۱۵۱]

¹ Shimadzu



شکل ۴-۳ ابعاد دستگاه آزمون خستگی التراسونیک ، [۱۵۱]

این روش با توجه به وارد آمدن بار سیکلی و چرخه‌ای به بسیاری از سازه‌های حوزه تولید، انتقال و توزیع در هر سه حوزه کاربرد دارد.

- سازه‌های حوزه تولید: پره‌های توربین‌های بخار، پره‌های توربین بادی، بدنه سازه توربین بادی، بتن فونداسیون- های سازه‌های متصل به تجهیزات دوار و
- سازه‌های حوزه انتقال: تمامی المان‌های دکل‌های انتقال، کراس آرم‌های کامپوزیت
- سازه‌های حوزه انتقال: مصالح پایه‌های توزیع (فولاد، بتن، کامپوزیت)، کراس آرم‌های شبکه توزیع

✓ این آزمون مناسب محیط آزمایشگاه می‌باشد و بصورت صحرایی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

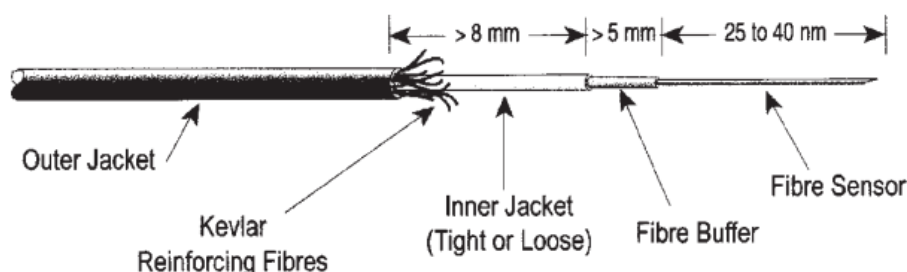
۴-۱-۲ بررسی اقتصادی فناوری:

با در نظر گرفتن دامنه کاربرد این فناوری در تخمین عمر سازه‌های حساس در حوزه تولید، انتقال و توزیع صنعت برق، و کمکی که این آزمون از هدر رفت پیش‌بینی نشده هزینه تعمیر و نگهداری سازه‌های صنعت برق خواهد داشت می‌توان نتیجه گرفت هزینه ابتدایی تهیه دستگاه (در حدود صد و سی هزار دلار) با توجه به امکان انجام تعداد آزمونی که در عمر مفید دستگاه امکان پذیر می‌باشد بسیار ناچیز خواهد بود. علاوه بر آن امکان انجام مطالعات گسترده بر روی مصالح مختلف کاربردی در صنعت برق را فراهم می‌آورد.

۲-۴ بررسی فنی و اقتصادی حسگر فیبر نوری در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

فیبر نوری به طور عمده در صنعت ارتباطات و مخابرات استفاده می‌شود و به طور قابل توجهی این صنعت را دستخوش تغییر قرار داده است. با این حال، از کاربردهای در حال رشد فیبرهای نوری، بکارگیری آنها در حسگر و حسگرهاست که برای سنجش و اندازه‌گیری استفاده می‌شوند، شکل ۴-۴. حسگرهای نوری در واقع تجهیزاتی هستند که استفاده از آنها در صنعت رواج دارد. این حسگرهای نوری بر مبنای ارسال و دریافت نور کار می‌کنند.

حسگر فیبر نوری، دستگاه مبتنی بر فیبر می‌باشد که برای تشخیص برخی از مقادیر مانند دما، فشار، ارتعاشات، جابجایی، چرخش و یا غلظت گونه‌های شیمیایی، کنترل سطح مخازن، تشخیص پارگی ورق، کنترل انحراف پارچه و کنترل تردد و ... به کار برده می‌شود. از ابزارهای دقیق و دستگاه‌های مخصوص مورد نیاز برای حسگر می‌توان به منبع نوری (اغلب لیزر تک فرکانس فیبر)، عنصر اصلی حسگر، آشکارساز نوری و دستگاه‌های پردازش پایانی اشاره کرد.



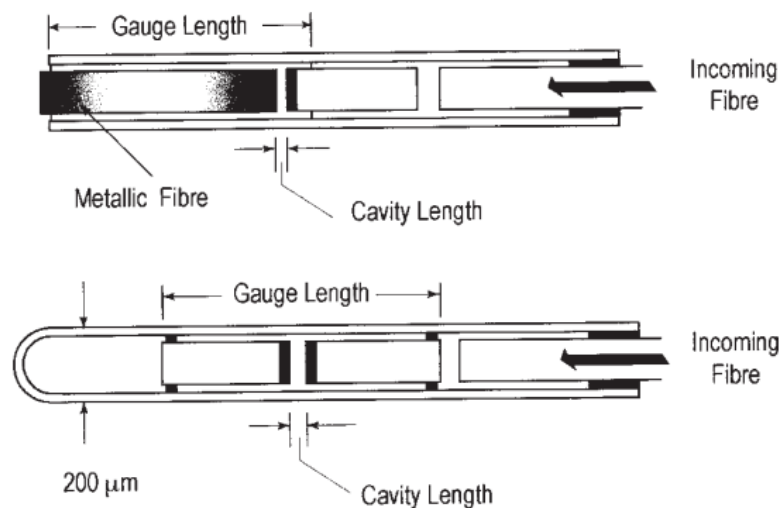
شکل ۴-۴ شکل عمومی یک فیبر نوری

حسگرهای فیبر نوری محض به تغییرات ناشی از محیط در نور به هنگام عبور آن از داخل فیبر نوری وابسته‌اند. در اغلب حسگرهای نوری محض، در پاسخ آنها به اثرهای بیرونی، یکی از دو اتفاق زیر رخ می‌دهد

۱- نور از هسته به پوسته نشت کرده و جذب می‌شود.

۲- نور مجبور به طی مسیری می‌شود، که با نوری که مسیر نوری دیگری را طی می‌کند متفاوت است. این مسئله سبب ایجاد اختلاف فاز در بین دو موج نوری می‌شود. این اختلاف فاز را می‌توان با استفاده از ترکیب دو موج نوری از طریق برهم‌نهی و مشاهده الگوی تداخلی آشکار کرد. با تغییر مشخصات در پاسخ به محرک‌های گوناگون، حسگرهای فیبر نوری حساسیت زیاد و گسترده دینامیکی وسیعی را فراهم می‌آورند.

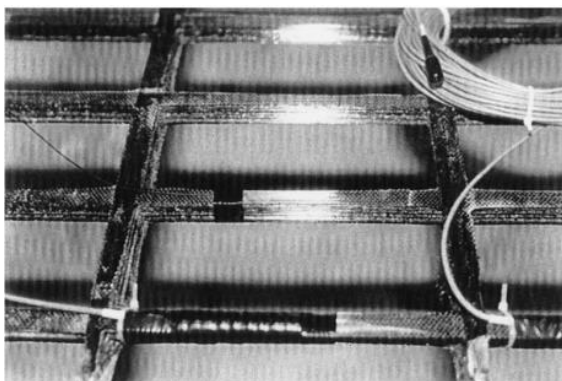
در مجموع حسگرهای فیبر نوری با استفاده از اختلاف فاز بین نور ورودی و خروجی قادر به اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی متفاوت می‌باشند. در شکل ۴-۵ دو ساختار از حسگر کرنش فیبر نوری تداخل سنج را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۵ دو ساختار از حسگرهای کرنش فیبر نوری تداخل سنج

۴-۲-۱ کاربردهای فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

حسگر فیبر نوری دامنه وسیعی از حسگرهای مختلف را پوشش می‌دهد، یکی از پرکاربردترین حسگرهای فیبر نوری در مهندسی سازه حسگر کرنش می‌باشد. استفاده این حسگر در مهندسی سازه از بکارگیری آن در پایش و تست بارگذاری پل‌ها، تا استفاده آن‌ها در آزمون خمش پره‌های توربین بادی را می‌توان نام برد. یکی از مزایای حسگرهای فیبر نوری بکارگیری آن بصورت دائم مدفون در بتن می‌باشد که میتواند بطور دقیق اطلاعات همان نقطه از عضو را نشان دهد، شکل ۴-۶.



شکل ۴-۶ نمونه ای از استفاده فیبر نوری بصورت مدفون در بتن

حسگر فیبر نوری دامنه وسیعی از مزایای فوق العاده را ارائه می دهد که به همین خاطر در بسیاری از زمینه‌ها به موفقیت فراوان رسیده است. مزایای آن به شرح زیر است:

✓ **ضد انفجار:** در حسگر فیبر نوری، سیگنال اولیه نور است. بنابراین، هیچ خطر جرقه برای فیبر وجود ندارد.

✓ **ایمنی نسبت به تداخل الکترومغناطیسی:** از آنجا که فیبرها از مواد عایق مانند شیشه تشکیل شده اند حسگر فیبر نوری به فرکانس رادیویی و الکترومغناطیسی حساسیتی ندارد.

✓ **اندازه کوچک، وزن سبک و انعطاف پذیر:** این قابلیت باعث گسترش کاربرد حسگر فیبر نوری در بسیاری از زمینه ها مانند صنعت هواپیمایی شده است.

✓ **حساسیت بالا:** حسگرهای فیبر نوری بسیار حساس هستند و دارای پهنای باند بزرگی می باشند. هنگامی که تعدادی از حسگرها با پهنای باند بالا مالتی پلکس می شوند دارای مزیت های فراوانی شده و نتایج و داده های حاصله را به خوبی انتقال می دهند.

✓ **سنجش از راه دور:** با تلفات کم فیبرهای نوری، سیگنال نوری را می توان در یک فاصله طولانی (1000m) منتقل کرد. بنابراین سنجش از راه دور با فیبر نوری امکان پذیر است.

✓ **تراکم و فشردگی:** با وجود قابلیت نیمه هادی در حسگرهای فیبر نوری (ابعاد کوچک آشکارسازها و منابع) می توان به راحتی سیستم حسگر فشرده نوری طراحی کرد.

✓ **استحکام و مقاومت در برابر محیط:** فیبر نوری از موادی نظیر پلاستیک یا شیشه ساخته شده است که زنگ زدگی با خود به همراه ندارد، بنابراین، فیبرها هنگامی که در مجاورت الکترولیت، اشعه های یونساز و غیره قرار می گیرند دارای ثبات بسیار عالی می باشند. به علاوه فیبرها می توانند تا دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس را تحمل کنند. در فیبرهای خاص این رقم تا ۱۲۰۰ درجه سلسیوس نیز افزایش می یابد.

با توجه به خصوصیات بیان شده حسگرهای نوری در هر سه حوزه تولید، انتقال و توزیع می تواند مورد استفاده قرار گیرند، استفاده از آن‌ها بسته به نوع کارکرد و عملکرد سازه و هدف از آزمون می تواند بصورت دائم و یا بصورت موقت صورت پذیرد، در زیر بخشی از سازه‌هایی که در سه حوزه تولید، انتقال و توزیع نیرو استفاده از حسگرهای نوری کرنش سنج در آن‌ها امکان پذیر می‌باشد بیان شده است.

- سازه های حوزه تولید: مخازن سوخت، بدنه سدها، فونداسیون تمامی سازه‌های تولید، دودکش‌ها، برج‌های خنک کننده (بتنی و فلزی)، برج‌های توربین بادی، پره‌های توربین بادی و بخار.
- سازه‌های حوزه انتقال: تمامی المان‌های دکل‌های انتقال، کراس آرم‌های کامپوزیت، فونداسیون سازه‌های انتقال، سازه‌های پست‌های برق
- سازه‌های حوزه انتقال: پایه‌های توزیع (فولاد، بتن، کامپوزیت)، کراس آرم‌های شبکه توزیع

✓ این آزمون مناسب محیط آزمایشگاه می‌باشد و بصورت صحرایی نیز به منظور پایش سازه‌ها یا آزمایش در محل امکان‌پذیر است.

۲-۲-۴ بررسی اقتصادی فناوری:

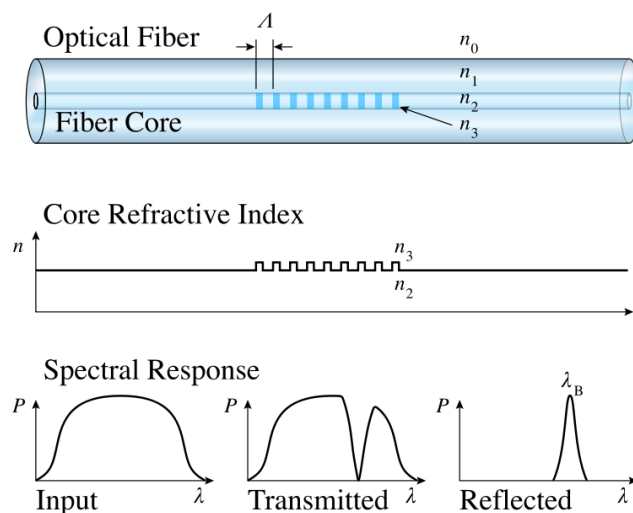
با توجه به فراوانی بالای سازه‌های صنعت برق که حسگرهای کرنش فیبر نوری در آن‌ها قابل استفاده است، و همچنین هزینه مناسب حسگرهای فیبر نوری مبدل‌های مورد نیاز آن در مقایسه با کرنش سنجهای متداول (بسته به مدل حسگر هزینه نسبی 50 تا 300 درصدی بیشتر از حسگرهای متداول، بطور مثال هزینه کرنش سنج‌های معمول در حدود 0.5 دلار تا 10 دلار می‌باشد، اما استفاده از قیمت کرنش‌سنج‌های فیبر نوری از 15 تا 30 دلار برحسب نوع و دامنه کاربرد متفاوت می‌باشد) می‌توان نتیجه گرفت از لحاظ اقتصادی استفاده از فناوری فیبر نوری با توجه به امکان استفاده از آن در شرایط خاص محیطی توجیه خواهد داشت.

۳-۴ بررسی فنی و اقتصادی حسگرهای توری براگ فیبری در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

همانطور که در گزارش مرحله اول توضیح داده شده حسگر توری براگ فیبری نوعی از حسگرهای فیبر نوری می‌باشد که با توجه به نوع ساخت و هدف آن قادر است دما، کرنش/ جابه جایی، شیب، شتاب، فشار، میدان مغناطیسی و دوران را اندازه‌گیری نماید.

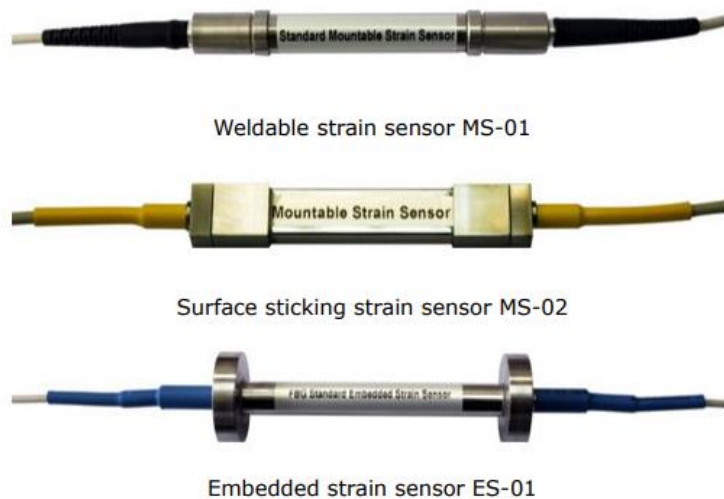
۱-۳-۴ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

علاوه بر کرنش، توری براگ به دما نیز حساس است. این حساست بدین معناست که توری براگ فیبری را به عنوان عنصر حساس در حسگرهای فیبر نوری می‌توان به کار برد. در حسگرهای فیبر نوری، نمونه مورد اندازه‌گیری باعث تغییر در طول موج براگ می‌شود. شکل 4-7 عملکرد کلی حسگر فیبر توری براگ را براساس نور بازتابی نمایش می‌دهد.



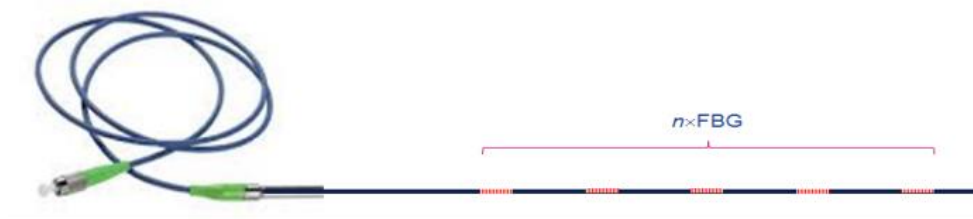
شکل ۴-۷ عملکرد حسگر فیبر توری براگ براساس نور بازتاب شده

توری‌های براگ فیبری را می‌توان مستقیماً به عنوان عنصر حساس در حسگرهای فیبری به کار برد. همچنین می‌توان از آن‌ها به عنوان عناصر مبدل، تبدیل خروجی حسگرهای دیگر، که تغییر دما و کرنش نمونه مورد اندازه‌گیری را تولید می‌کند، استفاده کرد. مثلاً حسگرهای گاز توری براگ فیبری از یک پوشش جاذب استفاده می‌کند، که در صورت وجود انبساط گاز کرنشی ایجاد می‌کند، که به وسیله توری قابل اندازه‌گیری است. از لحاظ فنی، مواد جاذب عناصر حساس هستند که میزان گاز را به کرنش تبدیل می‌کنند. سپس توری براگ کرنش را به تغییر طول موج تبدیل می‌کند. توری‌های براگ فیبری خصوصاً برای استفاده در کاربردهای تجهیزاتی مانند حسگرهای فشار و لرزه شناسی برای محیط‌های نامطلوب و به عنوان حسگرهای درون چاه در چاه‌های نفت و گاز برای اندازه‌گیری اثرات فشار بیرونی، دما، ارتعاشات لرزه‌شناسی و اندازه‌گیری شار خطی به کار می‌رود. این حسگرها مزیت‌های قابل ملاحظه‌ای بر وسایل رایج الکترونیکی که برای این کاربردها استفاده می‌شدند و حساسیت کمتری به ارتعاشات و گرما داشتند دارند. شکل ۴-۸ سه مدل از حسگر کرنش توری براگ فیبر نوری را نمایش می‌دهد نوع اول با قابلیت جوش‌پذیری جهت اتصال، نوع دوم از نوع تماسی که باید چسبانده شوند، نوع سوم بصورت مدفون در بتن یا هر ماده دیگر قابل استفاده می‌باشد، [۱۵۲].



شکل ۴-۸ سه مدل از حسگر کرنش توری براگ فیبری [۱۵۲]

نحوه قرارگیری حسگر کرنش FBG همانطور که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌گردد، می‌توان از چندین حسگر پی در پی در یک رشته فیبر نوری استفاده کرد.

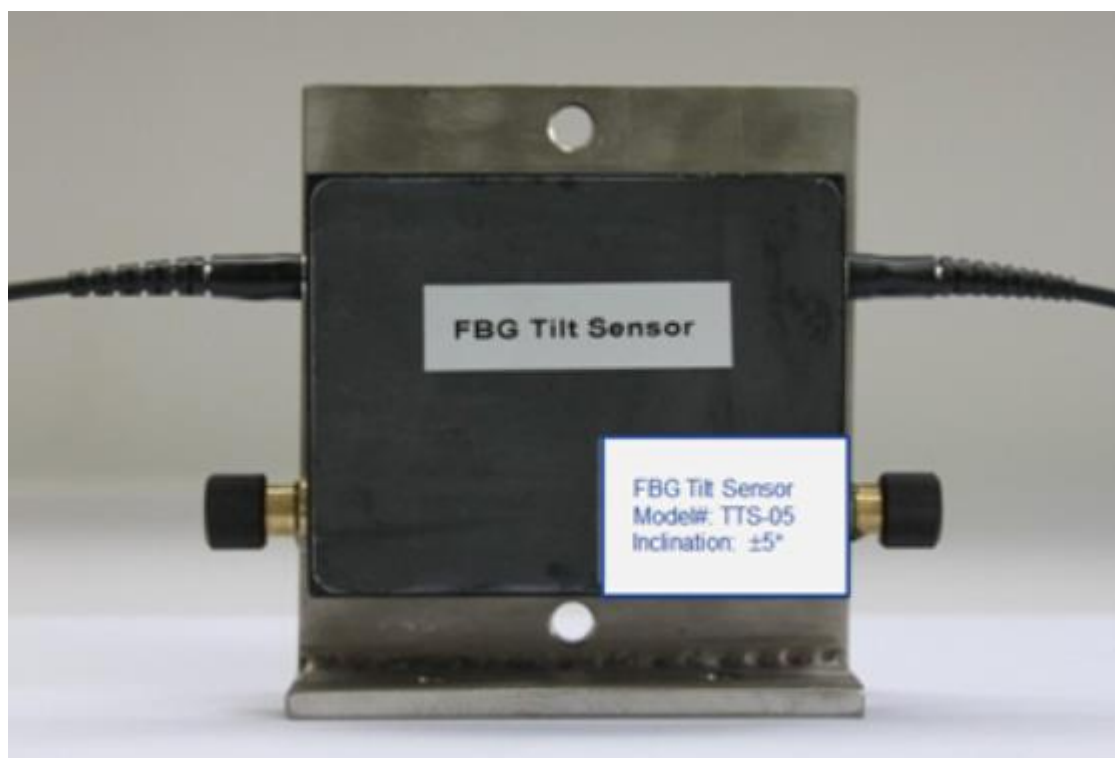


شکل ۴-۹ قرارگیری تعداد بالای حسگر کرنش FBG ، [۱۵۳]

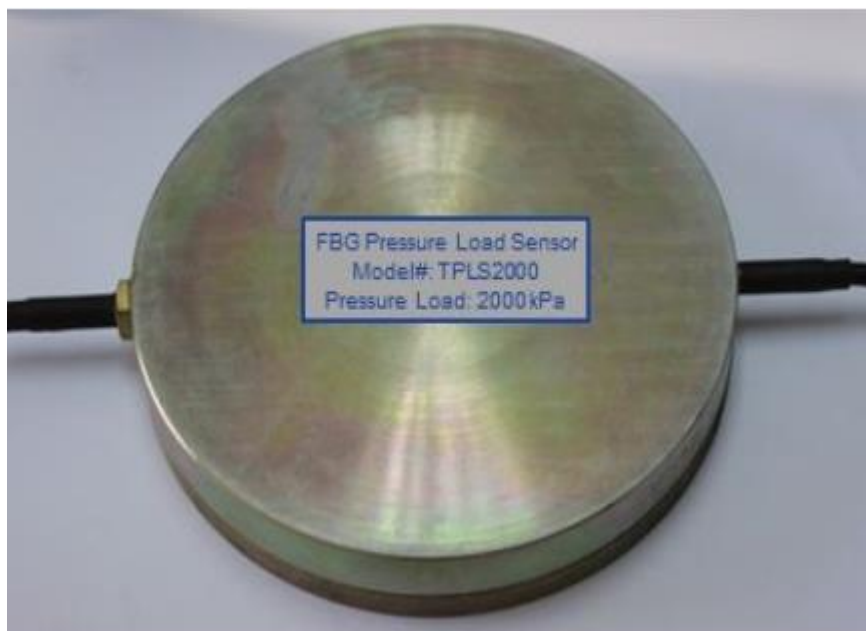
انواع دیگر حسگرهای ساخته شده از FBG ، که بصورت تجاری در حال حاضر در صنعت بکارگرفته می‌شوند حسگر شتاب FBG ، حسگر انحراف سنج FBG ، حسگر فشار FBG و حسگر اندازه‌گیری جابجایی با قابلیت حذف اثر دما می‌باشد که بیشترین کاربرد را در ارزیابی سازه‌های عمرانی دارند، شکل ۴-۱۰ الی شکل ۴-۱۳. هر یک از این حسگرها با توجه به هدف استفاده و دقت مورد نظر دارای مدل‌ها با مشخصات متناسب با کاربرد مورد نظر قابل تهیه می‌باشند.



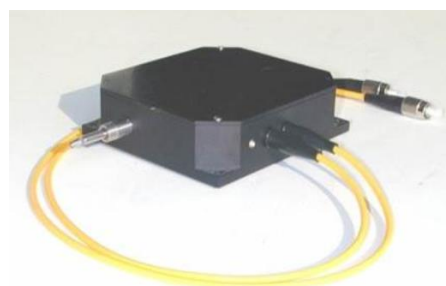
شکل ۴- 10 حسگر شتاب توری براگ فیبری، [۱۵۳]



شکل ۴- 11 حسگر انحراف سنج توری براگ فیبری، [۱۵۳]



شکل ۴- 12 حسگر فشار توری براگ فیبری، [۱۵۳]



شکل ۴- 13 چند نمونه از حسگر جابجایی سنج FBG، با قابلیت حذف اثر دما، [۱۵۳]

حسگر فیبر نوری *FBG* در حقیقت تمامی خصوصیات حسگرهای فیبر نوری را شامل می‌گردد و دامنه کاربرد آن‌ها در مهندسی سازه بسیار گسترده می‌باشد، مهمترین خصوصیتی که آن‌ها را از دیگر حسگرها متمایز می‌کند شامل: ضد انفجار (فاقد جرقه)، ایمنی نسبت به تداخل الکترومغناطیسی، اندازه کوچک، وزن سبک و انعطاف پذیر، حساسیت بالا، سنجش از راه دور، تراکم و فشردگی، استحکام و مقاومت در برابر شرایط بد محیطی.

تنوع حسگرهای *FBG* در حوزه مهندسی سازه سبب شده تا حسگرهای *FBG* در هر سه حوزه تولید، انتقال و توزیع قابلیت استفاده وسیعی داشته باشند، که کاربرد آن‌ها در حوزه‌های مختلف سازه‌های صنعت برق بصورت زیر می‌باشد:

- سازه‌های حوزه تولید: مخازن سوخت، بدنه سدها، فونداسیون تمامی سازه‌های تولید، دودکش‌ها، برج‌های خنک کننده (بتنی و فلزی)، برج‌های توربین بادی، پره‌های توربین بادی و بخار.
- سازه‌های حوزه انتقال: تمامی المان‌های دکل‌های انتقال، کراس آرم‌های کامپوزیت، فونداسیون سازه‌های انتقال، سازه‌های پست‌های برق
- سازه‌های حوزه انتقال: پایه‌های توزیع (فولاد، بتن، کامپوزیت)، کراس آرم‌های شبکه توزیع

✓ این آزمون مناسب محیط آزمایشگاه می‌باشد و بصورت صحرایی نیز به منظور پایش سازه‌ها یا آزمایش در محل امکان‌پذیر است.

۲-۳-۴ بررسی اقتصادی فناوری:

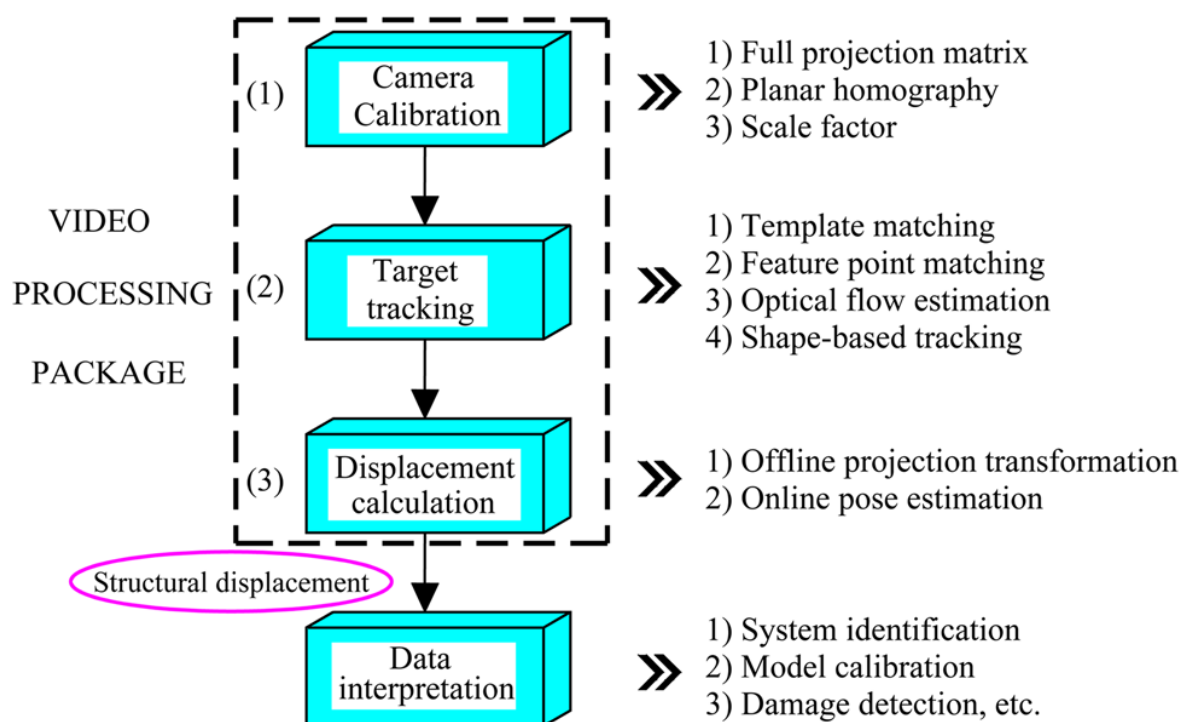
هزینه تولید حسگرهای توری براگ فیبری مشابه حسگرهای فیبر نوری می‌باشد، (بسته به مدل حسگر هزینه نسبی ۲۰ تا ۳۰۰ درصدی حسگرهایی که با تکنولوژی‌های معمول می‌باشند را در بر دارد، بطور مثال هزینه یک شتاب سنج سه جهته که توانایی ثبت ارتعاشات محیطی را در یک سازه داشته باشد در حدود ۷ تا ۱۰ هزار دلار می‌باشد، این در حالی است که برای شتاب سنج متناظر از نوع *FBG* هزینه‌ای در حدود ۹ تا ۱۵ هزار دلار بر اساس دقت آن باید انتظار داشت)، بر همین اساس با توجه به امکان استفاده از حسگرهای فوق در شرایط خاص محیطی و سهولت نصب استفاده از آن‌ها می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۴-۴ بررسی فنی و اقتصادی سنجش جابه‌جایی سازه مبنی بر دید در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

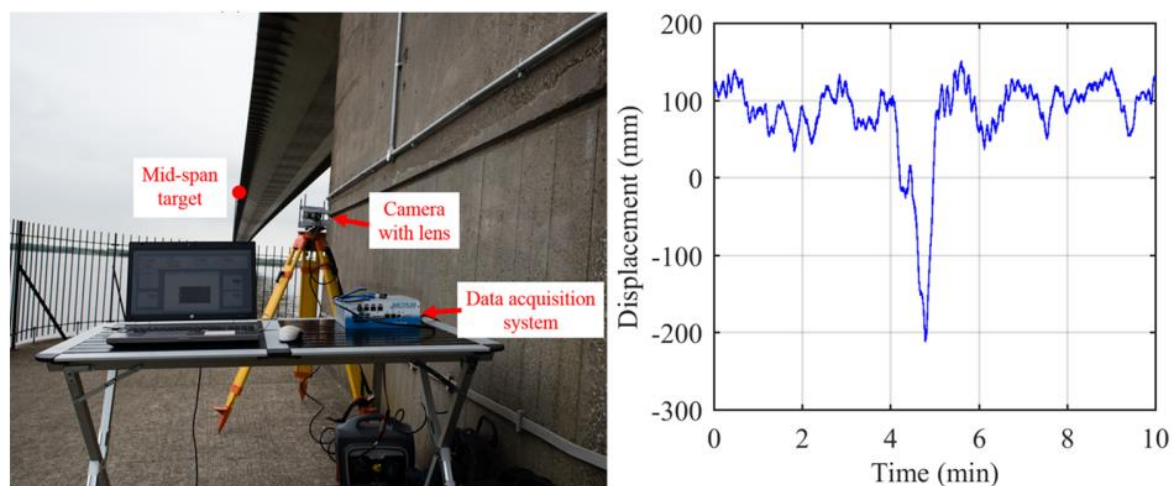
یکی از مشکلاتی که همواره در سنجش جابجایی سازه‌های عمرانی بوسیله تجهیزات متداول نظیر *LVDT* وجود دارد نیاز به یک نقطه مبنا می‌باشد تا جابجایی نسبت به آن نقطه سنجیده شود، و این امر مستلزم فراهم آوردن تکیه‌گاهی برای *LVDT* می‌باشد که بعنوان نقطه مبنا در نظر گرفته می‌شود، البته در هنگام بارگذاری در اکثر مواقع تکیه‌گاه نیز دچار تغییر مکان‌هایی می‌گردد که سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌ها می‌گردد. و یا اندازه‌گیری‌های که توسط دوربین‌های نقشه‌برداری برای سنجش جابجایی انجام می‌پذیرد همواره به خطای شخص وابسته بوده و از سویی برای اندازه‌گیری‌ها با فرکانس مشخص اصلاً مناسب نمی‌باشد تنها برای اندازه‌گیری جابجایی‌ها در بارگذاری استاتیکی می‌تواند استفاده گردد.

به همین سبب اندازه‌گیری جابجایی با استفاده از روش‌های غیر تماسی بسیار مورد توجه اهداف آزمایشگاهی قرار گرفته است. روش سنجش جابجایی سازه براساس دید یکی از روش‌هایی است که با استفاده از دوربین فیلم برداری و روش‌های پردازش تصویر توانسته است به راحتی مشکل‌های اندازه‌گیری جابجایی را در ارزیابی سازه‌ها حل نماید.

در این روش با قراردادی یک تصویر از قبل کالیبره شده بر روی سازه از تصویر در هنگام انجام آزمون فیلم برداری می‌گردد، و بصورت آنلاین ماتریس نمایش هر فریم محاسبه می‌گردد و با ماتریس کالیبره شده ابتدایی مقایسه می‌شود با توجه به اختلافهایی که بین دو ماتریس ایجاد شده توسط یک الگوریتم پردازش تصویر جابجایی آن نقطه از سازه بدست می‌آید، شکل ۴-۱۴ الگوریتم کلی این روش را نمایش می‌دهد. شکل ۴-۱۵ به کارگیری دوربین را برای اندازه‌گیری ۱۰ دقیقه‌ای جابجایی بر روی پل هامبر را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱۴ الگوریتم روش اندازه‌گیری جابجایی براساس تصویر



شکل ۴-۱۵ کاربرد عملی روش اندازه‌گیری جابجایی بر روی یک پل، [۱۵۴]

برای این روش با توجه به میزان دقت مد نظر و الگوریتم مورد استفاده دوربین و لنز باید مشخصات متناسب با هدف مدنظر را داشته باشند به طور مثال برای یک جهت یک بررسی آزمایشگاهی مشخصات تجهیزات برای انجام آزمون بصورت جدول ۴-۱ می‌باشد، [۱۵۵].

جدول ۴-۱ مشخصات تجهیزات برای اندازه‌گیری جابجایی در یک آزمون آزمایشگاهی، [۱۵۵]

Component	Model	Technical Specifications
Video camera	 Point Grey/FL3-U3-13Y3M-C	Maximum resolution: 1280 × 1024 Frame rate: 150 FPS Chroma: Mono Sensor type: CMOS Pixel size: 4.8 μm Lens mount: C-mount Interface: USB3.0
Optical lens	 Kowa/LMVZ990 IR	Focal length: 9 to 90 mm Maximum Aperture: F1.8 Mount: C-mount
Laptop computer	 Sony /PCG-41216L	Intel(R) Core(TM) i7-2620M CPU @ 2.70 GHz 8192 RAM 250 HDD 14.1" Screen
Tripod and Accessories	Tripod, USB3.0 type-A to micro-B cable, etc.	

۴-۴-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:
با توجه به مشکلات اندازه‌گیری جابجایی با استفاده از LVDT و دوربین‌های نقشه‌برداری، استفاده از روش اندازه‌گیری جابجایی برپایه مشاهده بسیار می‌تواند مورد استقبال واقع گردد.

مشکلات اندازه‌گیری جابجایی به روش‌های رایج در ارزیابی سازه‌ها صنعت برق بخصوص در آزمون نوعی برج‌های انتقال نیروی که با استفاده از دوربین تئودولیت و خط کش انجام می‌گردد و همواره با خطای نسبی بالایی همراه است اهمیت این روش غیر تماسی را افزایش می‌دهد.

از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ حذف نقطه مبنا (تکیه‌گاه) و حذف خطای مربوط به آن
- ✓ امکان برداشت جابجایی با فرکانس مناسب (متناسب با تعداد فریم‌های برداشت تصور در هر دقیقه)
- ✓ محدود نبودن آن به فاصله
- ✓ سرعت برپایی مناسب روش

این روش در ارزیابی تمامی سازه‌های صنعت برق که نیاز به اندازه‌گیری جابجایی باشد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

- ✓ این آزمون مناسب محیط آزمایشگاه می‌باشد و بصورت صحرائی نیز به منظور پایش سازه‌ها یا آزمایش در محل امکان‌پذیر است.

۴-۴-۲ بررسی اقتصادی فناوری:

در این روش اندازه‌گیری تنها با داشتن دو تجهیز اصلی لنز و دوربین با مشخصات معین می‌توان به این فناوری دست یافت که از نظر هزینه تجهیزات تقریباً با اختلاف کمتر از ۱۰ درصد هزینه تهیه دوربین تئودولیت و یا *LVDT* میتوان تجهیزات این روش را تهیه نمود، از طرفی تعداد بالای آزمون‌هایی که در آن‌ها اندازه‌گیری جابجایی باید انجام پذیرد سبب می‌گردد تا استفاده از این روش مقرون به صرفه باشد.

۴-۵ بررسی فنی و اقتصادی ارتعاش سنج داپلر لیزری در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

همانطور که در گزارش مرحله اول توضیح داده شد، *LDV* به عنوان یک حسگر بدون نیاز به تماس استفاده می‌شود و روی یک سطح صلب نزدیک هدف قرار داده می‌شود. برای کسب داده از یک *LDV* در مقایسه با سایر روش‌های مذکور به پردازش کمتری نیاز است و می‌توان از آن برای اندازه‌گیری زمان-واقعی جابجایی بهره برد. *LDV* بنابر اصل اثرات داپلر کار می‌کند که این اثرات شامل انتقال در فرکانس بین امواج فرستاده شده و بازتاب شده از یک هدف متحرک است که وابسته به سرعت و راستای حرکت هدف است، شکل ۴-۱۶.



شکل ۴- ۱۶ ارتعاش سنج داپلر

۴-۵-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

ارتعاش سنج داپلر ثبت تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و یا جابجایی سازه‌های عمرانی را ساده می‌سازد. این ارتعاش سنج بصورت غیر تماسی و بصورت اتوماتیک از فاصله دور می‌تواند در لحظه ارتعاش ایجاد شده بر روی سازه را ثبت نماید. همچنین با کمک فیلترهای فرکانسی مناسب تنها ارتعاشاتی که در محدوده ارتعاش سازه می‌باشد را ثبت می‌نماید و باقی سیگنال‌هایی که بصورت اغتشاش در داده‌ها ثبت می‌گردند را حذف می‌نماید. استفاده از این فناوری هم در محیط آزمایشگاه و هم برای آزمایشهای میدانی بسیار مناسب می‌باشد.

از جمله مزایای این ارتعاش سنج:

- ✓ غیر تماسی بودن ارتعاش سنج
- ✓ عدم اضافه شدن وزن ارتعاش سنج به نمونه مورد آزمایش
- ✓ امکان ثبت ارتعاش نقاطی از سازه که دسترسی به آن غیر ممکن باشد
- ✓ حذف سیگنال‌های مزاحم از داده‌های ثبت شده توسط ارتعاش سنج
- ✓ مناسب بودن برای آزمایش‌های میدانی

در سازه‌های هر سه حوزه تولید، انتقال و توزیع نیرو از ارتعاش سنج داپلر می‌توان استفاده نمود، گستره کاربرد آن برای تست‌های دینامیکی، و پایش سلامت سازه و بررسی محدوده ارتعاش سازه می‌باشد.

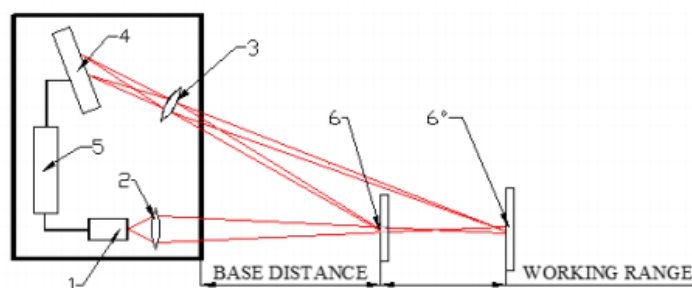
- سازه‌های حوزه تولید: ثبت ارتعاش برج توربین‌های بادی، برج‌های خنک کننده، مخازن سوخت، ثبت ارتعاش سازه‌هایی که تجهیزات دوار بر روی آن‌ها نصب شده، و آزمون‌های مطالعاتی برای سازه‌های حوزه تولید
- سازه‌های حوزه انتقال: ثبت ارتعاش برج‌های انتقال، سازه‌های پست برق، و تست‌های آزمایشگاهی و مطالعاتی مربوط به این حوزه نظیر آزمون کراس آرم‌ها
- سازه‌های حوزه توزیع: آزمون‌های آزمایشگاهی مربوط به کراس آرم‌ها، و آزمون‌های مطالعاتی در خصوص سازه‌های حوزه توزیع.

۴-۵-۲ بررسی اقتصادی فناوری:

دامنه قیمتی حسگرهای ارتعاش سنج با توجه میزان دقت آن‌ها در ثبت اطلاعات بصورت ثبت ارتعاشات محیطی و یا ارتعاشاتی که با عاملی نظیر یک عملگر به سازه وارد می‌گردد بسیار متفاوت می‌باشد. حسگرهایی که توانایی ثبت ارتعاشات محیطی را دارند براساس دقت ثبت اطلاعات گاهی به پنج برابر یک ارتعاش سنج معمولی می‌رسد، (هزینه ارتعاش سنج داپلر براساس دقت در حدود 8 تا 25 هزار دلار می‌باشد)، که در هر دو مورد ارتعاش سنج داپلر معادل هزینه بالاتری را در بر خواهد داشت.

۴-۶ بررسی فنی و اقتصادی حسگر جابجایی سنج لیزری در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

همانطور که در گزارش مرحله اول توضیح داده شد، یکی از فناوری‌های مورد استفاده در سنجش جابجایی‌های سازه استفاده از تکنولوژی لیزر می‌باشد، در این فناوری حسگر از قانون مثلث نور استفاده می‌کند و براساس این قانون جابجایی جسم هدف اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۴-17 نور لیزر از طریق منبع (شماره ۱) ساطع می‌گردد، نور ساطع شده توسط لنز (شماره ۲) متمرکز و بر روی جسم هدف (شماره ۶) نشانه می‌رود، انعکاس نور لیزر از روی جسم هدف به لنز بازگشت (شماره ۳) می‌رسد، و بر روی صفحه (شماره ۴) نور لیزر متمرکز شده ثبت می‌گردد، در صورت حرکت جسم نور ثبت شده روی این صفحه در مکان متفاوتی خواهد بود، در نهایت پردازشگر (شماره ۵) جابجایی جسم را محاسبه می‌نماید. نمونه تجاری جابجایی سنج لیزری در شکل ۴-18 نشان داده شده است. این نوع جابجایی سنج توانایی اندازه‌گیری جابجایی از ۲ میلیمتر تا ۲.۵ متر را در مدل‌های مختلف را دارد.



شکل ۴-17 ساختار حسگر جابجایی سنج لیزری



شکل ۴- ۱۸ حسگر جابجایی سنج لیزری

۴-۶-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

کاربرد این فناوری با توجه به دامنه وسیع سنجش آن برای آزمون‌های نوعی سازه‌های صنعت برق در هر سه حوزه تولید، انتقال و توزیع مناسب می‌باشد. از مزایای این روش به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- ✓ غیر تماسی بودن روش
- ✓ دقت بالای روش
- ✓ فرکانس داده برداری بالا به دلیل اینکه از لیزر استفاده می‌کند فرکانس داده برداری کاملاً وابسته به پردازش‌گر می‌باشد.
- ✓ امکان استفاده در آزمون‌های میدانی

– یکی از مشکلات این روش عدم امکان استفاده از آن در مقابل یک منبع نور قوی می‌باشد.

بخشی از سازه‌های صنعت برق که می‌توان در آن‌ها با استفاده از این فناوری جابجایی آن‌ها را ثبت کرد به شرح زیر می‌باشد:

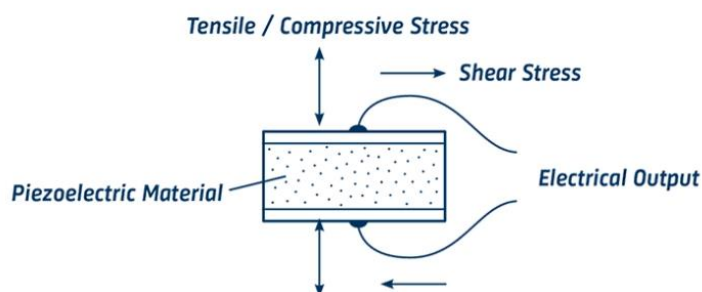
- **سازه‌های حوزه تولید:** برج توربین‌های بادی، برج‌های خنک کننده، مخازن سوخت، دودکش‌هایی خنک کننده
- **سازه‌های حوزه انتقال:** برج‌های انتقال، سازه‌های پست برق، و تست‌های آزمایشگاهی و مطالعاتی مربوط به این حوزه نظیر آزمون کراس آرم‌ها، بخصوص آزمون نوعی برج‌های انتقال
- **سازه‌های حوزه توزیع:** آزمون‌های آزمایشگاهی مربوط به کراس آرم‌ها، و آزمون‌های مطالعاتی در خصوص سازه‌های حوزه توزیع.

۴-۶-۲ بررسی اقتصادی فناوری:

با توجه به فراوانی استفاده از این فناوری در صنعت برق و هزینه مناسب آن در مقایسه با دوربین‌های نقشه برداری (هزینه برابر با ۲ تا ۴ هزار دلار) و تجهیزات اندازه‌گیری جابجایی می‌توان از این فناوری به عنوان یک روش مناسب از لحاظ هزینه در ارزیابی سازه‌های صنعت برق استفاده کرد.

۴-۷ بررسی فنی و اقتصادی حسگرهای پیزوالکتریک در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

حسگرهای پیزوالکتریک، با استفاده از قانون مواد پیزوالکتریک قادر است نیرو، جابجایی و یا کرنش وارده را به ولتاژ تبدیل کند سپس با استفاده یک مبدل می‌توان ولتاژ را به مشخصه ورودی تبدیل نمود، شکل ۴-۱۹، ماده پیزوالکتریک در حال حاضر با توجه به این ویژگی آن‌ها بطور گسترده‌ای در صنعت تولید حسگر استفاده می‌گردد و حسگرهای مختلفی توسط این خصوصیت در حال تولید می‌باشد. حسگرهای سلول نیرو، فشار، کرنش، شتاب از جمله مهمترین حسگرهایی می‌باشند که با استفاده از ماده پیزوالکتریک تولید می‌گردند. در شکل ۴-۲۰ الی شکل ۴-۲۴ حسگرهای مختلفی از این فناوری مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۹ ساختار کلی حسگرهای پیزوالکتریک



شکل ۴-۲۰ حسگرهای شتاب پیزوالکتریک برند کیستلر^۱

^۱ KISTLER



شکل ۴- 21 حسگرهای کرنش پیزوالکتریک برند کیستلر^۱

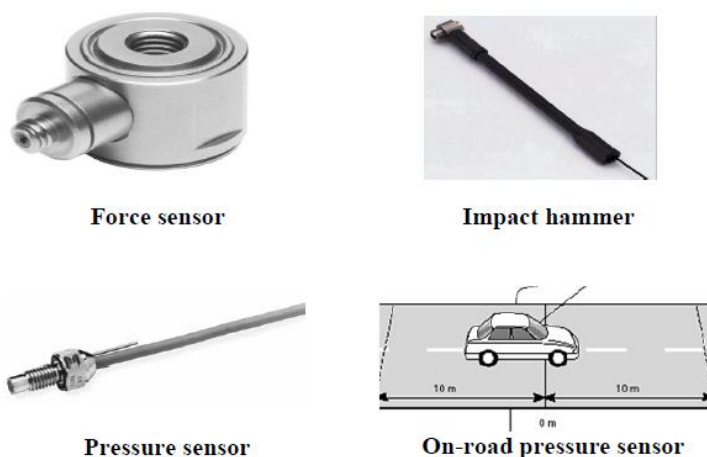


شکل ۴- 22 حسگرهای سلول بار نیروی برشی پیزوالکتریک برند کیستلر



شکل ۴- 23 حسگرهای سلول بار نیروی پیزوالکتریک برند کیستلر

¹ KISTLER



شکل ۴- 24 حسگرهای مختلف پیزوالکتریک

۴-۷-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

در حال حاضر به دلیل گستره حسگرهایی که از پیزوالکتریک تولید می‌گردند و همچنین دقت و فرکانس برداشت اطلاعات این فناوری سبب شده تا بسیار در ارزیابی و پایش سلامت سازه‌های مختلف مورد استقبال واقع گردند، کاربرد این فناوری بارها توسط حسگرهای با فناوری قدیمی‌تر مورد صحت سنجی واقع شده، بطور مثال در شکل ۴-25 نمونه‌ای از بررسی حسگر کرنش پیزو الکتریک و حسگرهای معمول به تصویر کشیده شده است، دقت این فناوری و همچنین عدم نیاز به منبع انرژی سبب برتری آن نسبت به حسگرهای با فناوری قدیمی‌تر شده است.

با توجه به حسگرهای مختلف تولید شده این فناوری تمامی سازه‌های سه حوزه‌های صنعت برق به جهت ارزیابی به نوعی به این فناوری وابسته خواهند بود.

استفاده از سلول‌های نیرو در آزمایشگاه‌ها به جهت کنترل نیروی وارده یکی از مهمترین کاربردهای پیزوالکتریک در آزمایشگاه‌ها می‌باشد.

چکش کالیبره شده جهت اندازه‌گیری مقاومت بتن، و همچنین چکش ضربه جهت وارد آوردن ضربه معلوم به نمونه تحت آزمون دینامیکی می‌باشد.

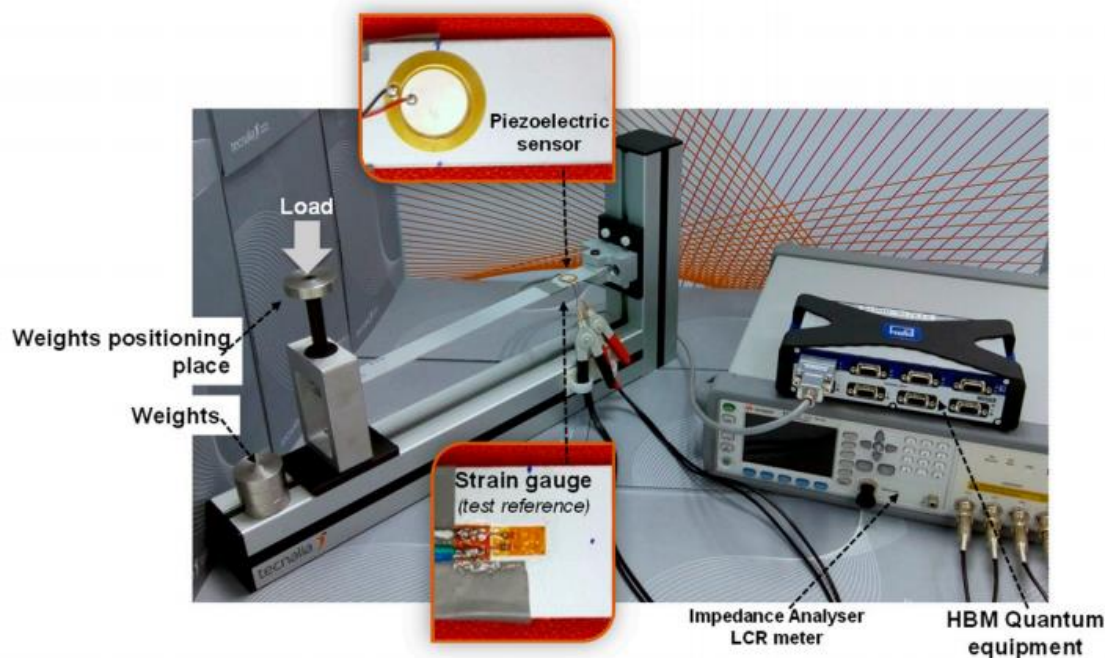
استفاده از حسگرهای شتاب و کرنش در سازه‌های حوزه‌های مختلف صنعت برق به شرح زیر می‌باشد:

سازه‌های حوزه تولید: جهت مطالعه، پایش رفتار و ارزیابی برجهای توربین بادی، برج‌های خنک کننده، دودکش-ها، کرنش پره‌های توربین بادی، ثبت ارتعاش روی بدنه فونداسیون سازه‌های دارای تجهیزات دوار

سازه‌های حوزه انتقال: جهت مطالعه، پایش رفتار و ارزیابی برجهای انتقال، سازه‌های ترانسفوماتورهای قدرت، ترانس‌های جریان، کراس آرم‌ها بصورت مجزا، مقره‌ها و ...

سازه‌های حوزه توزیع: جهت مطالعه، پایش رفتار و ارزیابی پایه‌های توزیع، کراس آرم‌ها بصورت مجزا، مقره‌ها و

...



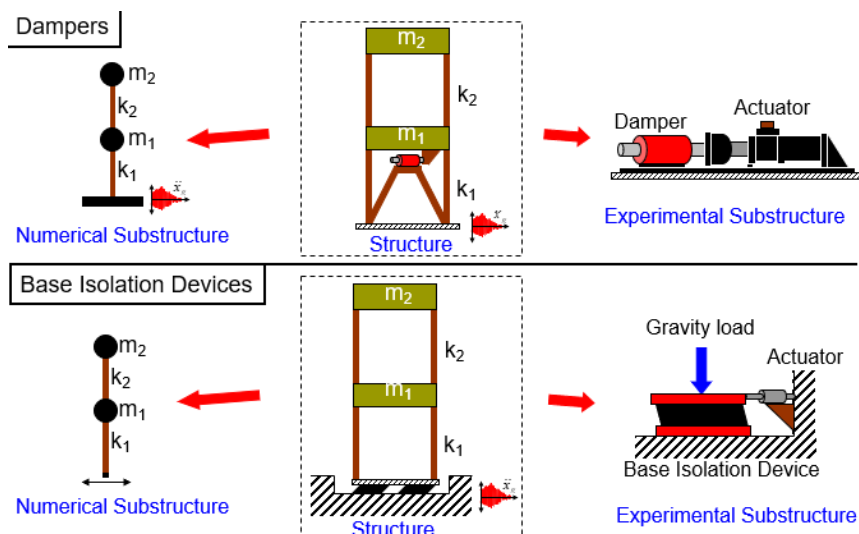
شکل ۴-۲۵ استفاده از حسگر کرنش پیزوالکتریک جهت اندازه‌گیری کرنش تیر طره، [۱۵۶]

۴-۷-۲ بررسی اقتصادی فناوری:

فناوری پیزوالکتریک نسبت به فناوری‌های قدیمی ارزان‌تر می‌باشد، و براساس نوع حسگر از ۱۰ تا ۴۰ درصد هزینه کمتری نسبت به حسگرهای مشابه با فناوری قدیمی‌تر در بر دارد، و با توجه به گستره حسگرهایی که به این روش تولید می‌گردند و همچنین امکان تهیه حسگر متناسب با هر هدف (با دقت و رزولوشن مناسب آن هدف)، و فراوانی استفاده از آن‌ها می‌توان نتیجه گرفت که از نظر اقتصادی مقرون بصرفه می‌باشند، لازم به ذکر است در حال حاضر فناوری بیشتر حسگرهای شتاب موجود با استفاده از خاصیت پیزوالکتریک می‌باشد و فناوریهای قدیمی جرم و فنرهای کالیبره شده در کنار مدارهای مبدل تقریباً منسوخ شده است.

۸-۴ بررسی فنی و اقتصادی شبیه‌سازی ترکیبی در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

هزینه بالای آزمون تمام مقیاس، و مشکلات مدل سازی و تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی بخصوص در مدل سازی اتصالات که در واقعیت رفتاری کاملاً متفاوت با مدل سازی و تحلیل‌های انجام شده از خود نشان می‌دهند مهمترین مواردی است که سبب شده تا محققین جهت حل این مسائل آزمایش ترکیبی سازه‌ها را بخصوص در مورد سازه‌های بزرگ مقیاس ارائه دهند. در این روش بخشی از سازه که رفتار آن ناشناخته می‌باشد در آزمایشگاه ساخته شده و بخش دیگر سازه در نرم افزار مدل سازی می‌گردد و سپس با تحلیل سازه در نرم افزار نیروهای اندر کنش توسط عملگرهایی با فرکانس متناسب با سرعت تحلیل در حال انجام به نمونه آزمایشگاهی وارد می‌گردد، و به همین صورت بازخورد نمونه توسط سنسورهایی و سخت افزارهای مشخصی به نرم افزار برای ادامه تحلیل در هر گام زمانی ارسال می‌گردد، شکل ۴-۲۶. به این روش رفتار ناشناخته نمونه در کنار سازه شناسایی می‌گردد، این روش این امکان را فراهم می‌آورد که رفتار نمونه آزمایشگاهی را در کنار کل سازه بدون نیاز به آزمون تمام مقیاس شناسایی کنیم.



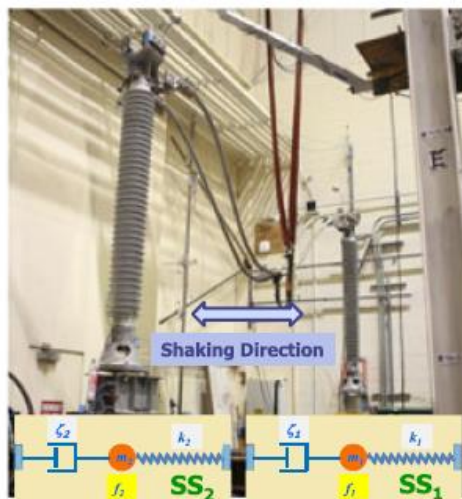
شکل ۴-۲۶ مفهوم کلی شبیه‌سازی ترکیبی آزمایشگاهی-عددی

۸-۴-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

تمامی تلاش‌هایی که تاکنون در خصوص این روش انجام شده است بصورت موردی و مطالعاتی بوده و هیچ مستندی مبنی بر استفاده گسترده و تجاری این روش به منظور ارزیابی یک سازه خاص صورت نپذیرفته است، و تعداد آزمایشگاه‌هایی که توانسته‌اند این فناوری را برای گسترش فعالیت‌های خود توسعه دهند اندک می‌باشند، از سویی مزایای استفاده از این فناوری و دامنه پوشش دهی آن برای ارزیابی سازه‌های مختلف بسیار گسترده است که شامل موارد زیر می‌گردد:

- ✓ امکان استفاده از امکانات چندین آزمایشگاه و نرم افزار بصورت آنلاین
- ✓ عدم نیاز به ساخت یک سازه بزرگ مقیاس و کاهش هزینه‌های آزمون

- ✓ تشخیص رفتار واقعی اجزای سازه در مقایسه با رفتار آن‌ها در مدل سازی و تحلیل نرم افزاری به تنهایی
 - ✓ سرعت بخشیدن به مدت زمان کلی آزمون به دلیل حذف ساخت و برپایی المان‌هایی که در نرم افزار مدل سازی می‌گردند
 - ✓ توانمند بودن روش در ارزیابی عملکرد سازه‌های بزرگ مقیاس و پیچیده
- نمونه‌ای از آزمون ترکیبی آزمایشگاهی-عددی بر روی دو اینزولاتور که توسط کابل هادی در پست برق به هم متصلند با مدل سازی پایه‌های نگهدارنده مقره‌ها در نرم‌افزار و برپایی دو مقره بر روی دو میز لرزه و کابل واسط آن‌ها در آزمایشگاه به منظور بررسی رفتار واقعی زیر سازه برپا شده در آزمایشگاه در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است.



(a) Hybrid model



(b) Experimental substructure

شکل ۴-۲۷ نمونه‌ای از آزمون ترکیبی آزمایشگاهی-عددی بر روی دو اینزولاتور که توسط کابل هادی در پست برق به هم متصلند، [۱۵۷]

با توجه به خصوصیات روش و انعطاف پذیر بودن و گستردگی استفاده از آن برای سازه‌های مختلف، بکارگیری این روش در سازه‌های صنعت برق با تعیین زیر سازه آزمایشگاهی و زیر سازه نرم افزاری برای هر سه حوزه تولید، انتقال و توزیع نیرو امکان پذیر به شرح زیر امکان پذیر خواهد بود:

سازه‌های حوزه تولید: جهت ارزیابی رفتار برج‌های توربین بادی، برج‌های خنک کننده، دودکش‌ها، کرنش پره‌های توربین بادی، ثبت ارتعاش روی بدنه فونداسیون سازه‌های دارای تجهیزات دوار

سازه‌های حوزه انتقال: جهت ارزیابی رفتار برج‌های انتقال، سازه‌های ترانسفورماتورهای قدرت، ترانس‌های جریان، کراس آرم‌ها بصورت مجزا، مقره‌ها و ...

سازه‌های حوزه توزیع: جهت ارزیابی رفتار پایه‌های توزیع، کراس آرم‌ها بصورت مجزا و به همراه پایه‌های توزیع، مقره‌ها و ...

۴-۸-۲ بررسی اقتصادی فناوری:

هزینه تهیه چنین آزمایشگاهی با توجه به اینکه شامل بخش‌های متفاوتی نظیر عملگرهای با فرکانس پاسخ مناسب، حسگرها، دیتا لاگر و شبکه انتقال داده و سیستم کنترل عملگر می‌تواند دامنه بسیار گسترده‌ای داشته باشد، لذا هزینه این آزمایشگاه بر اساس هدفی که برای آن در نظر گرفته شده است تعیین می‌گردد. از سویی فناوری شبیه سازی ترکیبی روشی قدرتمند در ارزیابی عملکرد سازه‌ها می‌باشد، چنانچه رویه استفاده آن بصورت دستورالعمل برای سازه مختلف صنعت برق در دستور کار قرار گیرد هزینه تجهیز این آزمایشگاه به راحتی با صرفه جویی در هزینه ساخت سازه‌های تمام مقیاس تامین می‌گردد.

۴-۹-۱ بررسی فنی و اقتصادی آزمون خزش در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

همانطور که در گزارش مرحله اول بیان شد، خزش زمانی اتفاق می‌افتد که ابعاد یک ماده جامد در فرآیند آهسته تحت بار ثابت تغییر کند. در واقع تنش‌های طولانی مدت کمتر از مقاومت تسلیم مواد سبب تغییر شکل مواد با بارگذاری استاتیکی طی زمان می‌شوند. به علاوه، اعمال بار استاتیکی بیشتر و مدت زمان طولانی‌تر باعث می‌شود مواد تغییر شکل بیشتری داشته باشند و متعاقباً منجر به خرابی سازه شود.

۴-۹-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

از لحاظ کاربرد فنی و اهمیت آزمون خزش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- محدودیت جابجایی (تغییر شکل) در عمل: در بسیاری از سازه‌ها و یا ماشین‌ها اندازه‌ها باید دقیق باشد و کمترین خطا و تغییر شکل در آن‌ها رخ دهد، یکی از مهمترین مثال‌های آن شفت توربین بادی می‌باشد.
- محدودیت گسیختگی در عمل: در این کاربرد عملاً گسیختگی اتفاق نمی‌افتد اما ابعادی وجود دارد که با عبور از آن‌ها رفتار آن سیستم به مانند گسیختگی خواهد بود.
- محدودیت رهاشدگی تنش در عمل: در بیشتر اوقات در المان‌های تحت کشش اتفاق می‌افتد و با گذشت زمان این رهاشدگی بیشتر می‌گردد، یکی از مهمترین مثال‌های آن رهاشدگی تنش در بولت‌ها و کابل‌های تحت کشش می‌باشد.

در خصوص آزمون خزش استانداردهای مختلفی براساس نوع مواد و شرایط بارگذاری وجود دارد که بخش از آن‌ها شامل استانداردهای ذیل می‌باشند:

- روش آزمایش خزش برای مواد فلزی تحت بار کشش با استاندارد *BS EN 10291*
- روش آزمایش خزش برای مواد فلزی تحت برش با استاندارد *BS 3500*
- انجام آزمون خزش تحت بار برش تحت استاندارد *ASTM E139* [۱۵۸]
- روش انجام آزمون خزش برای شناسایی رفتار خزش مواد پلاستیکی *BS EN ISO 899*

- ضریب تخمین خزش شیشه، پلاستیک مسلح شده تحت دما، در شرایط خشک *BS EN 761*
 - ضریب تخمین خزش شیشه، پلاستیک مسلح شده تحت دما، در شرایط خشک *BS EN 1225*
- آزمون خزش بصورت استاندارد معمولاً در یک بارگذاری ۱۰۰۰۰ ساعت بر روی نمونه انجام می‌گردد، [۱۵۸، ۱۵۹]



شکل ۴- ۲۸ دستگاه آزمایش خزش بلند مدت مطابق با استاندارد ASTM E139، [۱۵۸]



شکل ۴- 29 دستگاه آزمایش خزش بلند مدت ، [۱۵۹]

در مدل‌ها پیشرفته دستگاه آزمون خزش مانند شکل ۴- 28 و شکل ۴- 29 امکان اعمال نیرو از صفر تا نیروی ایده‌آل وجود دارد، همچنین امکان تنظیم دما جهت انجام آزمایش شتاب یافته در این نوع از دستگاه‌ها وجود دارد، این دستگاه تقریباً تمام آزمون‌های خزش را شامل می‌گردد، از مزایای این دستگاه میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ تست خستگی خزش نیرو- کرنش کنترل شده
- ✓ تست خستگی با بار جایگزین
- ✓ مدل سازی کرنش (ارائه منحنی خزش برای بارهای متفاوت)
- ✓ تردشوندگی خزش
- ✓ آزمون خزش با کرنش سرعت پایین
- ✓ تست افزایش ترک تحت بار استاتیکی و چرخه‌ای/ یا باز شدن ترک
- ✓ تست افزایش نیرو پیوسته با دمای کنترل شده
- ✓ تست رهاشدگی

- ✓ تست خزش تا گسیختگی
- ✓ تست خزش کلاسیک
- ✓ آزمون‌های کوتاه مدت خزش تحت بار کششی، خمشی، فشاری

درخصوص گسترده‌ی استفاده از این آزمون تقریباً در همه سازه‌های صنعت برق با توجه به عملکرد آن‌ها باید مورد ارزیابی واقع گردند، که در هر یک از حوزه‌ها به شرح زیر می‌باشد:

سازه‌های حوزه تولید: در مصالح دودکش‌ها، برج‌های خنک کننده، فونداسیون توربین‌های بخار، فونداسیون توربین‌های بادی، برج توربین‌های بادی، محور دوار توربین بادی، همه پیچ‌های مورد استفاده در این سازه‌ها (به‌خصوص پیچ‌های اتصالات اصطکاکی) و سازه‌های کابلی

سازه‌های حوزه انتقال: بررسی خزش کراس‌آرم‌های کامپوزیت، خزش پیچ‌های انواع اتصالات، کابل‌های دکل‌های موقت، خزش در سازه‌های پست‌های برق، انواع یراق‌آلات مورد استفاده در خطوط انتقال و

سازه‌های حوزه توزیع: خزش در انواع پایه‌های توزیع، کراس‌آرم‌های پایه‌های توزیع و مقره‌ها، انواع یراق‌آلات مورد استفاده در خطوط انتقال و.....

۴-۹-۲ بررسی اقتصادی فناوری:

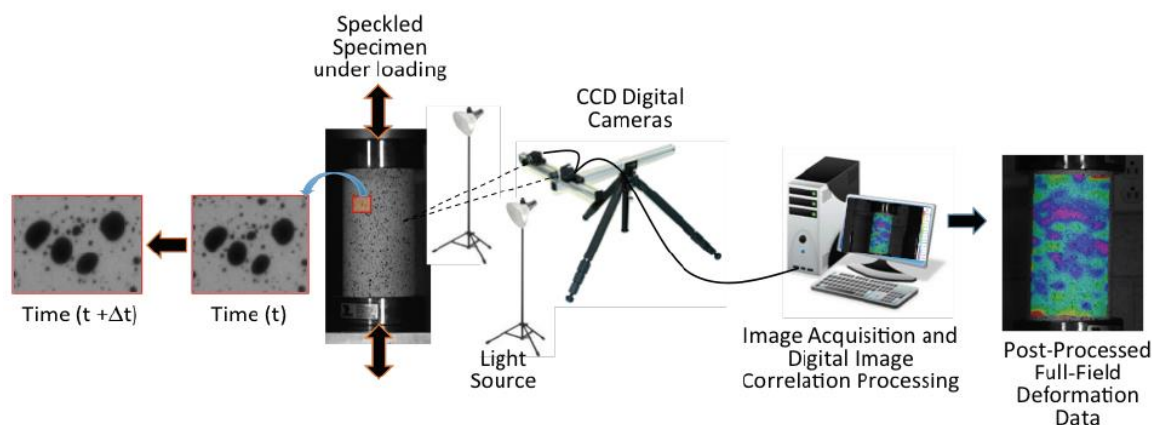
هزینه تهیه چنین دستگاهی بین ۱۲۰ تا ۱۵۰ هزار دلار بر حسب ویژگی‌های دستگاه متفاوت است، از نظر اقتصادی با توجه به فراوانی تعداد آزمون‌ها خزش برای سازه‌های مختلف صنعت برق که باید در دستور کار قرار گیرد و همچنین هزینه دستگاه آزمون، تهیه یک دستگاه استاندارد می‌تواند با دوره بازگشت سرمایه ۵ ساله توجیه اقتصادی داشته باشد.

۴-۱۰ بررسی فنی و اقتصادی استفاده از تصویر دیجیتال همبسته^۱ برای سنجش میدان کرنش و تنش

یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر توجه محققین را به خود جلب کرده استفاده از فناوری پردازش تصویر در ارزیابی سازه‌ها می‌باشد. در این روش با استفاده از دوربین‌های با لنز مناسب و تعداد فرم‌های بالا، از نقطه مشخصی از سازه فیلم برداری می‌گردد، معمولاً در آن نقطه از سازه بسته به روش پردازش تصویر صفحه‌ای با سطح خاصی می‌چسبانند، سپس الگوریتم پردازش تصویر در هر لحظه تصویر برداشت شده را آنالیز می‌کند و تغییرات ایجاد شده

¹ Digital Image Correlation (DIC)

در تصویر را که به دلیل بارهای وارد به سازه می‌باشد، تبدیل به میدان تنش و کرنش می‌کند، [۱۶۰]. شکل ۳۰-۴ روند کلی عملکرد فناوری *DIC* را در تعیین میدان کرنش نمایش می‌دهد.

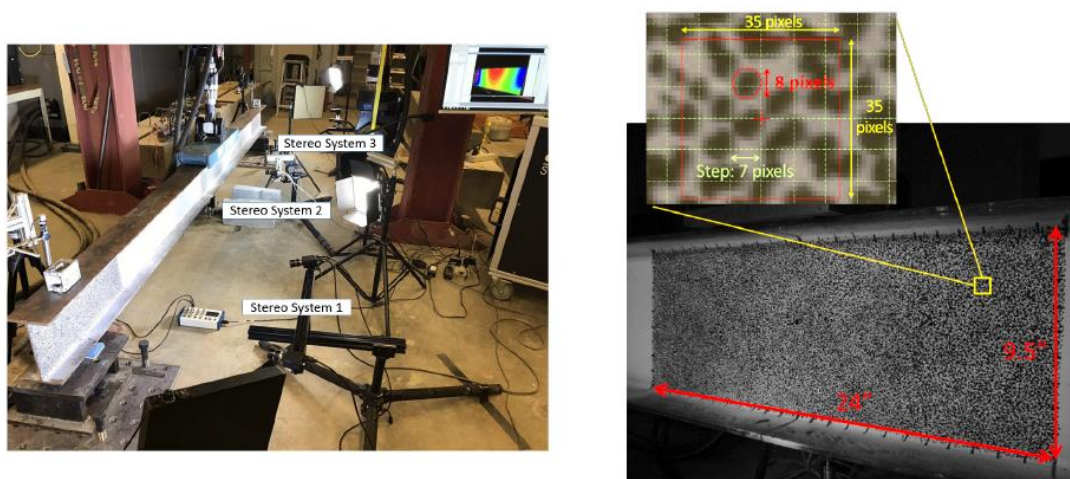


شکل ۳۰-۴ شمای کلی عملکرد فناوری *DIC* در تعیین میدان کرنش [۱۶۰].

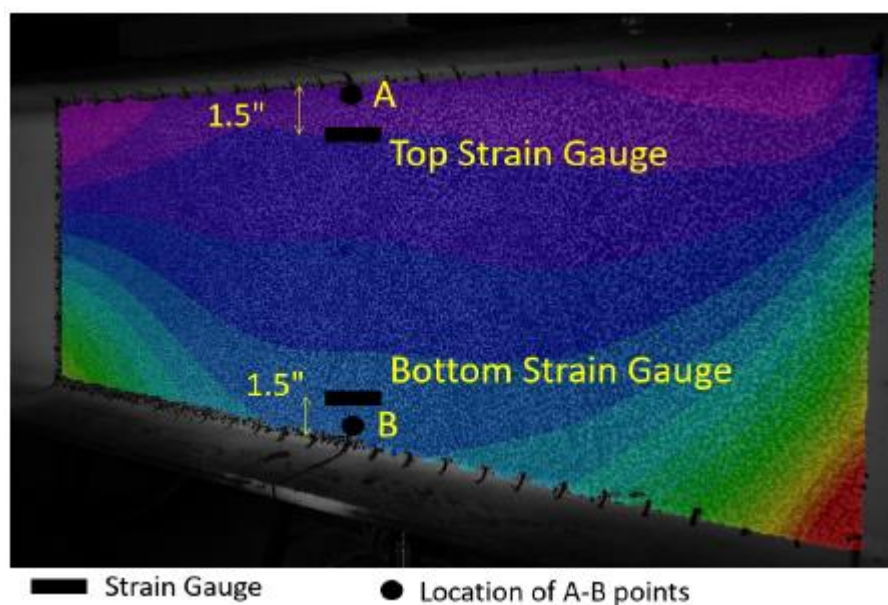
۱-۱۰-۴ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

همانطور که مشخص است این روش در پایش سلامت سازه و در مطالعات آزمایشگاهی انواع سازه‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، در این روش به آسانی با قراردادن برچسب‌هایی بر روی ناحیه مورد نظر سازه و فیلم‌برداری از ناحیه مورد نظر با نور ثابت، می‌توان تاثیر بارگذاری انجام شده بر سازه را در آن ناحیه از سازه بصورت میدان‌ها تنش و کرنش مشاهده کرد. مهمترین نکته ای که باید در این روش در نظر داشت تامین نور یکنواخت و ثابت در هنگام آزمون می‌باشد. از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ محاسبه میدان کرنش در هر لحظه
 - ✓ امکان بکارگیری آن برای سازه‌های بزرگ مقیاس
 - ✓ وابسته به یک نقطه ثابت نبودن خروجی‌ها
 - ✓ برخلاف سنسورهای کرنش یک بار مصرف نمی‌باشد
- نمونه‌ای از استفاده از *DIC* بر روی یک تیر دو سر مفصل به منظور تشخیص میدان کرنش در ناحیه ابتدایی تیر، در شکل ۳۱-۴ و شکل ۳۲-۴ نمایش داده شده است.



شکل 31-4 نمونه آزمون خمش ساده بر روی تیر I شکل و برداشت کرنش بخشی از تیر که روی تکیه‌گاه می‌باشد، [۱۶۰].



شکل 32-4 تشخیص میدان تنش در ناحیه مشخص شده از تیر، [۱۶۰].

همانطور که مشخص است این روش در حال گسترش و پیشرفت می‌باشد و در حال حاضر محققین در تلاشند تا اثر نور غیر یکنواخت را در برداشت‌هایی که انجام می‌دهند حذف کنند و در اصطلاح این روش را نسبت به نورهای غیر یکنواخت مقاوم سازند.

کاربرد این روش برای تمامی مطالعات آزمایشگاهی بر روی سازه‌های مختلف صنعت برق امکان‌پذیر است با کامل شدن روش می‌توان از آن برای مطالعات و آزمایش‌های میدانی استفاده کرد.

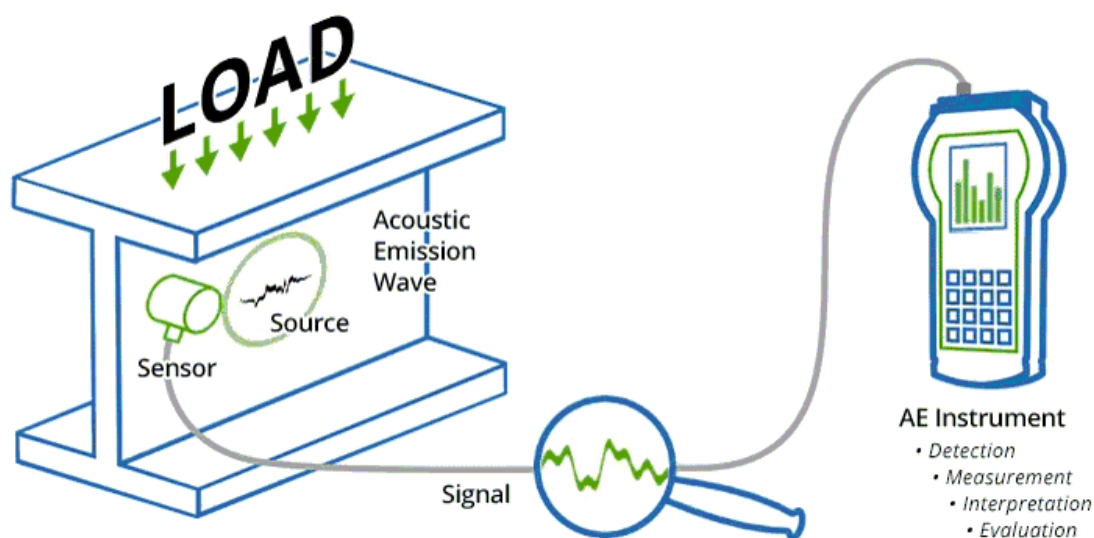
۲-۱۰-۴ بررسی اقتصادی فناوری:

از لحاظ اقتصادی این روش به یک منبع نور و دوربین احتیاج داشته که با توجه به الگوریتم مورد استفاده محیطی که از این روش استفاده خواهد شد و دقت مد نظر هزینه تجهیزات لازم را می‌توان تعیین نمود، و از آنجایی که برای برداشت میدان کرنش/ تنش مستقیم‌ترین روش می‌باشد در پایش سامت سازه‌ها و ارزیابی عملکرد آن‌ها بسیار مقرون به صرفه می‌باشد.

۱۱-۴ بررسی فنی و اقتصادی استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک جهت ارزیابی عملکرد سازه

آزمون نشر امواج صوتی^۱ گونه ای از آزمون های غیرمخرب می‌باشد که به منظور بررسی شکل گیری و رشد نواقص (هم چون ترک ها و...) درون قطعه، به صورت دینامیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. منظور از نشر صوت، تولید امواج الاستیکی (مکانیکی) ناشی از تغییر ناگهانی تنش درون ماده است. زمانی که ماده در معرض محرک خارجی (تغییرات فشار، نیرو یا دما) قرار بگیرد، منابع متمرکز انرژی در ماده شروع به آزاد سازی امواج الاستیکی می‌کنند و این امواج تا سطح قطعه انتشار می‌یابند و به وسیله حسگر ها ثبت و بررسی می‌شوند، شکل ۴-۳۳. نشر صوت مربوط به تولید امواج الاستیکی همزمان با آزاد یا رها شدن سریع انرژی کرنشی در ماده می‌باشد. با استفاده از تجهیزات مناسب می‌توان حرکاتی در بازه پیکومتر را نیز بررسی کرد. امواج صوتی تولید شده در روش AE در کنترل کیفیت، بررسی سلامت سازه، کنترل فرآیند و... حائز اهمیت می‌باشند. از این تست در پروژه های تحقیقاتی (آزمایش کشش، آزمایش مکانیک شکست و ...) و پروژه‌های صنعتی (بازرسی جوش، بررسی ترک ها در پل ها و...) استفاده می‌شود.

¹ Acoustic Emission (AE)



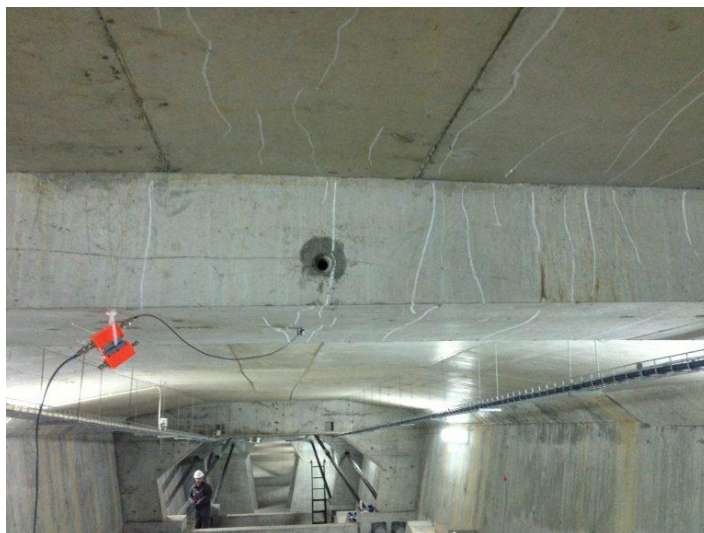
شکل ۴-۳۳ عملکرد کلی حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک، [۱۶۱]

۴-۱۱-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

همانطور که بیان شد این روش برای بازرسی سلامت سازه‌ها بسیار کاربردی می‌باشد، بخصوص در مورد سازه‌های نیروگاهی در بخش تولید، و سازه‌های خطوط انتقال که برای حفظ قابلیت اطمینان آن‌ها نیاز به بازرسی دوره‌ای دارند، روش انتشار امواج صوتی به راحتی برای سازه‌های در حال سرویس می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد این موضوع اهمیت این روش را مشخص می‌کند چرا که سرویس بدون وقفه سازه‌های صنعت برق سبب کاهش هزینه‌هایی نظیر راه اندازی مجدد، هزینه مدت زمان خاموشی و ... می‌گردد. استفاده موفق از *AE* در سازه‌های صنعت برق در نقاط مختلف جهان ثابت کرده این روش می‌تواند سبب بهبود ایمنی حین سرویس گردد، همچنین سبب کاهش هزینه‌های نگهداری و مدت زمان خاموشی گردد.

از مزایای استفاده از روش *AE* می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ شناخت ترک‌های فعال در بتن، و هر نوع نقصی در سازه‌ها، شکل ۴-۳۴
- ✓ پایش خوردگی‌های الکترو-شیمیایی و دیگر خوردگی‌ها در آرماتورها و کابل‌ها، شکل ۴-۳۵
- ✓ ارزیابی سازه‌ها یا المان‌های آن‌ها تحت بار سرویس
- ✓ پایش تغییرات طولانی مدت در سلامت سازه
- ✓ ارزیابی سرویس پذیری سازه تحت شرایط بار گذاری خاص
- ✓ پایش بینی خرابی
- ✓ خصوصیات مکانیکال و مکانیک شکست اعضای بتنی در سازه



شکل 34-4 استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک بر روی بخش داخلی بتن پل صندوقه‌ای، [۲۰]



شکل 35-4 استفاده از حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک بر روی کابل‌های پست‌نیدگی، [۲۰]

کاربرد این روش در سازه‌های صنعت برق در حوزه‌های مختلف به صورت زیر می‌باشد:

- **سازه‌های حوزه تولید:** بازرسی لوله‌های بخار، دیگ بخار، دستگاه جداساز هوا، توربین‌ها، لوله‌های گاز، مخازن تحت فشار، مخازن و لوله‌های انتقال سوخت، بتن مسلح و سازه‌های فولادی و فونداسیون‌ها
- **سازه‌های حوزه انتقال:** بازرسی جوش دکل‌های تلسکوپی، فونداسیون برج‌های انتقال، فونداسیون سازه‌های پست، بازرسی برج‌های بتنی پس از آزمون‌های نمونه‌ای
- **سازه‌ها حوزه توزیع:** بازرسی پایه‌های فلزی و بتنی پس انجام آزمون‌های نمونه‌ای

کاربرد این روش برای تمامی مطالعات میدانی بر روی سازه‌های مختلف صنعت برق امکان‌پذیر است.

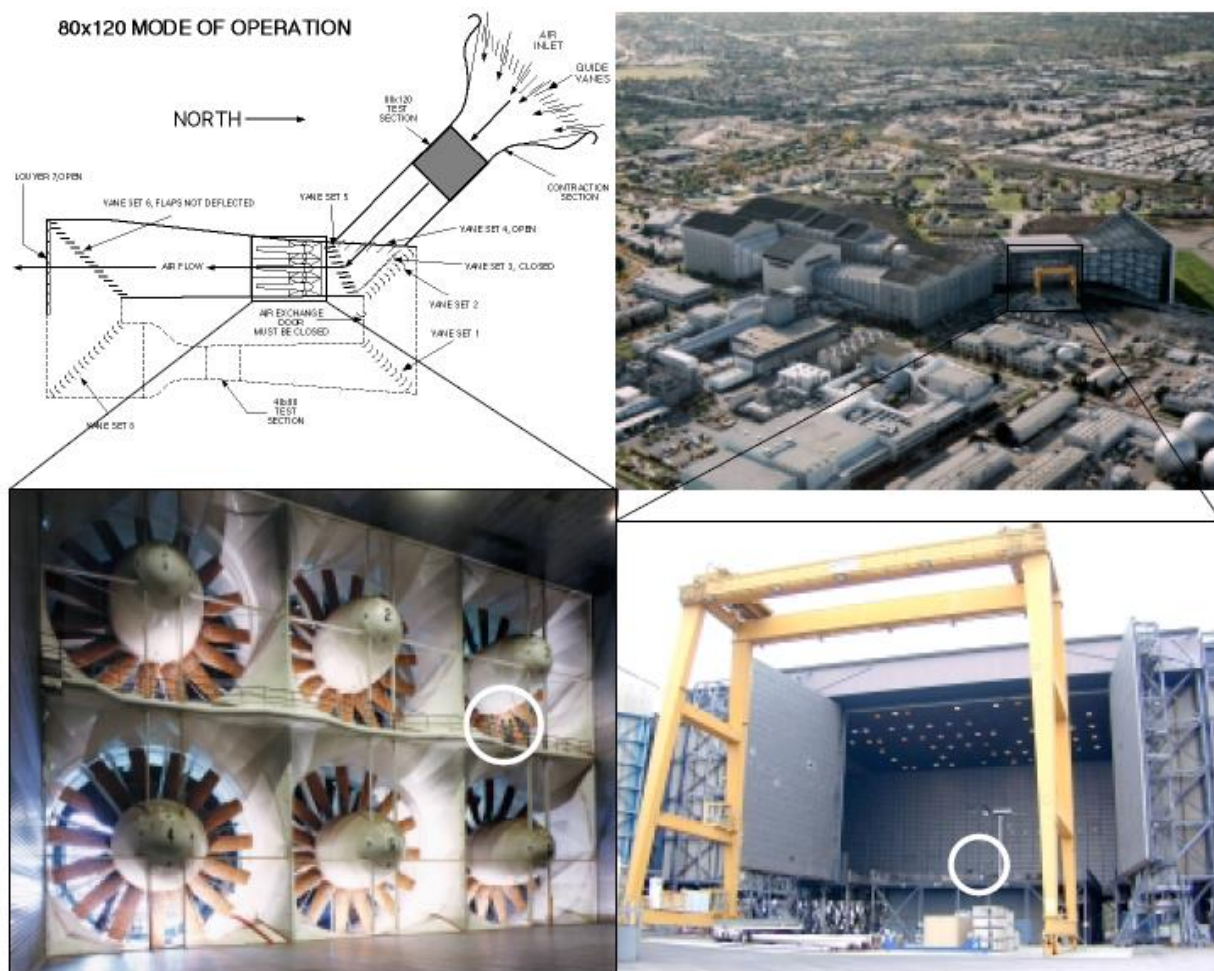
۲-۱۱-۴ بررسی اقتصادی فناوری:

هزینه حداقل تجهیزات لازم برای انجام این آزمون در حدود ۷ هزار دلار می‌باشد، با توجه به گستردگی و فراوانی استفاده از این آزمون در سازه‌های صنعت برق چه در سطح مطالعاتی و چه در سطح تجاری و با در نظر گرفتن هزینه حسگرها و دستگاه انتشار آکوستیک انجام این آزمون مقرون به صرفه خواهد بود و بازگشت سرمایه کمتر از دو سال در این فناوری مشاهده می‌گردد. البته باید در نظر داشت استفاده از این تکنولوژی با چه هدفی می‌باشد، شناسایی ویژگی‌ای بصورت محلی در یک عضو و یا بررسی یک سازه بصورت یک پارچه، تعیین هدف فوق به شدت در هزینه تجهیزات تاثیرگذار خواهد بود، ممکن است نیاز به حسگرهای انتشار آکوستیک زیادی باشد و تعداد کانال‌های دریافت اطلاعات متناظرا افزایش یابد که این قضیه به شدت بر قیمت نهایی تجهیزات تاثیر خواهد گذاشت.

۱۲-۴ بررسی فنی و اقتصادی آزمون تونل باد

هدف از ساخت تونل باد بررسی تاثیر اثر بارگذاری باد بر روی سازه‌ها، وسایل نقلیه و تجهیزات و وسایل هوانوردی می‌باشد. در خصوص آزمون‌های سازه‌های عمرانی در تونل باد می‌توان به دو مورد اصلی اشاره کرد آزمون تونل باد بر روی برج‌های مقیاس شده و آزمون تونل باد بر روی اجزای و یا سازه کلی توربین بادی.

که البته با توجه به ابعاد سازه‌های عمرانی و همچنین ابعاد تونل باد در اکثر موارد مدل‌های مقیاس شده در این تونل‌ها مورد آزمون واقع می‌گردد، تنها تونل باد که برخی از توربین‌های بادی را با ابعاد محدود می‌تواند مورد آزمون قرار دهد تونل باد ناسا می‌باشد، شکل ۴-۳۶.



شکل ۴-۳۶ مرکز تحقیقاتی ناسا، مجموعه انجام آزمون‌های آیرودینامیکی تمام مقیاس

۴-۱۲-۱ کاربرد فناوری، بررسی اهمیت فنی روش و میزان گستردگی استفاده از فناوری:

با توجه به رفتار ناشناخته توربین‌های بادی در مواجهه با بارگذاری باد که در مدل سازی‌ها قابل دست یابی نمی‌باشد، اهمیت انجام آزمون تونل باد برای این نوع از سازه‌های صنعت برق دیده می‌شود، تا به قابلیت اطمینان بالاتری در طراحی این سازه‌ها بتوان دست یافت. آزمون‌ها بر اساس اندازه توربین بادی یا بصورت تمام مقیاس، و یا بصورت مقیاس شده و گاهی بر روی اجزای توربین بادی مانند پره‌ها انجام می‌گردد.

۴-۱۲-۲ بررسی اقتصادی فناوری:

هزینه بسیار بالای تجهیز تونل باد در قیاس با تعداد آزمون‌هایی که در این آزمایشگاه مورد بررسی قرار خواهد گرفت، سبب می‌گردد این نوع از آزمون‌ها برای توربین‌های بادی فراتر از حدود اقتصادی گردد، انجام این آزمون‌ها در صورتی مقرون بصرفه خواهد بود که امکان انجام آزمون بصورت مقیاس شده در تونل باد آزمایشگاه‌های هوا و فضا وجود داشته باشد و یا تونل باد برای مدل‌ها مقیاس شده ساخته شود تا از لحاظ اقتصادی قابل سرمایه‌گذاری باشد.

فصل پنجم

اولویت‌بندی فناوری‌های نوین در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق

مقدمه فصل پنجم:

در این فصل با توجه به ارزیابی‌های انجام شده درخصوص فناوری‌های نوین آزمایشگاهی در فصل اول به اولویت‌بندی آن‌ها براساس شاخصه‌های معرفی شده برای هر فناوری پرداخته شده است، هدف اصلی این فصل تعیین فناوری‌هایی است که بیشترین کاربرد را در ارزیابی سازه‌های مختلف صنعت برق از لحاظ فنی و اقتصادی خواهد داشت. لذا شاخص‌های ارزیابی براساس ویژگی‌های فنی، کاربردی و اجرایی بودن و اقتصادی ارائه می‌گردد.

۱-۵ اولویت‌بندی فناوری‌های نوین آزمایشگاهی بر اساس شاخصه‌های فنی، کاربردی-اجرایی و اقتصادی

اهمیت و کاربرد هر یک از فناوری‌های بیان شده در بندهای بخش قبل توضیح داده شد، در این بخش به اولویت‌بندی فناوری‌های معرفی شده در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق پرداخته می‌گردد. برای این منظور و مقایسه فناوری‌های فوق شاخصه‌هایی فنی، کاربردی-اجرایی و اقتصادی هر یک از فناوری‌ها براساس وزندهی به هر شاخص و امتیاز دهی به فناوری مربوط در آن شاخص اولویت‌بندی انجام می‌گردد. بر همین اساس مجموع کل وزن‌ها برای سه شاخص اصلی فنی، کاربردی-اجرایی و اقتصادی از مقادیر یک به ترتیب ۰.۴۰، ۰.۳۵ و ۰.۲۵ در نظر گرفته شد.

هر یک از شاخصه‌های کلی فوق به تعدادی زیر شاخه تقسیم می‌گردد، که هر یک از آن‌ها براساس اهمیت در آن شاخصه اصلی بخشی از وزن‌های فوق را شامل می‌گردند.

در این جدول ۱-۵ زیر شاخصه‌ها فنی معرفی گردیدند و وزن هر شاخصه براساس اهمیت آن شاخصه تعیین گردیده است. همانطور که مشخص است شاخصه دقت و صحت توانایی فناوری را در انجام دقیق آزمون یا سنجش نشان می‌دهد. امکان داده برداری پیوسته در بسیاری از آزمون‌ها لازم است روند تغییرات بصورت پیوسته ثبت گردد. شاخصه فرکانس داده برداری با توجه به توانایی فناوری در ثبت داده با رزولوشن مختلف را نشان می‌دهد. در شرایط محیطی خاص (دمای بالا مانند آزمون آتش) امکان داده برداری و آزمون برای بسیاری از فناوری‌ها محیا نمی‌باشد لذا شاخصه مقاومت در برابر شرایط محیطی مطرح گردید. بسیاری از آزمون‌ها در کنار مواد قابل اشتعال می‌باشد صورت پذیرد لذا شاخصه ایمنی در محیط‌های حساس بیان گردید. اغتشاش در هنگام ثبت داده‌ها مسئله ایست که سبب ایجاد اطلاعات نادرست می‌گردد به همین جهت شاخصه فیلتر کردن اغتشاش داده مطرح گردید.

جدول ۵-۱ شاخصه‌های فنی و وزن هر یک از شاخصه‌های فنی

ردیف	شاخص های فنی	وزن هر شاخصه از وزن کل فنی
۱	صحت و دقت	۰.۰۹
۲	قابلیت داده برداری پیوسته	۰.۰۷
۳	فرکانس داده برداری	۰.۰۶۵
۴	مقاومت در برابر دما و شرایط محیطی	۰.۰۶۵
۵	ایمنی در محیطهای حساس	۰.۰۳۵
۶	قابلیت فیلتر کردن اغتشاش داده ها	۰.۰۵۵
۷	قابلیت سنجش از دور یا غیر تماسی بودن	۰.۰۲

جدول ۵-۲ شاخصه‌های کاربردی اجرایی و وزن هر یک از شاخصه‌های اجرایی

ردیف	شاخص های کاربردی- اجرایی	وزن هر شاخصه از وزن کل شاخص کاربردی-اجرایی
۱	آزمون مطالعاتی/ استاندارد صنعتی	۰.۰۶
۲	رابط کاربری آسان	۰.۰۸
۳	سهولت استفاده	۰.۰۵
۴	آزمایش میدانی	۰.۰۸
۵	قابلیت اجرا	۰.۰۸

در جدول ۵-۲ نیز زیرشاخصه‌های کاربردی-اجرایی معرفی گردید و با توجه به اهمیت هر زیر شاخصه وزنی به آن اختصاص داده شد. در این شاخصه زیر شاخصه‌هایی حوزه استفاده، نوع آزمون مطالعاتی یا آزمون استاندارد و یا برای هر دو منظور کاربردیست معرفی گردیده است، زیر شاخصه رابط کاربری امکانات نرم افزاری جهت داده برداری،

سهولت با منظور استفاده بدون داشتن تخصص سطوح بالا در نظر گرفته شده است، قابلیت اجرا و یا اجرایی بودن آزمون به این معنی است که آیا فناوری در حد مطالعاتی بوده و یا به صورت صنعتی قابل استفاده می‌باشد. جدول ۳-۵ زیر شاخصه‌های اقتصادی را معرفی و وزن دهی می‌نماید. در جدول ۴-۵،

جدول ۵-۵ و جدول ۶-۵ به هر یک از فناوری‌های معرفی شده در خصوص شاخصه‌های فنی، کاربردی-اجرایی و اقتصادی از صفر تا ده امتیاز داده شده و مجموع حاصل ضرب امتیاز در وزن متناظر شاخصه‌ها در ستون آخر ارائه شد.

جدول ۳-۵ شاخصه‌های اقتصادی و وزن هر یک از شاخصه‌های اقتصادی

ردیف	شاخص های اقتصادی	وزن هر شاخصه از وزن کل شاخص اقتصادی
۱	هزینه فناوری	۰.۰۷
۲	بازگشت سرمایه	۰.۰۶
۳	در دسترس بودن	۰.۰۴
۴	فراوانی تعداد آزمایش‌ها (در هر سه حوزه سازه های صنعت برق)	۰.۰۸

جدول ۴-۵ امتیاز دهی به شاخصه‌های فنی هر یک از فناوری‌های معرفی شده

فناوری	صحت و دقت با وزن فنی	قابلیت داده برداری پیوسته با وزن فنی	فرکانس عملیاتی با وزن فنی	مقاومت در برابر دما و شرایط محیطی با وزن فنی	ایمنی در محیط‌های حساس با وزن فنی	قابلیت فیلتر کردن اغتشاش داده ها با وزن فنی	قابلیت سنجش از دور یا غیر تماسی بودن با وزن فنی	امتیاز کل فنی = $\sum$ امتیاز $\times$ وزن
	۰.۰۹	۰.۰۷	۰.۰۶۵	۰.۰۶۵	۰.۰۳۵	۰.۰۵۵	۰.۰۲	
امتیاز آزمون خستگی التراسونیک	۹	۷	۸	۳	۵	۷	۰	۲.۵۷۵
امتیاز حسگر فیبر نوری	۹	۱۰	۹	۹	۱۰	۵	۰	۳.۳۰۵
امتیاز حسگرهای توری براگ فیبری	۹	۱۰	۹	۹	۱۰	۵	۰	۳.۳۰۵
امتیاز سنجش جابه‌جایی سازه مبنی بر دید	۸	۸	۷	۸	۱۰	۶.۵	۸	۳.۱۲۲۵
امتیاز ارتعاش سنج داپلر لیزری	۸.۵	۱۰	۹	۸.۵	۱۰	۸	۷.۵	۳.۵۴۲۵
امتیاز حسگر جابجایی سنج لیزری	۸.۵	۸.۵	۹	۸.۵	۱۰	۸	۷.۵	۳.۴۳۷۵
امتیاز حسگرهای پیزو الکتریک	۱۰	۱۰	۱۰	۸.۵	۸	۹	۰	۳.۵۷۷۵
امتیاز شبیه‌سازی ترکیبی	۸.۵	۹	۵	۴	۴	۱۰	۲	۲.۷۱
امتیاز آزمون خزش	۸.۵	۸	۶	۳	۰	۱۰	۰	۲.۴۶
امتیاز تصویر دیجیتال همبسته برای سنجش میدان کرنش و تنش	۸	۱۰	۹	۸.۵	۱۰	۸	۵	۳.۴۴۷۵
امتیاز حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک	۸.۵	۸.۵	۸	۴	۴	۸	۰	۲.۷۲
امتیاز آزمون تونل باد	۷	۸	۸	۵	۰	۱۰	۵	۲.۶۸۵

جدول ۵-۵ امتیاز دهی به زیر شاخصه‌های کاربردی و اجرایی هر یک از فناوری‌های معرفی شده

فناوری	آزمون مطالعاتی/ استاندارد صنعتی با وزن اجرایی ۰.۰۶	رابط کاربری آسان با وزن اجرایی ۰.۰۸	سهولت استفاده با وزن اجرایی ۰.۰۵	آزمایش میدانی بیا وزن اجرایی ۰.۰۸	قابلیت اجرا با وزن اجرایی ۰.۰۸	امتیاز کل اجرایی= $\sum$ امتیاز $\times$ وزن
امتیاز آزمون خستگی التراسونیک	۹	۹	۸	۰	۹	۲.۳۸
امتیاز حسگر فیبر نوری	۸.۵	۸.۵	۹	۹	۹	۳.۰۸
امتیاز حسگرهای توری براگ فیبری	۸.۵	۸.۵	۹	۹	۹	۳.۰۸
امتیاز سنجش جابه‌جایی سازه مبنی بر دید	۹	۶	۷	۹	۹	۲.۸۱
امتیاز ارتعاش سنج داپلر لیزری	۸	۹	۹	۱۰	۱۰	۳.۲۵
امتیاز حسگر جابجایی سنج لیزری	۹	۹	۹	۱۰	۱۰	۳.۳۱
امتیاز حسگرهای پیزو الکتریک	۷	۸.۵	۹	۹	۱۰	۳.۰۷
امتیاز شبیه‌سازی ترکیبی	۵	۴	۴	۰	۳	۱.۰۶
امتیاز آزمون خزش	۹	۸	۷	۰	۱۰	۲.۳۳
امتیاز تصویر دیجیتال همبسته برای سنجش میدان کرنش و تنش	۶	۶.۵	۶	۵	۸	۲.۲۲
امتیاز حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک	۷	۸.۵	۹	۹	۱۰	۳.۰۷
امتیاز آزمون تونل باد	۵	۷	۶	۰	۳	۱.۶۶۵

جدول ۵-۶ امتیاز دهی به زیر شاخصه‌هایی اقتصادی برای هر یک از فناوری‌های معرفی شده

امتیاز کل اقتصادی = $\sum$ وزن امتیاز $\times$	فراوانی تعداد آزمایش-ها با وزن اقتصادی ۰.۰۸	در دسترس بودن با وزن اقتصادی ۰.۰۴	بازگشت سرمایه با وزن اقتصادی ۰.۰۶	هزینه فناوری با وزن اقتصادی ۰.۰۷	فناوری
1.22	9	3	4	2	امتیاز آزمون خستگی التراسونیک
2.05	9	7	7	9	امتیاز حسگر فیبر نوری
2.05	9	7	7	9	امتیاز حسگرهای توری براگ فیبری
2.03	10	8	7	7	امتیاز سنجش جابه‌جایی سازه مبنی بر دید
1.85	9	5.5	7	7	امتیاز ارتعاش‌سنج داپلر لیزری
2.08	10	6	8	8	امتیاز حسگر جابجایی سنج لیزری
2.2	10	9	8	8	امتیاز حسگرهای پیزو الکتریک
1.16	7	4	5	2	امتیاز شبیه‌سازی ترکیبی
1.42	5	6	6	6	امتیاز آزمون خزش
1.5	5	9	3	8	امتیاز تصویر دیجیتال همبسته برای سنجش میدان کرنش و تنش
2.06	10	6	10	6	امتیاز حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک
0.38	1	1	2	2	امتیاز آزمون تونل باد

در

جدول ۵-۷ مجموع امتیازهای کسب شده در هر یک از فناوری‌ها ارائه شده است که با توجه به امتیازهای کسب شده اولویت هر یک از فناوری‌ها تعیین گردیده است.

جدول ۵-۷ الویت بندی فناوری‌ها براساس مجمع امتیازهای فنی، کاربردی-اجرایی و اقتصادی

ردیف	فناوری	امتیاز فنی	امتیاز کاربردی-اجرایی	امتیاز اقتصادی	امتیاز کل
۱	امتیاز حسگر-های پیزو الکتریک	3.5775	3.07	2.2	8.8475
۲	امتیاز حسگر جابجایی سنج لیزری	3.4375	3.31	2.08	8.8275
۳	امتیاز ارتعاش سنج داپلر لیزری	3.5425	3.25	1.85	8.6425
۴	امتیاز حسگر فیبر نوری	3.305	3.08	2.05	8.435
۵	امتیاز حسگرهای توری براگ فیبری	3.305	3.08	2.05	8.435
۶	امتیاز سنجش جابه‌جایی سازه مبنی بر دید	3.1225	2.81	2.03	7.9625
۷	امتیاز حسگرهای مبتنی بر انتشار آکوستیک	2.72	3.07	2.06	7.85
۸	امتیاز تصویر دیجیتال همبسته برای سنجش میدان کرنش و تنش	3.4475	2.22	1.5	7.1675
۹	امتیاز آزمون خزش	2.46	2.33	1.42	6.21
۱۰	امتیاز آزمون خستگی التراسونیک	2.575	2.38	1.22	6.175
۱۱	امتیاز شبیه‌سازی ترکیبی	2.71	1.06	1.16	4.93
۱۲	امتیاز آزمون تونل باد	2.685	1.32	0.38	4.385

همانطور که مشاهده می‌گردد حسگرهای پیزو الکتریک با کسب بیشترین امتیاز در مجموع امتیازها در اولویت اول فناوری‌های معرفی شده قرار دارد و در انتهای جدول به ترتیب شبیه ساز ترکیبی و آزمون تونل باد قرار می‌گیرند. همانطور که مشاهده می‌گردد فناوری‌هایی در سطریهای اول جدول قرار گرفته اند که از لحاظ فناوری به بلوغ خود رسیده‌اند و بصورت صنعتی در حال حاضر تولید می‌گردند و قابل خریداری می‌باشند. فناوری‌های نظیر استفاده از تصویر دیجیتال همبسته به دلیل نیاز به شرایط نوری مشخص در هنگام آزمایش و همچنین نیاز به تخصص بالا در استفاده

از آن و همچنین کالیبراسیونی که با دقت و تخصص بالایی باید صورت پذیرد در میانه جدول قرار گرفته و بیشترین استفاده آن در آزمایشات مطالعاتی خواهد بود.

فصل ششم:

ارزیابی آزمایشگاه سازه‌های صنعت برق اراک از لحاظ پتانسیل‌های موجود و ارائه رویکردهای پیشنهادی در ارتباط با افزایش بهره‌وری این آزمایشگاه

مقدمه فصل ششم:

در این فصل آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیروی اراک معرفی می‌گردد. آزمون‌های مختلفی که در این آزمایشگاه انجام می‌پذیرد با ارائه تصاویری از آن‌ها بطور مختصر بیان می‌گردد، سپس امکانات و ظرفیت‌های در این آزمایشگاه بررسی و ارزیابی می‌گردد.

۱-۶ ارزیابی شرایط و پتانسیل‌های موجود آزمایشگاه سازه اراک

آزمایشگاه سازه‌های انتقال نیرو پژوهشگاه نیرو، بزرگترین و مجهزترین آزمایشگاه آزمون دکل در خاورمیانه می‌باشد که انجام آزمون نوعی بر روی انواع سازه‌های انتقال نیرو را بر طبق الزامات استاندارد IEC 60652 به انجام می‌رساند، علاوه بر سازه‌های انتقال نیرو در زمینه آزمون‌های استاندارد پایه‌های توزیع نیرو، پایه‌های روشنایی، اینزولاتورهای (مقره‌های) انتقال و توزیع نیرو نیز ارائه خدمات انجام می‌دهد. آزمایشگاه سازه‌های انتقال نیرو پژوهشگاه نیرو، واقع در نزدیکی شهر اراک، به عنوان یکی از آزمایشگاه‌های مرجع وزارت نیرو و تنها آزمایشگاه آزمون نوعی دکل‌های انتقال و توزیع نیرو مورد تأیید در ایران می‌باشد.

طی سال‌های ابتدایی دهه ۱۳۶۰ شرکت آونگان تولید کننده انحصاری دکل‌های انتقال نیرو در ایران بود و بر اساس طرح دکل‌های ساخته شده موجود اقدام به ساخت سازه‌های فلزی دکل‌ها می‌نمود. به تدریج با افزایش نیاز روزافزون به شبکه‌های انتقال برق و عدم امکان پاسخگویی به تمامی نیازهای صنعت برق با تکیه بر ظرفیت تولیدی شرکت آونگان، شرکت‌های دیگری نیز پا به عرصه ساخت دکل گذاشتند. وزارت نیرو ایستگاه تست دکل در شرکت آونگان را به منظور آزمایش نوعی دکل‌های انتقال نیرو در اهداف خود قرار داده و در حدود سال ۱۳۷۴ ایستگاه تست دکل

شرکت آونگان به بهره‌برداری رسید. در این عرصه رقابتی که مابین شرکت آونگان و دیگر شرکت‌ها ایجاد شده بود، شرکت‌های نوپا اقدام به طراحی دکل‌های جدید نمودند و طبعاً می‌بایست ارزیابی طرح دکل‌های جدید در ایستگاه تست دکل شرکت آونگان بررسی می‌گردید. پیچیدگی‌های آزمایش دکل‌های انتقال نیرو از یکسو و آزمایش دکل‌ها در آزمایشگاهی که شرکت آونگان به عنوان یکی از رقبای تجاری شرکت‌های خواستار آزمایش در آن انجام وظیفه می‌نمود از سوی دیگر، عملاً ایستگاه تست دکل شرکت آونگان را به تعطیلی کشاند. پژوهشگاه نیرو با توجه به راکد ماندن این سرمایه ملی، پیشنهادی را مبنی بر فعال‌سازی مجدد این آزمایشگاه به شرکت توانیر ارسال داشت که پس از مذاکرات فراوان و با حصول موافقت شرکت آونگان، مراحل قانونی این نقل و انتقال در سال ۱۳۸۳ انجام پذیرفت و آزمایشگاه تست دکل به پژوهشگاه نیرو تحویل گردید. بهره‌برداری از آزمایشگاه سازه‌های انتقال نیرو از سال ۱۳۸۳ به پژوهشگاه نیرو واگذار گردید که تاکنون این آزمایشگاه موفق به انجام حدود ۱۶۰ آزمون نوعی بر روی انواع دکل‌های انتقال نیرو از جمله مشبک، تلسکوپی و بتنی و نیز تست انواع پایه‌های روشنایی و بتنی گردیده است.

آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو تمامی فعالیت‌هایش بر مبنای استاندارد ISO-17025:2005 انجام می‌گردد. علاوه بر آن جهت انجام آزمون آزمایشگاه استاندارد IEEE951 را نیز رعایت می‌کند.

۱-۱-۶ سسخدمات آزمایشگاهی که در حال حاضر در آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک ارائه می‌گردد

انواع مختلفی از برج‌های انتقال نیرو در این آزمایشگاه تحت آزمون نوعی قرار می‌گیرند، که شامل برج‌های مشبک، تلسکوپی فولادی و بتنی، خود ایستا می‌باشند. در هر کدام از انواع برج‌هایی که نام برده شد ممکن است تک مدار، دومدار، سه مدار و یا چهار مدار باشند و یا بر اساس آویزی و زاویه‌دار بودن برج شامل انواع مختلفی می‌شود. به طور کلی در این ایستگاه آزمون، برج‌های ۶۳، ۱۳۲، ۲۲۰ و ۴۰۰ کیلوولت مورد آزمون قرار می‌گیرند.

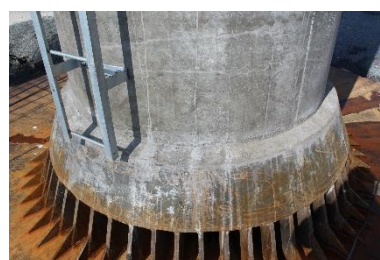
شکل ۱-۶ برج مشبک ۲۳۰ کیلوولت چهار مداره برپا شده در ایستگاه آزمون سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک نمایش می‌دهد، شکل ۲-۶ تصاویری از برج تلسکوپی ۱۳۲ کیلوولت ۲ مداره، در زمان نصب، استاپ ستینگ نصب شده و ریگینگ انجام شده برج را در ایستگاه آزمون سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک نمایش می‌دهد. شکل ۳-۶ تصاویری از برج تلسکوپی بتنی ۶۴ کیلوولت ۴ مداره، در زمان نصب، استاپ ستینگ نصب شده و ریگینگ انجام شده برج را در ایستگاه آزمون سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک نمایش می‌دهد.



شکل ۶-۱ برج مشبک ۲۳۰ کیلوولت چهار مداره



شکل ۶-۲ برج تلسکوپی ۱۳۲ کیلوولت دو مداره



شکل ۶-۳ برج تلسکوپی بتنی ۶۴ کیلوولت چهار مداره

به طور معمول اثر شش پارامتر روی برج مورد بررسی قرار می‌گیرد پارگی سیم، انحراف برج، عملکرد در برف، یخ‌زدگی و باد شدید از این موارد هستند. در فرآیند انجام آزمون، حداکثر نیروی مجاز در برج در شش مرحله اعمال می‌گردد. این مراحل شامل ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ درصد نیروی مجاز می‌باشد. در هر مرحله با دو خط‌کش انحراف برج با میزان استاندارد بررسی می‌شود. به عنوان آزمون تخریب پس از تحمل ۱۰۰ درصد نیروی مجاز، نیرو تا ۱۲۰ درصد هم افزوده می‌شود. آزمون تخریب برای مواردی که مشخص شود برج درست طراحی شده و یا بیش از اندازه مورد نیاز طراحی شده است استفاده می‌شود.

به طور معمول حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد از آزمون‌های انجام شده روی برج‌هایی که دارای طراحی جدید هستند، نشان دهنده آن است که برج به طور صحیح برای تحمل نیروی مجاز طراحی نشده است و نیاز به طراحی مجدد وجود دارد. این موضوع خیلی مورد استقبال شرکت‌های تولیدکننده برج نیست و برای آنها هزینه به همراه خواهد داشت زمان مورد نیاز جهت انجام آزمون انواع برج در این ایستگاه بصورت زیر می‌باشد:

- برج تلسکوپی برای آزمون زمانی حدود ۲۰-۲۵ روز نیاز دارد.
- برج‌های ۴ مداره برای آزمون زمانی حدود ۴۵ روز نیاز دارد.
- برج‌های ۲ مداره برای آزمون زمانی حدود ۳۰ روز نیاز دارد.

علاوه بر برج‌های انتقال نیرو در این ایستگاه آزمون، ارائه خدمات آزمون نوعی پایه‌های بتنی توزیع نیرو، پایه‌های غیر بتنی توزیع نیرو و روشنایی نیز انجام می‌گردد، شکل ۶-۴ پایه ۱۲ متری توزیع نیرو چدنی را در حال انجام آزمایش مقاومت ارتجاعی نمایش می‌دهد. همچنین آزمون مکانیکال مقره‌های انتقال و توزیع نیرو، آزمون نوعی برج‌های مخابراتی نیز از جمله خدماتی است که در حال حاضر در این ایستگاه آزمون ارائه می‌گردد. شکل ۶-۵ آزمون مکانیکال مقره انتقال نیرو را نمایش می‌دهد. شکل ۶-۶ آزمون نوعی برج مخابراتی موقت را برای اولین بار در آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۶ پایه ۱۲ متری توزیع نیرو چدنی



شکل ۵-۶ آزمون مکانیکال مقره‌های انتقال نیرو



شکل ۶-۶ آزمون نوعی برج مخابراتی

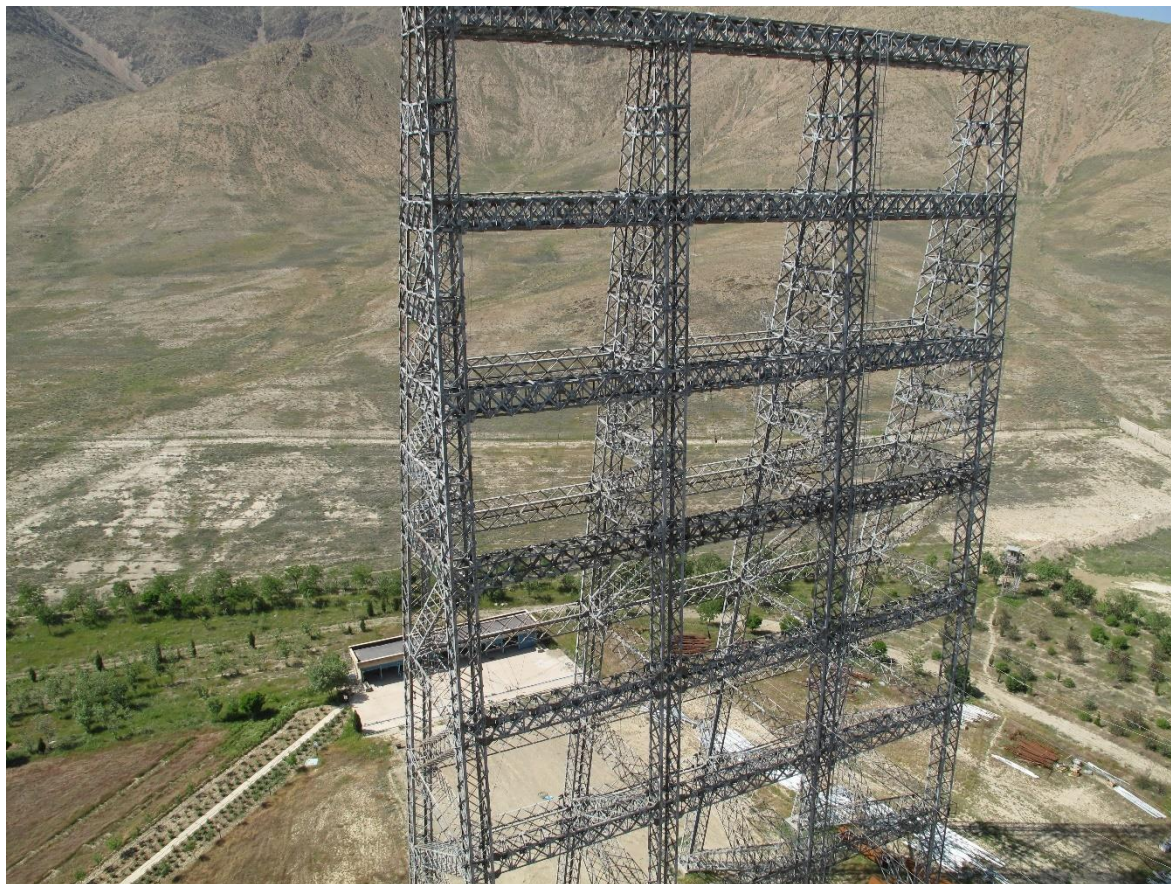
۲-۱-۶ ظرفیت‌های آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیروی اراک

اکثر تجهیزات آزمایشگاه سازه‌های انتقال نیروی برق از کشور اسپانیا خریداری شده است. مشابه بسیاری از این تجهیزاتی که در آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیروی اراک استفاده می‌گردد در آزمایشگاه سازه‌های انتقال نیروی اسپانیا در حال استفاده می‌باشد، که این خود نشان از کیفیت بالا و مطابق استانداردهای بین‌المللی بودن آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیروی اراک می‌باشد.

مهمترین تجهیزات ایستگاه دستگاه تاور 20×85 است که ۱۶ تن بوده و ارتفاع آن ۸۰ متر می‌باشد، شکل ۶-۷، برج‌های کمکی طولی و عرضی، شکل ۶-۸، لیفتراک ۴ تن، جرثقیل ۱۰ تن و دستگاه کشش یونیورسال (که جهت کالیبره کردن لودسل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد) از دیگر تجهیزات مهم ایستگاه می‌باشد، شکل ۶-۹. وینچ‌های اعمال نیرو که در جهت عرضی ۱۵ وینچ و در جهت طولی نیز ۱۵ وینچ قرار دارد و جهت اعمال نیروهای عرضی، طولی و قائم استفاده می‌گردند، شکل ۶-۱۰.



شکل ۶-۷ تاور کرین 20×85 پتن و برج‌های کمکی طولی و عرضی



شکل ۶-۸ برج کمکی عرضی



شکل ۶-۹ دستگاه کشش یونیورسال



شکل ۶-۱۰ اتاق وینچ‌های اعمال نیرو

اتاق کنترل یکی دیگر از تجهیزات مهم آزمایشگاه است که خود از مجموعه‌ای از تجهیزات تشکیل می‌گردد اتاق کنترل جهت تنظیم مقادیر و اعمال همزمان نیرو در جهات عرضی، طولی و عمودی می‌باشد، شکل ۶-۱۱ کنترل کننده و سیستم دریافت و انتقال داده‌ها از نوع زیمنس آلمان می‌باشد، این سیستم در حال حاضر تنها برای فرمان دادن به وینچ‌ها و کنترل نیروی اعمال شده توسط وینچ‌ها طراحی شده است. در این سیستم کنترل وینچ‌ها سلول‌های بار و دینامومترها تجهیزات اندازه‌گیری مقادیر نیروهای عرضی، طولی و عمودی که بصورت بر خط جهت ارسال اندازه‌گیری‌های انجام شده با اتاق کنترل در ارتباط می‌باشد، شکل ۶-۱۲.

در فرآیند آزمایش به منظور قرائت تغییر مکان و جابجایی برج‌ها از دوربین تئودولیت و خطکش استفاده می‌گردد.



شکل ۶-۱۱ اتاق کنترل



شکل ۶-۱۲ سلول های بار

همانطور که در بخش قبلی توضیح داده شد خدماتی که آزمایشگاه ارائه می‌دهد به ظرفیت‌های موجود محدود می‌باشد به همین سبب با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه ظرفیت‌های خدمات قابل ارائه تعیین می‌گردد که به شرح زیر می‌باشد:

- بستر آزمون شماره ۱: بستری مربع شکل با اضلاع ۲۰ متر می‌باشد که توسط رابط‌های خاصی، قدرت تحمل نیروهای عکس‌العمل پایه‌های دکل را تا ۶۷۵ تن به ازای هر پایه، دارا می‌باشد، شکل ۶-۱۳.
- بستر آزمون شماره ۲: بستری مستطیل شکل با ابعاد ۱۰×۲۰ متر که عموماً برای تست دکل‌های مشبک با فاصله پشت به پشت کمتر از ۱۰ متر و نیروهای عکس‌العمل روی هر پایه حداکثر ۳۷۵ تن و یا دکل‌های تلسکوپی با گشتاور حداکثر ۱۰۰۰ تن متر استفاده می‌شود، شکل ۶-۱۳.
- بستر آزمون شماره ۳: با ابعاد ۱۰×۲۲ متر صرفاً جهت تست دکل‌های تلسکوپی با گشتاور حداکثر ۶۰۰۰ تن متر می‌باشد، شکل ۶-۱۳.



شکل ۶-۱۳ بستر آزمون شماره ۱، ۲ و ۳

- حد نهایی تعداد بارهای هم‌زمان وارده به دکل: ۳۰ خط اعمال نیرو بصورت اتوماتیک
- حد نهایی نیروهای قابل اعمال: ۴۰ تن به ازای هر خط اعمال نیرو

- حد نهایی ارتفاع برای اعمال نیرو: ۷۲ متر
- آزمایشگاه تست پایه‌های روشنایی و بتنی قابلیت تست انواع پایه‌های خطوط توزیع از قبیل بتنی و پیش‌تنیده و پایه‌های روشنایی تا ارتفاع ۲۰ متر را بصورت افقی دارد.
- آزمایشگاه مقاومت مصالح نیز قابلیت تست مقاومت فشاری بتن و نیز سایر تست‌های مورد نیاز بر روی مصالح از قبیل دانه‌بندی و سایش مصالح را دارد.

فصل هفتم

ارائه رویکردهای پیشنهادی جهت افزایش بهره‌وری آزمایشگاه سازه اراک

مقدمه فصل هفتم:

آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیروی اراک از ابتدا با اهداف آزمون نوعی برج‌های انتقال نیرو و پایه‌های توزیع نیروی و پایه‌های روشنایی شروع به کار نمود. بستر آزمایشگاه قادر است بسیاری از آزمایش‌های نوعی مربوطه را با دقت مناسبی پوشش دهد. اما امکانات موجود و فضای بسیار مناسب موجود می‌تواند با کمی توسعه و ارتقاء امکان انجام آزمون‌های مختلف دیگر را فراهم آورد و سبب افزایش خدمات آزمایشگاهی، فنی، مطالعاتی و انجام خدماتی با دقت بیشتر گردد و همچنین سبب بی‌مانند بودن این آزمایشگاه در منطقه و افزایش بهره‌وری آزمایشگاه گردد. در ادامه رویکردهای پیشنهادی به منظور دستیابی به اهداف فوق بیان می‌گردد.

۱-۷ استفاده از جابجایی سنج‌های لیزری به جای دوربین تئودولیت در آزمون نوعی برج‌های انتقال نیرو

در حال حاضر جهت اندازه‌گیری جابجایی‌های برج‌های انتقال نیرو در آزمون نوعی برج‌های انتقال نیرو در آزمایشگاه اراک از خط‌کش و دوربین تئودولیت استفاده می‌گردد. دقت خط‌کش مورد استفاده ۵ سانتی‌متر می‌باشد، لذا با احتساب خطای انسانی در هنگام ثبت جابجایی‌ها حداقل خطایی برابر با ۵ سانتی‌متر محتمل می‌باشد، لذا استفاده از تجهیزاتی که بصورت ماشینی و اتوماتیک قادر به ثبت جابجایی سازه برج در هنگام آزمون باشد، می‌تواند سبب حذف خطای انسانی گردد، و همچنین با توجه به اینکه تجهیزات نوری دقت بسیار بالاتری نسبت به خط‌کش و دوربین دارند و امکان ثبت داده بصورت غیر تماسی در چنین تجهیزاتی وجود دارد این موضوع سبب کاهش خطای تجهیزات نیز می‌گردد.

جابجایی سنج‌های لیزری با توانایی سنجش جابجایی از فواصل دور یکی از بهترین جایگزین‌ها در این روش می‌باشند، [۱ و ۲]، همانطور که در گزارش مرحله پیش بیان شد از مهمترین مزایای جابجایی سنج‌های لیزری موارد زیر می‌باشد:

- ۱- غیر تماسی بودن،
- ۲- دقت بالا،
- ۳- فرکانس داده برداری مناسب،
- ۴- هزینه تجهیز نیز در قیاس با دوربین تئودولیت مناسب می‌باشد.
- ۵- حذف بسیاری از موارد خطای انسانی

۲-۷ ارتقاء سیستم اکتساب داده کنترل کننده جهت برداشت همزمان جابجایی‌ها و نیروها

یکی از مواردی که در حال حاضر در بسیاری از آزمون‌ها نیاز به آن احساس می‌گردد، امکان ثبت همزمان نیروهای اعمالی و جابجایی ایجاد شده در سازه می‌باشد، بخصوص این موضوع در آزمون‌هایی که نیاز به رسم نمودار تغییر شکل- نیرو در آن‌ها اهمیت داشته مهم است، [۱ و ۲]، از سویی در آزمون‌های مطالعاتی یکی از مهمترین اطلاعاتی که می‌تواند در شناسایی رفتار سازه به محقق کمک نماید ثبت داده‌های نیرو تغییر مکان بصورت همزمان می‌باشد. در خصوص این مورد می‌توان هم از جابجایی سنج‌های غیر تماسی نظیر جابجایی سنج لیزری برای فواصل دور استفاده نمود و هم از جابجایی سنج‌های مکانیکی نظیر *LVDT* در آزمون‌های کوچک استفاده کرد، علاوه بر تامین تجهیزات فوق لازم است سیستم اتاق کنترل از لحاظ نرم افزاری و سخت افزاری ارتقاء یافته تا امکان ثبت تغییر مکان‌های اندازه‌گیری شده توسط جابجایی سنج‌های فوق با فرکانس داده برداری مناسب فراهم آید.

مزایای ارتقاء سیستم اکتساب داده جهت ثبت جابجایی‌های سنجیده شده شامل:

- ۱- افزایش دقت و اعتبار خدمات ارائه شده
- ۲- افزایش دامنه خدمات آزمون
- ۳- امکان شناخت رفتار سازه‌ها در پروژه‌های مطالعاتی
- ۴- امکان ثبت جابجایی با فرکانس مناسب

۳-۷ ارتقاء سیستم اکتساب داده جهت ثبت داده کرنش از کرنش سنج و نیروهای اعمالی بصورت هم زمان

یکی از خدماتی که ایستگاه‌های آزمون نوعی برج‌های انتقال نیرو به مشتریان خود می‌دهند، امکان رصد تنش و کرنش‌های ایجاد شده در اعضای بحرانی برج می‌باشد، این موضوع می‌تواند قابلیت اطمینان طراحی‌های انجام شده را افزایش دهد، [۱ و ۲]، و همچنین در صورت بروز ضعف در عضو بحرانی در ترکیب بارهای بعدی عضو جایگزین و یا قوی‌تر بر روی برج جایگزین گردد، این موضوع هزینه‌های آزمون را برای شرکت‌های دکل ساز به شدت کاهش داده و مورد استقبال واقع می‌گردد. از طرفی استفاده از این تجهیز در آزمون‌های مطالعاتی به مانند پیشنهاد قبل می‌تواند در شناخت رفتار سازه بسیار کاربردی واقع گردد. جهت استفاده از این فناوری تنها کافیست از کرنش سنج‌های فیبر نوری، یا توری براگ، و یا پیزوالکتریک که در گزارش مرحله قبل بیان شده استفاده نمود، علاوه بر تامین تجهیزات فوق لازم است سیستم اتاق کنترل از لحاظ نرم افزاری و سخت افزاری ارتقاء یافته تا امکان ثبت کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش سنج‌های فوق را با فرکانس داده برداری مناسب فراهم آید.

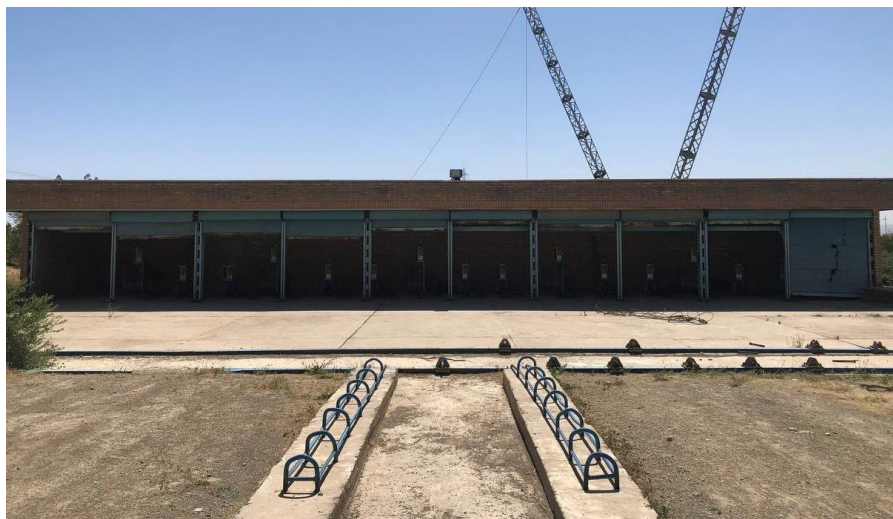
مزایای ارتقاء سیستم اکتساب داده جهت ثبت کرنش اعضای بحرانی شامل:

- ۱- افزایش دقت و اعتبار خدمات ارائه شده
- ۲- افزایش دامنه خدمات آزمون
- ۳- استقبال شرکت‌های برج ساز

۴- امکان انجام آزمون‌های مطالعاتی

۴-۷ ارتقاء ریل‌های توزیع نیرو در جلوی اتاق‌های وینچ و افزایش ظرفیت و تعداد وینچ‌ها

ریل‌های توزیع نیرو در جلوی اتاق وینچ‌ها در حقیقت وظیفه توزیع و هدایت نیروهای اعمالی از وینچ‌ها به برج‌های کمکی را داشته‌اند، یکی از مشکلاتی که در حال حاضر وجود دارد تعداد کم و طول کوتاه ریل می‌باشد، شکل ۱-۷، از لحاظ مقاومتی ظرفیت مهار شدن ریل‌ها در فونداسیون و همچنین مقاومت خود ریل‌ها سبب محدود بودن ظرفیت ریل‌ها می‌گردد، [۱ و ۲]، وینچ‌های موجود نیز وینچ‌های ۵ تن و ۱۰ تن می‌باشند که برای اعمال نیروهای بزرگ‌تر نیاز به استفاده از قرقره جهت دوبرابر نمودن نیروهاست که این موضوع نیز خود سبب محدودیت‌های بیشتری می‌گردد، شکل ۲-۷.



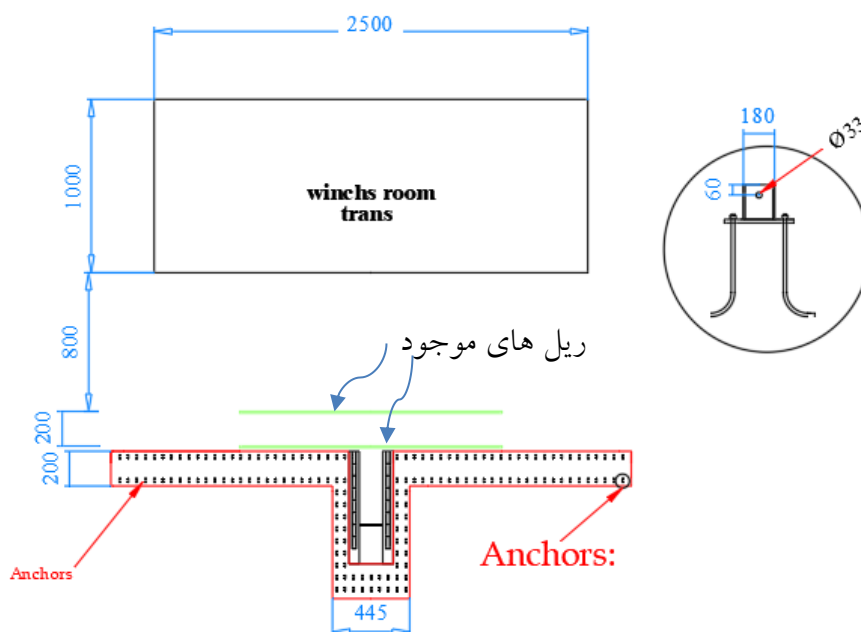
شکل ۱-۷ اتاق وینچ‌ها و ریل‌ها و انکرهای موجود



شکل ۷-۲ کابل‌های اعمال نیرو هدایت شده از ریل‌ها و انکرها به برج‌های کمکی

برای حل مشکل ظرفیت اعمال نیرو و تعداد خطوط نیرو، نیاز به اصلاح ریل‌های حاضر و همچنین در صورت امکان افزایش تعداد و ظرفیت وینچ‌های موجود می‌باشد، البته مسئله فوق با طرح در این گزارش به منظور پیشنهاد بیان شده است و نیاز به مطالعات دقیق جهت معین نمودن تعداد ریل، آرایش مناسب ریل و تغییرات در وینچ‌ها می‌باشد. بطور مثال طرح پیشنهادی مسئول آزمایشگاه که براساس نیاز آزمون‌هایی که تا حال انجام شده و تجربه ایشان بر روی برج‌های انتقال نیرو در خصوص گیرگاه‌ها و ریل‌های مورد نیاز بصورت شکل ۷-۳ می‌باشد. مزایای ارتقاء ریل‌های توزیع نیرو و تغییر وینچ‌ها اعمال نیرو:

- ۱- افزایش ظرفیت اعمال نیرو در آزمون‌ها
- ۲- امکان انجام آزمون بدون تغییر ریگینگ و کاهش زمان آزمون
- ۳- امکان استفاده بهتر از ظرفیت برج‌های کمکی
- ۴- افزایش ظرفیت آزمون



شکل ۷-۳ طرح پیشنهادی در خصوص افزایش ظرفیت ریل‌های موجود در جلوی اتاق وینچ‌ها

۵-۷ ارتقاء رابط نصب بستر آزمون سوم جهت آزمون راحت‌تر برج‌های تلسکوپی فلزی و بتنی

همانطور که در شکل ۷-۴ دیده می‌شود جهت برپایی برج‌های تلسکوپی فلزی و بتنی بر روی بستر آزمون شماره ۳ نیاز به اتصال پایه برج به رابط دایره شکل بستر می‌باشد، این اتصال همواره بوسیله جوش انجام می‌پذیرد، و بعد از

اتمام آزمون باید توسط صفحات برش و هوا برش بریده شود، تکرار نصب و بازگشایی این نوع اتصال سبب ایجاد سطحی ناهموار بر روی این رابط دایره شکل می‌گردد، که تحت تنش‌های حرارتی پی در پی قرار می‌گیرد و پس از مدتی کوتاه نیاز به تعویض شدن رابط نصب می‌باشد، از سویی اجرای عملیات جوشکاری پیش از آزمون و برشکاری‌های پس از سبب صرف زمان و هزینه زیادی در آزمایشگاه می‌گردد، لذا تغییر رویه نصب برج‌های تلسکوپی می‌تواند علاوه بر کاهش زمان نصب و بازگشایی سبب کاهش هزینه‌های انجام آزمون گردد. در این خصوص رویکردهای مختلفی ممکن است بعد از مطالعه دقیق وضع موجود پیشنهاد گردد، بطور مثال تغییر ورق فوقانی رابط فعلی بصورت اتصال پیچی فلنچ برج تلسکوپی بر روی رابط نصب یکی از رویکردها می‌باشد. مزایای ارتقاء رابط نصب بستر سوم آزمون:

- ۱- کاهش زمان نصب و بازگشایی
- ۲- کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری
- ۳- استاندارد سازی فلنچ‌هایی که بر روی رابط نصب بستر شماره ۳ به آزمایشگاه ارجاع می‌گردند.



شکل ۷-۴ رابط نصب بستر آزمون شماره ۳

۶-۷ فراهم آوردن بستری جهت انجام آزمون ضربه در پایه‌های روشنایی

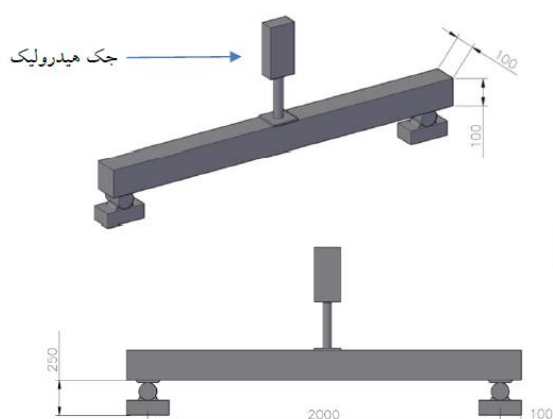
یکی از بازارهای خوب پایه‌های روشنایی کشورهای همسایه می‌باشد، که به منظور رقابت با بازارهای فوق لازم است گواهی‌نامه‌های مربوط برای پایه‌های روشنایی کسب گردد تا در بازار رقابت با تولیدکنندگان دیگر امکان حضور موفق تولیدکنندگان ایرانی وجود داشته باشد.

یکی از آزمون‌هایی که در خصوص پایه‌های روشنایی جهت دریافت گواهی نامه بین المللی لازم می‌باشد آزمون ضربه می‌باشد، آزمون ضربه که در حقیقت مدل سازی تصادف اتومبیل با پایه روشنایی می‌باشد، انرژی معمول حاصل از تصادف را با رهاسازی پاندولی از ارتفاع مشخص جهت اصابت به ارتفاع مشخصی از پایه روشنایی که معادل ارتفاع اتومبیل‌های متعارف می‌باشد مدل سازی می‌گردد و پس اعمال معیار سقوط یا عدم سقوط پایه و یا معیارهای دیگری که در استانداردهای بین المللی جهت این آزمون وجود دارد چک می‌گردد.

با توجه به ساده‌گی انجام آزمون تجهیزات لازم و درخواست‌های انجام شده از آزمایشگاه درخصوص این آزمون به نظر فراهم آوردن بستر این آزمون می‌تواند سبب جذب مشتریان آزمون فوق گردد.

۷-۷ فراهم آوردن تجهیزات لازم جهت انجام آزمون خمش سه و چهار نقطه‌ای

با توجه به نیاز انجام آزمون خمش سه نقطه و چهار نقطه در بسیاری از سازه‌های صنعت برق پیشنهاد می‌گردد تجهیزات مربوط به این آزمون‌ها به آزمایشگاه اضافه گردد. یکی از آزمون‌هایی که در طیف وسیعی درخواست آزمون نوعی آن داده شده آزمون کراس آرم کامپوزیت شبکه توزیع می‌باشد، شکل ۷-۵، دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون‌های کراس آرم‌های کامپوزیت در سال ۱۳۹۹ نیز ابلاغ گردیده است.



شکل ۷-۵ مثال آزمون خمش سه نقطه‌ای کراس آرم کامپوزیت

تجهیزات مورد نیاز برای این آزمون شامل جک هیدرولیک، سنسورهای ثبت جابجایی نظیر LVDT، تکیه‌گاه‌های مناسب، سیستم اکتساب داده با فرکانس مناسب می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت انجام اینگونه آزمون‌ها معمولاً باید

رعایت گردد به همین دلیل جک هیدرولیک پیشنهاد می‌گردد و از سویی برای شناختن رفتار آزمون‌ها نیاز به ثبت همزمان داده‌های اعمال نیرو و جابجایی‌های ایجاد شده می‌باشد.

مزایای فراهم آوردن تجهیزات فوق:

- ۱- امکان انجام آزمون‌های جدید
- ۲- امکان انجام آزمون‌های مطالعاتی بیشتر
- ۳- پاسخ‌گویی به نیاز صنعت برق

۸-۷ تجهیز آزمایشگاه به دستگاه انتشار آکوستیک جهت تشخیص میدان‌های کرنش و عیوب ایجاد شده در سازه

همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد مهمترین کاربرد حسگرهای انتشار آکوستیک تشخیص نقص و آسیب در عضو می‌باشد علاوه بر آن با استفاده از این فناوری و از کنار هم قرارگیری چند حسگر آن بر روی یک عضو می‌توان میدان‌های تنش و کرنش را در عضو تشخیص داد، [۱ و ۲]، با توجه به کاربردهای مختلف این فناوری یکی از مهمترین کاربردهای آن استفاده از آن در آزمون برج‌های بتنی و تیرهای بتنی به منظور تشخیص شروع ترک‌ها و گسترش آن‌ها می‌باشد، استفاده از دستگاه انتشار آکوستیک در آزمون سازه‌های کامپوزیت به مانند پره توربین بادی به منظور تشخیص میدان‌های تنش و کرنش و نقص ایجاد شده در آن‌ها نیز می‌تواند بسیار کارآمد باشد. علاوه بر آزمون‌های فوق این فناوری آزمایشگاه را برای آزمایش‌های میدانی و پایش سازه‌های مختلف تجهیز می‌نماید. کاربرد این تجهیز در آزمون‌های مطالعاتی می‌تواند بسیار کارآمد باشد، ضمن اینکه به توجه به ویژگی‌های آن که در گزارش مرحله پیش بیان شد از اولویت بالایی نسبت به آزمون‌های دیگر در ارزیابی عملکرد سازه‌های صنعت برق برخوردار است.

مزایای این فناوری برای آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو:

- ۱- امکان انجام آزمایش‌های میدانی
- ۲- ارزیابی دقیق برج‌های بتنی انتقال نیرو در هنگام آزمون از نظر شروع ترک‌های سازه‌ای
- ۳- دامنه گسترده‌ای از آزمون‌های مطالعاتی که با کمک این فناوری امکان‌پذیر می‌گردد
- ۴- ارزیابی دقیق کلیه اعضای فولادی و کامپوزیت

۹-۷ توسعه آزمایشگاه برای استفاده از فناوری سنجش میدان کرنش و تنش با استفاده از دوربین و فناوری پردازش تصویر

یکی از فناوری‌هایی که بسیار در حوزه آزمون‌های مطالعاتی می‌تواند کارایی داشته باشد استفاده از دوربین و پردازش تصویر در سنجش میدان تنش و کرنش می‌باشد، علاوه بر آن تجهیز آزمایشگاه به این فناوری در خصوص ارزیابی سازه‌های خاص با هدف مشخص می‌تواند کارایی داشته باشد، در حال حاضر در هیچ استاندارد استفاده از این فناوری به طور مستقیم اشاره نشده است. مشکلاتی نظیر نیاز به کالیبره شدن، نیروی متخصص و حساسیت به تغییرات نور در محیط از جمله مواردی است که استفاده از این فناوری را برای موارد تحقیقاتی و موارد عملی خاص محدود می‌نماید.

۱۰-۷ ارتقاء و به روز رسانی تجهیزات موجود در آزمایشگاه که کمتر مورد استفاده واقع می‌گردند، به منظور انجام آزمون‌های مطالعاتی و صنعتی

با توجه به اینکه در آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیروی اراک، تجهیزات اولیه آزمایشگاه بتن موجود می‌باشد، و نظر به اینکه مطالعاتی که درخصوص بتن در پژوهشگاه صورت می‌پذیرد همواره به آزمایشگاه‌های خارج از پژوهشگاه ارجاع داده می‌شود، لذا تکمیل امکانات این آزمایشگاه نظیر امکان انجام آزمایش خمش ۳ و ۴ نقطه‌ای می‌تواند این آزمایشگاه را برای آزمون‌های مطالعاتی و صنعتی آماده سازد.

در حال حاضر دستگاه کشش یونیورسال تنها برای کالیبراسون سلول‌های بار استفاده می‌گردد، و با اصلاح آن جهت دریافت گراف نیرو-تغییر مکان به راحتی بسیاری از آزمون‌های کششی که در آن‌ها دریافت گراف نیرو-تغییر مکان اهمیت دارد، نظیر آزمون کشش مصالح، امکان‌پذیر می‌گردد. حتی با اعمال تغییراتی مناسب این دستگاه قادر خواهد بود آزمون‌های خمش ۳ و ۴ نقطه‌ای را با دقت بالایی انجام دهد.

۱۱-۷ تهیه ارتعاش سنج‌های پیزو یا فیبر نوری و یا غیر تماسی لیزری جهت انجام آزمون‌های مطالعاتی

هدف از استفاده کلیه ارتعاش سنج‌ها جهت شناخت رفتار دینامیکی سازه و مشخصات دینامیکی سازه و مصالح می‌باشد، این کاربرد در ابتدا در حوزه پایش سلامت سازه مطرح می‌باشد، اما از سویی شناخت رفتار دینامیکی برخی از سازه‌ها بخصوص سازه‌هایی که دائماً تحت اثر بارهای دینامیکی قرار دارند سبب می‌گردد آزمون‌های دینامیکی در آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار باشد نظیر پره‌های توربین‌های بادی، [۱ و ۲].

لذا تجهیز آزمایشگاه به این فناوری می‌تواند فرصت انجام آزمون‌های مطالعاتی-صنعتی بسیاری را در آزمایشگاه فراهم آورد. آزمون‌هایی نظیر شناخت رفتار و مشخصات دینامیکی پره‌های توربین بادی، صحت سنجی رفتار برج‌های انتقال نیرو و

مزایای هر یک ارتعاش سنج‌های فوق نیز در گزارش مرحله قبل بیان شده، که متناسب با اهداف مورد نظر باید استفاده گردند.

۱۲-۷ تجهیز آزمایشگاه به شبیه ساز ترکیبی جهت انجام آزمون‌ها سازه‌های بزرگ مقیاس

همانطور که در گزارش مرحله اول توضیح داده شد شبیه ساز ترکیبی با شبیه سازی بخشی از سازه در نرم‌افزارهای تحلیلی و بخشی به صورت آزمایشگاهی سبب می‌گردد هزینه و زمان آزمون بسیار کاهش یابد، [۱ و ۲]، در آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیروی اراک توسعه آن روش می‌تواند کمک بسیار شایانی در آزمون برج‌های انتقال نیرو و کاهش هزینه‌های آن داشته باشد، به عنوان مثال با تهیه مدل آزمایشگاهی بخشی از برج و شبیه سازی باقی برج در

آزمایشگاه سبب کاهش شدید هزینه آزمون کمک به طراح در افزایش قابلیت اطمینان سازه طراحی شده و کاهش هزینه خواهد شد.

تجهیزات این آزمون، گیرگاه‌های مناسب، جک‌های هیدرولیک با فرکانس بارگذاری مناسب، حسگرهای کرنش، جابجایی، شتاب و ...، سیستم کنترل کننده، و رابط نرم افزاری مناسب بین سیستم کنترل کننده و نرم افزار تحلیلی مد نظر می‌باشد، البته می‌توان با هزینه بیشتر ساختارهای پیشرفته تری از این فناوری تهیه نمود بعنوان مثال ساختار آزمایشگاهی می‌توان شامل میز لرزه جهت آزمون‌های دینامیکی نیز گردد. از مزایای استفاده از این نوع فناوری میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- کاهش هزینه آزمون و زمان آزمون
- ۲- افزایش قابلیت اطمینان طراحی سازه
- ۳- افزایش خدمات آزمایشگاهی با توجه به کاهش محدودیت‌های آزمایش

نتیجه‌گیری:

پروژه حاضر مشتمل بر سه مرحله بود، که به منظور شناسایی فناوری‌های نوین آزمایشگاهی مناسب برای ارزیابی سازه‌های صنعت برق صورت پذیرفت، در دو مرحله اول به شناسایی و اولویت بندی فناوری‌ها پرداخته شد و در این مرحله به ارزیابی آزمایشگاه اراک و ارائه رویکردهایی برای افزایش بهره‌وری آن از لحاظ فنی پرداخته شد، همانطور که در فصل دوم این گزارش بیان گردید علیرغم تمامی امکانات موجود، آزمایشگاه سازه‌های انتقال و توزیع نیرو اراک پتانسیل اصلاح و توسعه امکانات را مطابق با پیشنهادهایی که داده شد دارد، هرچند ممکن است توسعه آزمایشگاه تنها از لحاظ فنی توجیه پذیر نباشد اما برای نیل به یک آزمایشگاه جامع و ایده‌آل لازم است تمامی امکانات لازم را جهت ارائه کامل خدمات فنی، مطالعاتی در حوزه سازه‌های صنعت برق فراهم آورد، از این رو رویکردهای پیشنهادی در این گزارش بیشتر با دیدگاه فنی- مطالعاتی ارائه گردیده است.

فهرست مراجع

1. Yeom, H., et al., *Very high cycle fatigue of butt-welded high-strength steel plate*. Metals, 2017. 7(3): p. 103.
2. Karr, U., et al., *Very high cycle fatigue testing of concrete using ultrasonic cycling*. Materials Testing, 2017. 59(5): p. 438-444.
3. Barrias, A., J.R. Casas, and S. Villalba, *A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications*. Sensors, 2016. 16(5): p. 748.
4. Li, H.-N., D.-S. Li, and G.-B. Song, *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*. Engineering structures, 2004. 26(11): p. 1647-1657.
5. Li, K., *Review of the strain modulation methods used in fiber Bragg grating sensors*. Journal of sensors, 2016. 2016.
6. Lai, J., et al., *Fiber bragg grating sensors-based in situ monitoring and safety assessment of loess tunnel*. Journal of Sensors, 2016. 2016.
7. Yazdizadeh, Z., H. Marzouk, and M.A. Hadianfard, *Monitoring of concrete shrinkage and creep using Fiber Bragg Grating sensors*. Construction and Building Materials, 2017. 137: p. 505-512.
8. Bao, Y., et al., *Review of fiber optic sensors for structural fire engineering*. Sensors, 2019. 19(4): p. 877.
9. Huang, Y., et al., *Large-strain optical fiber sensing and real-time FEM updating of steel structures under the high temperature effect*. Smart materials and structures, 2012. 22(1): p. 015016.
10. Huang, Y., et al. *A quasi-distributed optical fiber sensor network for large strain and high-temperature measurements of structures*. in *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2011*. 2011. International Society for Optics and Photonics.
11. Sikarwar, S., S. Singh, and B.C. Yadav, *Review on pressure sensors for structural health monitoring*. Photonic Sensors, 2017. 7(4): p. 294-304.
12. Gautschi, G., *Piezoelectric sensors*, in *Piezoelectric Sensorics*. 2002, Springer. p. 73-91.
13. Kee, S.-H. and J. Zhu, *Using piezoelectric sensors for ultrasonic pulse velocity measurements in concrete*. Smart Materials and Structures, 2013. 22(11): p. 115016.

14. Lu, Y., Z. Li, and W.-I. Liao, *Damage monitoring of reinforced concrete frames under seismic loading using cement-based piezoelectric sensor*. Materials and structures, 2011. **44**(7): p. 1273-1285.
15. Chang, P.C., A. Flatau, and S. Liu, *Health monitoring of civil infrastructure*. Structural health monitoring, 2003. **2**(3): p. 257-267.
16. Samman, M.M. and M. Biswas, *Vibration testing for nondestructive evaluation of bridges. I: Theory*. Journal of Structural Engineering, 1994. **120**(1): p. 269-289.
17. Sohn, H., *Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring*. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007. **365**(1851): p. 539-560.
18. Sikarwar, S. and B. Yadav, *Opto-electronic humidity sensor: A review*. Sensors and Actuators A: Physical, 2015. **233**: p. 54-70.
19. Nor, N.M., *Structural health monitoring through acoustic emission*, in *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*. 2018, Elsevier. p. 123-146.
20. ; acoustic Emission]. Available from: <http://www.idinspections.com/acoustic-emission-structural-health-monitoring-of-critical-structures/>.
21. Lee, J., *Use of MEMS Sensors in Structural Engineering*. Final Project of CEE, 2004. **619**.
22. Srivastava, V.K., et al., *A comparative study of structural, mechanical & electrical properties of ZnO and AlN thin films for MEMS based piezoelectric sensors*. Materials Research Express, 2022. **9**(2): p. 026402.
23. Maluf, N. and K. Williams, *An introduction to microelectromechanical systems engineering*. 2004: Artech House.
24. Lynch, J.P., et al., *Design of piezoresistive MEMS-based accelerometer for integration with wireless sensing unit for structural monitoring*. Journal of Aerospace Engineering, 2003. **16**(3): p. 108-114.
25. Wang, Y. and K. Law, *Wireless sensing and decentralized control for civil structures: theory and implementation*. Vol. 68. 2007.
26. Lee, J., et al., *Computer vision-based structural displacement measurement robust to light-induced image degradation for in-service bridges*. Sensors, 2017. **17**(10): p. 2317.
27. Lydon, D., et al., *Development and field testing of a vision-based displacement system using a low cost wireless action camera*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019. **121**: p. 343-358.
28. Garg, P., et al., *Noncontact dynamic displacement measurement of structures using a moving laser Doppler vibrometer*. Journal of Bridge Engineering, 2019. **24**(9): p. 04019089.
29. Psimoulis, P.A. and S.C. Stiros, *Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS)*. Engineering Structures, 2007. **29**(12): p. 3312-3324.
30. Olaszek, P., *Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method*. Measurement, 1999. **25**(3): p. 227-236.
31. Marshall, D.M., et al., *Introduction to unmanned aircraft systems*. 2015: Crc Press.
32. Cummings, A.R., et al., *The rise of UAVs*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. **83**(4): p. 317-325.
33. Nassif, H.H., M. Gindy, and J. Davis, *Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration*. Ndt & E International, 2005. **38**(3): p. 213-218.

34. Ellenberg, A., et al., *Use of unmanned aerial vehicle for quantitative infrastructure evaluation*. Journal of Infrastructure Systems, 2015. **21**(3): p. 04014054.
35. Rao, N.P., S. Mohan, and N. Lakshmanan, *A study on failure of cross arms in transmission line towers during prototype testing*. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2005. **5**(03): p. 435-455.
36. Langlois, S., F. Légeron, and F. Pourshargh. *Review of advanced modelling methods for lattice steel towers*. in *CIGRE-IEC Colloquium (2016: Montréal, Canada)*. 2016.
37. CIGRE, W.G.S.-. *An experiment to measure the variation in lattice tower design*. 1991.
38. CIGRE, W.G.B.-. *Influence of the hyperstatic modeling on the behavior of transmission line lattice structures*. 2009.
39. Da Silva, J., et al., *Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers*. Journal of Constructional Steel Research, 2005. **61**(8): p. 1108-1134.
40. Lee, P.-S. and G. McClure, *A general three-dimensional L-section beam finite element for elastoplastic large deformation analysis*. Computers & structures, 2006. **84**(3-4): p. 215-229.
41. Bouchard, P.-L., *Calcul de la capacité de pylônes à treillis avec une approche stabilité*. 2013: Université de Sherbrooke.
42. Kitipornchai, S., F. Al-Bermani, and A. Peyrot, *Effect of bolt slippage on ultimate behavior of lattice structures*. Journal of structural engineering, 1994. **120**(8): p. 2281-2287.
43. Jiang, W., et al., *Accurate modeling of joint effects in lattice transmission towers*. Engineering Structures, 2011. **33**(5): p. 1817-1827.
44. Rex, C.O. and W.S. Easterling, *Behavior and modeling of a bolt bearing on a single plate*. Journal of Structural Engineering, 2003. **129**(6): p. 792-800.
45. Alberman, F., S. Kitipornchai, and R.W. Chan, *Failure analysis of transmission towers*. Engineering Failure Analysis, 2009. **16**(6): p. 1922-1928.
46. Lee, P.-S. and G. McClure, *Elastoplastic large deformation analysis of a lattice steel tower structure and comparison with full-scale tests*. Journal of Constructional Steel Research, 2007. **63**(5): p. 709-717.
47. Kempner, J., L., et al., *Lattice transmission tower analysis: beyond simple truss model*, in *Electrical Transmission in a new age*. 2002. p. 175-187.
48. Loignon, A., et al., *Développement d'un protocole d'essai hybride par sous-structuration pour les pylônes à treillis*. 2015, Technical Report, Université de Sherbrooke, Canada.
49. Thomas, M.B. and A.H. Peyrot, *Dynamic response of ruptured conductors in transmission lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982(9): p. 3022-3027.
50. McClure, G. and M. Lapointe, *Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines*. Computers & Structures, 2003. **81**(8-11): p. 825-834.
51. Kempner, L., *Longitudinal impact loading on electrical transmission line towers: A scale model study*. 1998.
52. CIGRE, W.G.S.-. *Mechanical security of overhead lines - Containing cascading failures and mitigating their effects*. 2012.
53. Glanville, M., K. Kwok, and R. Denoon, *Full-scale damping measurements of structures in Australia*. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1996. **59**(2-3): p. 349-364.

54. Taillon, J.-Y., F. Légeron, and S. Prud'homme, *Variation of damping and stiffness of lattice towers with load level*. Journal of Constructional Steel Research, 2012. **71**: p. 111-118.
55. Sarebanha, A., et al., *Real-time hybrid simulation of seismically isolated structures with full-scale bearings and large computational models*. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2019. **120**(3): p. 693-717.
56. Bonelli, A., et al., *Convergence analysis of a parallel interfield method for heterogeneous simulations with dynamic substructuring*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008. **75**(7): p. 800-825.
57. Ahmadizadeh, M., G. Mosqueda, and A. Reinhorn, *Compensation of actuator delay and dynamics for real-time hybrid structural simulation*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008. **37**(1): p. 21-42.
58. Chae, Y., K. Kazemibidokhti, and J.M. Ricles, *Adaptive time series compensator for delay compensation of servo-hydraulic actuator systems for real-time hybrid simulation*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013. **42**(11): p. 1697-1715.
59. Horiuchi, T. and T. Konno, *A new method for compensating actuator delay in real-time hybrid experiments*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001. **359**(1786): p. 1893-1909.
60. Nakashima, M. and N. Masaoka, *Real-time on-line test for MDOF systems*. Earthquake engineering & structural dynamics, 1999. **28**(4): p. 393-420.
61. Schellenberg, A., et al., *Hybrid simulation of seismic isolation systems applied to an APR-1400 nuclear power plant*. Report PEER, 2015. 5.
62. Shortreed, J.S., et al., *Characterization and testing of the Caltrans seismic response modification device test system*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001. **359**(1786): p. 1829-1850.
63. McKenna, F., G. Fenves, and M. Scott, *OpenSees: open system for earthquake engineering simulation, version 2.4. 4*. PEER. University of California, Berkeley, CA. Available from: <http://opensees.berkeley.edu> [accessed October 14, 2014], 2014.
64. Amestoy, P.R., et al., *A fully asynchronous multifrontal solver using distributed dynamic scheduling*. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 2001. **23**(1): p. 15-41.
65. *OpenFresco: Open-source framework for experimental setup and control, Version 2.7*. 2014.
66. Mosqueda, G., *Continuous hybrid simulation with geographically distributed substructures*. 2005.
67. Schellenberg, A.H., *Advanced implementation of hybrid simulation*. 2008: University of California, Berkeley.
68. *Mathworks: MathWorks-Real-Time Workshop*. 2013.
69. *SCRAMNet+ Network: Technical Description Document*. Systran Corporation. 2000.
70. Pan, P., M. Nakashima, and H. Tomofuji, *Online test using displacement-force mixed control*. Earthquake engineering & structural dynamics, 2005. **34**(8): p. 869-888.
71. Bendat, J.S. and A.G. Piersol, *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. New York, Wiley-Interscience, 1980. 315 p., 1980.

72. Ozcelik, O., et al., *Experimental characterization, modeling and identification of the NEES-UCSD shake table mechanical system*. Earthquake engineering & structural dynamics, 2008. **37**(2): p. 243-264.
73. KEC international enterprise. *tower testing*. 2019; Available from: <https://www.kecrpg.com/tower-testing>.
74. Paiva, F., J. Henriques, and R.C. Barros, *Review of Transmission Tower Testing Stations Around the World*. Procedia Engineering, 2013. **57**: p. 859-868.
75. *Business Headquarter and corporate office of transrail lighting limited: about tower testing station of Nagpur*. Available from: <https://transrail.in/Business/Transmission-&-Distribution/Tower-Testing.aspx>.
76. *Experts of CSIR-SERC-Lab: about Tower Testing and Research Station*. Available from: <https://www.serc.res.in/sites/default/files/CSIR-SERC-Lab-brochure-TTRS.pdf>.
77. *Tower Testing and R&D | Kalpataru Power Transmission Limited*. Available from: <https://kalpatarupower.com/tower-testing-and-rd/>.
78. *Gammon India limited: about transrail structures*. Available from: <https://www.devex.com/organizations/gammon-india-associated-transrail-structures-29391>.
79. *about tower testing station*. Available from: https://www.lntec.com/homepage/multislug/demos/images/ptd/indias_largest_tower_testing_facility.pdf.
80. *Electromontaj company: about tower testing*. Available from: <https://electromontaj.ro/en/tower-testing-station/>.
81. *About tower testing station.*; Available from: <https://www.eskom.co.za/Pages/Landing.aspx>.
82. Selvaraj, M., S. Kulkarni, and R. Rameshbabu, *Performance Analysis of a Overhead Power Transmission Line Tower Using Polymer Composite Material*. Procedia Materials Science, 2014. **5**: p. 1340-1348.
83. Yeh, H.-Y. and S.C. Yang, *Building of a composite transmission tower*. Journal of reinforced plastics and composites, 1997. **16**(5): p. 414-424.
84. Asyraf, M., et al., *Fundamentals of creep, testing methods and development of test rig for the full-scale crossarm: a review*. Jurnal Teknologi, 2019. **81**(4).
85. Moutee, M., et al., *Modeling the creep behavior of wood cantilever loaded at free end during drying*. Wood and fiber science, 2007. **37**(3): p. 521-534.
86. Zhang, Z., J.-L. Yang, and K. Friedrich, *Creep resistant polymeric nanocomposites*. Polymer, 2004. **45**(10): p. 3481-3485.
87. Hunt, J.F., H. Zhang, and Y. Huang, *Analysis of cantilever-beam bending stress relaxation properties of thin wood composites*. BioResources, 2015. **10**(2): p. 3131-3145.
88. Chang, F.-C., F. Lam, and J.F. Kadla, *Using master curves based on time-temperature superposition principle to predict creep strains of wood-plastic composites*. Wood science and technology, 2013. **47**(3): p. 571-584.
89. Loni, S., I. Stefanou, and P.S. Valvo, *Experimental study on the creep behavior of GFRP pultruded beams*. in AIMETA 2013-XXI Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata. 2013. Edizioni Libreria Cortina.
90. Jaafar, C.N.A., M.A.M. Rizal, and I. Zainol, *Effect of kenaf alkalization treatment on morphological and mechanical properties of epoxy/silica/kenaf composite*. Int J Eng Technol, 2018. **7**: p. 258-263.

91. Jaafar, C.A., et al. *Preparation and characterisation of epoxy/silica/kenaf composite using hand lay-up method*. in *27th Scientific Conference of the Microscopy Society Malaysia (27th SCMSM 2018)*. 2018. Melaka Malaysia.
92. Ashraf, W., et al., *Investigation of Different Facesheet Materials on Compression Properties of Honeycomb Sandwich Composite*. Semin. Enau Kebangs. Bahau, Negeri Sembilan, Malaysia, 2019: p. 129-132.
93. Rawi, I.M., et al. *Wood and fiberglass crossarm performance against lightning strikes on transmission towers*. in *International Conference on Power Systems Transients*. 2017.
94. Nadhirah, A., et al., *Properties of fiberglass crossarm in transmission tower-a review*. International Journal of Applied Engineering Research, 2017. **12**(24): p. 15228-15233.
95. Kaboorani, A., P. Blanchet, and A. Laghdir, *A rapid method to assess viscoelastic and mechanosorptive creep in wood*. Wood and fiber science, 2013. **45**(4): p. 370-382.
96. Segovia, F., et al., *Mechanical behaviour of sugar maple in cantilever bending under constant and variable relative humidity conditions*. International Wood Products Journal, 2013. **4**(4): p. 225-231.
97. Mancusi, G., S. Spadea, and V.P. Berardi, *Experimental analysis on the time-dependent bonding of FRP laminates under sustained loads*. Composites Part B: Engineering, 2013. **46**: p. 116-122.
98. Pérez, C., V. Alvarez, and A. Vazquez, *Creep behaviour of layered silicate/starch-polycaprolactone blends nanocomposites*. Materials Science and Engineering: A, 2008. **480**(1-2): p. 259-265.
99. Anand, A., et al. *Lifetime prediction of nano-silica based glass fibre/epoxy composite by time temperature superposition principle*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
100. Ghosh, S.K., et al., *Creep behaviour of graphite oxide nanoplates embedded glass fiber/epoxy composites: Emphasizing the role of temperature and stress*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017. **102**: p. 166-177.
101. Sun, N. and C.E. Frazier, *Time/temperature equivalence in the dry wood creep response*. Holzforschung, 2007. **61**(6): p. 702-706.
102. Taniguchi, Y., K. Ando, and H. Yamamoto, *Determination of three-dimensional viscoelastic compliance in wood by tensile creep test*. Journal of Wood Science, 2010. **56**(1): p. 82-84.
103. Cyras, V., et al., *Influence of the fiber content and the processing conditions on the flexural creep behavior of sisal-PCL-starch composites*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(3): p. 253-265.
104. Sá, M.F., et al., *Creep behavior of pultruded GFRP elements-Part 1: Literature review and experimental study*. Composite Structures, 2011. **93**(10): p. 2450-2459.
105. Hao, A., Y. Chen, and J.Y. Chen, *Creep and recovery behavior of kenaf/polypropylene nonwoven composites*. Journal of applied polymer science, 2014. **131**(17).
106. Izer, A. and T. Bárány, *Effect of consolidation on the flexural creep behaviour of all-polypropylene composite*. Express Polymer Letters, 2010. **4**(4): p. 210-216.
107. Hyde, T. and W. Sun, *A novel, high-sensitivity, small specimen creep test*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2009. **44**(3): p. 171-185.
108. Lee, S.-Y., et al., *Creep behavior and manufacturing parameters of wood flour filled polypropylene composites*. Composite Structures, 2004. **65**(3-4): p. 459-469.

109. Ponsot, B., D. Valentin, and A. Bunsell, *The effects of time, temperature and stress on the long-term behaviour of CFRP*. Composites science and technology, 1989. **35**(1): p. 75-94.
110. Bueno, B.d.S., M.A. Costanzi, and J.G. Zornberg, *Conventional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles*. Geosynthetics International, 2005. **12**(6): p. 276-287.
111. Hadid, M., et al., *The creep master curve construction for the polyamide 6 by the stepped isostress method*. Materials Research Innovations, 2014. **18**(sup6): p. S6-336-S6-339.
112. Peng, H., et al., *Application of time-temperature superposition principle to Chinese fir orthotropic creep*. Journal of wood science, 2017. **63**(5): p. 455-463.
113. Alvarez, V.A., J.M. Kenny, and A. Vázquez, *Creep behavior of biocomposites based on sisal fiber reinforced cellulose derivatives/starch blends*. Polymer Composites, 2004. **25**(3): p. 280-288.
114. ZHU, S.P. and H.Z. HUANG, *A generalized frequency separation-strain energy damage function model for low cycle fatigue-creep life prediction*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010. **33**(4): p. 227-237.
115. Bernstein, B., E. Kearsley, and L. Zapas, *A study of stress relaxation with finite strain*. Transactions of the Society of Rheology, 1963. **7**(1): p. 391-410.
116. Zhuang, W.Z. and G.R. Halford, *Investigation of residual stress relaxation under cyclic load*. International journal of fatigue, 2001. **23**: p. 31-37.
117. Schwarzl, F. and A. Staverman, *Time-temperature dependence of linear viscoelastic behavior*. Journal of Applied Physics, 1952. **23**(8): p. 838-843.
118. Ma, X., et al., *Development of creep models for glued laminated bamboo using the time-temperature superposition principle*. Wood and Fiber Science, 2015. **47**(2): p. 141-146.
119. Chang, E. and W. Dover, *Characteristic parameters for stress distribution along the intersection of tubular Y, T, X and DT joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2001. **36**(3): p. 323-339.
120. Gamalath, S.S., *Long-term creep modeling of wood using time temperature superposition principle*. 1991, Virginia Tech.
121. Grishaber, R., et al., *A novel computer controlled constant stress lever arm creep testing machine*. Review of scientific instruments, 1997. **68**(7): p. 2812-2817.
122. Brunbauer, S., *Design and Development of a Testing Machine for Compressive Creep Tests on Polymers at Elevated Temperatures*. Institute of Materials Science and Testing of Polymers. Leoben, Austria, 2010.
123. LONI, S., *Experimental and theoretical study on the creep behavior of GFRP pultruded beams*. 2013.
124. Magimay, F., *Lightning Performance of NEB's 275 Kv Transmission Line*. 1977: Fakulti Kejuruteraan, Universiti Malaya.
125. Barr, B., et al., *Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF uni-axial tensile test: Part 2*. Materials and structures, 2003. **36**(4): p. 275-280.
126. Kusterle, W., *Flexural Creep Tests on Beams—8 Years of Experience with Steel and Synthetic Fibres*, in *Creep Behaviour in Cracked Sections of Fibre Reinforced Concrete*. 2017, Springer. p. 27-39.
127. Zhao, G., M. Di Prisco, and L. Vandewalle, *Experimental investigation on uniaxial tensile creep behavior of cracked steel fiber reinforced concrete*. Materials and Structures, 2015. **48**(10): p. 3173-3185.

128. Buratti, N. and C. Mazzotti. *Experimental tests on the long-term behaviour of SFRC and MSFRC in bending and direct tension*. in *Proc. 9th Rilem Int. Symp. Fiber Reinf. Concr.* 2016.
129. Buratti, N. and C. Mazzotti. *Uniaxial tension tests on macrosynthetic fibre reinforced concretes*. in *Proc. 9th Rilem Int. Symp. Fiber Reinf. Concr.* 2016.
130. Nieuwoudt, P.D. and W.P. Boshoff, *Time-dependent pull-out behaviour of hooked-end steel fibres in concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 2017. **79**: p. 133-147.
131. Daviau-Desnoyers, D., et al., *Creep Behavior of a SFRC Under Service and Ultimate Bending Loads*, in *Creep Behaviour in Cracked Sections of Fibre Reinforced Concrete*. 2017, Springer. p. 223-235.
132. Buratti, N. and C. Mazzotti, *Creep testing methodologies and results interpretation*, in *Creep Behaviour in Cracked Sections of Fibre Reinforced Concrete*. 2017, Springer. p. 13-24.
133. Babafemi, A.J. and W.P. Boshoff, *Testing and modelling the creep of cracked macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under flexural loading*. *Materials and Structures*, 2016. **49**(10): p. 4389-4400.
134. Heidari, G. and M. Heidari, *Effect of land price on transmission line design*. CIGRE Session-1992, 2002.
135. Alipour, H.J., S. Aminnejad, and M. Jazaeri. *Decreasing the Right of Way of transmission lines by using towers with polymer insulation arms*. in *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2007. IEEE.
136. Selvaraj, M., S. Kulkarni, and R.R. Babu, *Analysis and experimental testing of a built-up composite cross arm in a transmission line tower for mechanical performance*. *Composite Structures*, 2013. **96**: p. 1-7.
137. *Code of practice for use of structural steel in overhead transmission line towers*, in *IS:802 Part-1: 1995 RA 2006 and Part-3: 1978 RA 2008*. . 2008.
138. Duriatti, D., A. Béakou, and R. Levillain, *Optimisation of the crimping process of a metal end-fitting onto a composite rod*. *Composite structures*, 2006. **73**(3): p. 278-289.
139. Vallée, T. and T. Keller, *Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part III: Effects of chamfers*. *Composites Part B: Engineering*, 2006. **37**(4–5): p. 328-336.
140. Henin, E., G. Morcous, and M.K. Tadros, *Design, Fabrication, and Construction of Static-Cast Concrete Poles Reinforced with GFRP*. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2017. **22**(4): p. 04017007.
141. St. Paul, M., *SYSTEM LINE HARDENING USING DUCTILE IRON POLES*, MIPSYCON, Editor. 2019.
142. Scott, C., G. Heath, and J. Svoboda. *Vibration monitoring of power distribution poles*. in *19th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 2006. European Association of Geoscientists & Engineers.
143. *RStandard Composite Utility Poles (Testing Overview-USA)*. 2020, RS Technologies: 2421 – 37th Avenue NE, Suite 400, Calgary, AB T2E 6Y7.
144. Hand, M.M., et al., *Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns*. 2001, National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US).
145. Bauer, L., *Design of a Flexible Solar Cell Testing Mechanism*. 2019, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE.

146. *Geothermal Energy Plant*. 2018; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Geothermal_Energy_Plant.jpg.
147. Kumari, W., et al., *Mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite under in-situ stress and temperature conditions: An application to geothermal energy extraction*. Geothermics, 2017. **65**: p. 44-59.
148. Cunha, R. and P. Bourne-Webb, *A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. **158**: p. 112072.
149. Amatya, B., et al., *Thermo-mechanical behaviour of energy piles*. Géotechnique, 2012. **62**(6): p. 503-519.
150. Stewart, M.A. and J.S. McCartney, *Centrifuge modeling of soil-structure interaction in energy foundations*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014. **140**(4): p. 04013044.
151. ; Available from: <https://www.ssi.shimadzu.com/products/fatigue-testing/usf-2000a.html>.
152. ; FBG Strain Sensor]. Available from: http://www.idealphotonics.com/mod_product-view-p_id-404.html.
153. ; boston instruments]. Available from: http://www.bostoninstruments.com/efbg_sensor.html.
154. Xu, Y. and J.M. Brownjohn, *Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018. **8**(1): p. 91-110.
155. Feng, D., et al., *A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement*. Sensors, 2015. **15**(7): p. 16557-16575.
156. Perez-Alfaro, I., et al., *Low-Cost Piezoelectric Sensors for Time Domain Load Monitoring of Metallic Structures During Operational and Maintenance Processes*. Sensors, 2020. **20**(5): p. 1471.
157. Mosalam, K.M., S. Günay, and S. Takhirov, *Response evaluation of interconnected electrical substation equipment using real-time hybrid simulation on multiple shaking tables*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016. **45**(14): p. 2389-2404.
158. ; creep long term]. Available from: http://www.besmaklab.com/Products/14/Long_Time_Creep_Testing_Machine/1.
159. ; creep 10000 hours long term]. Available from: <https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/creep-testing-machines/kappa-ss-cf/>.
160. Harris, D.K. and M.S. Dizaji. *Preserving Coastal Infrastructure through the Design and Implementation of Image-Based Structural Health Monitoring (iSHM)*. in *iSHM*. 2019.
161. ; Acoustic Emission]. Available from: <https://mistrasgroup.co.uk/products-and-systems/ae-systems/>.

