کنترل سازه ای و تحلیل خستگی توربین بادی پایه کششی شناور فراساحلی با استفاده از میراگر جرم تنظیم شونده

حميد حكم آبادى'، عليرضا مجتهدى"*، محمدعلى لطف اللهى يقين "

^۱ کارشناس ارشد سازه های دریایی، دانشگاه تبریز، h.hokmabady@gmail.com ۲ استادیار، دانشگاه تبریز، mojtahedi@tabrizu.ac.ir ۳ استاد، دانشگاه تبریز، a_lotfollahi@yahoo.com

چکیدہ	اطلاعات مقاله
با افزایش روز افزون استفاده از انرژی بادی، توربینهای بادی فراساحلی سهم قابل توجهی از تولید این	ناریخچه مقاله:
انرژی را برعهده گرفتهاند. این توربینها به دلیل قرارگیری در محیط دریا متحمل بارهای دینامیکی قابل	تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۳۰
توجه و طولانی مدت می شوند. وجود چنین بارهایی موجب ایجاد خستگی در اعضای مختلف سازهای	ناریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۲
فراساحلی و این نوع توربینها میشود. خرابی بواسطه خستگی، یکی از اصلیترین دلایل خرابی در سازه	
های فراساحلی به شمار میآید. یکی از بهترین راههای کاهش بارهای خستگی، کاهش ارتعاشات در سازه	كلمات كليدى:
است. در این مطالعه بمنظور کاهش ارتعاشات در توربین، از یک میراگر جرم تنظیم شونده با جرمهای	توربین بادی
مختلف، در قسمت ناسل توربین بهره گرفته شده و میزان کاهشها ارتعاشات در درجات آزادی مختلف	پايه كششى شناور
توربین با حضور میراگرها مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی میراگرها بواسطه کد FAST-SC انجام	ميراگر جرم تنظيم شونده
پذیرفته است. نتایج نشان میدهد که حضور میراگر در ناسل توربین میتواند موجب کاهش گشتاورهای	خستگی
پای برج توربین و نتیجتا کاهش بارهای خستگی در برج توربین میشود. میتوان چنین عنوان نمود که	زمان لازم تا خرابی
افزایش جرم میراگر تا حدود ۲۱ تن، میتواند موجب کاهش قابل توجه تر ارتعاشات مختلف گردد	
همچنین نتایج حاکی است که کاهش گشتاورهای پای برج توربین به دلیل کاهش ارتعاشات میتواند	
موجب افزایش زمان لازم تا خرابی توربین (طول عمر توربین) شود.	

Structural Control and Fatigue Analysis of Offshore TLP Wind Turbine Using TMD

Hamid Hokmabady¹, Alireza Mojtahedi², Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin³

¹ MSc of Marine Structure, University of Tabriz; h.hokmabady@gmail.com ² Assistant Professor, University of Tabriz; mojtahedi@tabrizu.ac.ir

³ Professor, University of Tabriz; a_lotfollahi@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History: Received: 21 sep. 2014 Accepted: 3 Nov. 2015

Keywords: Wind Turbine TLP TMD Fatigue Time until Failure

ABSTRACT

As wind power continues its rapid growth worldwide, Offshore Wind Turbines (OWTs) are likely to comprise a significant portion of the total production of wind energy. These kinds of wind turbines cause of their placement environment should resist in great stormy conditions, which cause fatigue failures. Fatigue loads are one of the main failure reasons in offshore structures. One of the best ways for decreasing these kinds of loads is reducing the structure vibration. In this research application of a tuned mass damper with different masses, in an offshore Tension Leg Platform (TLP) is investigated. Tuned Mass Dampers (TMDs) modeled in a developed code FAST-SC. Results show that using TMD in the nacelle can reduce the moments in the base of the tower and turbine vibration. This reduction can also increase time until failure factor of the OWTs.

DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.2.8

۱ – مقدمه

با افزایش روز افزون استفاده از انرژی بادی، توربینهای بادی فراساحلی سهم قابل توجهی از تولید این انرژی را برعهده گرفته اند. یک توربین بادی فراساحلی به دلیل قرارگیری در محیط دینامیکی دریا باید مقاومت کافی برای حفظ پایداری و بهرهبرداری داشته باشد. اصلى ترين عوامل ايجاد كننده محيط ديناميكي دريا موج و باد میباشند که این عوامل نیز ایجاد کننده لرزشهای سازه ای، بارهای خستگی و بارهای حداکثر در پرهها، فونداسیون، بـرج و دیگر اجزای توربین بادی هستند. در میان تمامی انواع بارهای وارده، بارهای خستگی، موجب افزایش نیاز به نگهداری سازه، هزینه های بالا و خرابی می گردد. یکی از بهترین راههای کاهش بارهای خستگی، کاهش ارتعاشات سازه و کاهش بارهای وارد بر آن است. تکنیکهای کنترل سازهای مختلفی به منظور کاهش ارتعاشات در سازه وجود دارد که در این بین روش کنترل غیرفعال رایجترین آنهاست. در بین دستگاههای مختلف کنترل غیرفعال، میراگر جرم تنظیم شونده (TMD)، نقش بسزایی را در توربینهای بادی فراساحلی داشته که این به دلیل عملکرد بالا و هزینههای پایین آن بوده است. به منظور کاهش ارتعاشات و بارهای وارده بر توربین های بادی تحقیقات بسیاری انجام شده است. در سال ۲۰۰۸ مورتاژ و همکارانش از یک روش کنترل سازه ای غیر فعال به منظور کاهش لرزش های ایجاد شده در توربین بادی استفاده نمود، وی بررسی نمود که استفاده از یک میراگر جرم تنظیم شونده به چه میزان میتواند لرزش های ایجاد شده در یک توربین بادی پایه ثابت را کاهش دهد [1]. کال ول و همکارانش در سال ۲۰۰۸ وجود میراگر مایع تنظیم شونده را در یک توربین بادی فراساحلی مونوپایل به منظور کاهش لرزشهای توربین بادی مورد بررسی قرار دادند، آنها به این نتیجه رسیدند که وجود یک میراگر مایع تنظیم شونده میتواند جابجایی حداکثر توربین را تا ۵۵ درصد کاهش دهد [۲]. استوارت در سال ۲۰۱۲ تاثیر وجود میراگر جرمی تنظیم شونده بر روی چند نوع توربین بادی شناور را بررسی نمود، وی بیان نمود که وجود میراگر جرمی تنظیم شونده میتواند باعث کاهش ۶۰ درصدی آسیبها و کاهش ۴۰ درصدی گشتاور خمشی ایجاد شده در برج می شود [۳]. در سال ۲۰۱۰ لاکنر برای اولین بار كنترل غير فعال، نيمه فعال و فعال ميراگر جرمي تنظيم شونده را روی توربین بادی فراساحلی بارج بررسی نمود، نتیجه تحقیقات وی منتج به توسعه دادن نرم افزار FAST-SC گردید، وی در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که با استفاده از کنترل غیرفعال میراگر جرم تنظیم شونده میتوان میزان بارهای وارده بر سازه را کاهش داد [۴].

نظر به این که در بین تحقیقات انجام شده، پژوهشی که به بررسی رفتار ارتعاشی توربین پایه کششی شناور پرداخته و کنترل غیر

فعال این نوع توربین را مطابق روش بکار گرفته شده در این پژوهش مورد ارزیابی قراردهد، مشاهده نگردید، در این پژوهش کنترل سازهای توربین بادی فراساحلی پایه کششی شناور، مورد ارزیابی و رفتار لرزهای آن، مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر کنترل سازهای توربین، در زمان لازم تا خرابی توربین به عنوان یکی از پارامترهای خستگی، مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲ - توربینهای بادی و انواع آن

امروزه توربینهای بادی ساحلی، انتقالی و فراساحلی به دلیل وسعت زیاد دریاها و سواحل و در ضمن ارزش بالای زمین و قابل استفادهتر بودن آن، بیشتر مورد توجه قرار گرفتهاند. این نوع توربین ها همانند سکو های نفتی، با توجه به میزان عمق آب دارای سیستم های عملکرد مختلفی هستند که طراحی و ساخت و نصب هریک از آنها هزینههای متفاوت و قابل توجهی را شامل میشود. تا به امروز توربین های فراساحلی مختلفی، به منظور استفاده در مناطق آب و هوایی و جغرافیایی مختلف، طراحی و ساخته شده است. یکی از اصلیترین روش های طبقه بندی توربین های فراساحلی براساس عمق آبی است که در آن قرار می گیرند. توربین-هایی بادی با فونداسیون ثابت، در آبهایی تا عمق ۶۰ متر کاربرد دارند، فونداسیون این نوع توربین ها به طور کلی به دو نوع فونداسیون آب های کمعمق، که در عمق آب از صفر تا ۳۰ متر کاربری دارند، فونداسیون آبهای انتقالی که در عمق آب بین ۳۰ تا ۶۰ متر کاربری دارد. و نوع دیگر مربوط به فونداسیون آبهای عمیق است که برای آبهایی با عمق بیش از ۶۰ متر کاربرد دارنـد [۵].

با افزایش عمق آب به بیش از ۶۰ متر، مشکلات فراوانی برای هزینههای نصب و ساخت فونداسیون ثابت برای توربین های بادی فراساحلی بوجود میآید، به همین منظور در آبهای عمیق از انواع دیگر تکنولوژیهای شناوری استفاده می شود. آبهای عمیق شامل بیشترین سرعتهای باد هستند که نیازمند تکنولوژی فراساحلیای به منظور مقاومت در برابر این نیروی وارده از طرف باد هستند. این نوع توربینها به مقدار قابل توجهی مستقل تر از شرایط کف دریا عمل می کنند و می توانند در مناطق مختلفی نصب گردند. در حالت کلی سه نوع سیستم فونداسیون مختلف برای این نوع توربین ها وجود دارد که شامل، سیستم شناوری اسپار، بارج و پایه کششی است. فونداسیونهای اشاره شده، هریک از روش خاصی به منظور حفظ پایداری خود استفاده میکنند. شکل ۱ نشان دهنده انواع فونداسیون توربینهای بادی فراساحلی است. توربینهای بادی با فونداسیون پایه کششیها به منظور حفظ تعادل خود از کابلهای مهاری استفادہ میکنند. این سیستمھا شامل یک اسپار مرکزی بمنظور ایجاد شناوری مورد نیاز هستند و در کنار این دو مورد وزنه

متعادل کنندهای نیز به منظور ایجاد تعادل در برابر هر نوع حرکتی در این سیستمها وجود دارد.

توربینهای بادی نیز همانند دیگر انواع سازه ها مجموعه نرم افزارهایی را برای طراحی خود دارند که در این میان میتوان به کد FAST اشاره نمود.



شکل ۱ – انواع فونداسیون توربینهای بادی فراساحلی [۷]

این کد یک شبیه ساز آیرو-سروو-الاستیک غیرخطی در دامنه زمان است که برای پیش بینی بارهای حداکثر و خستگی در توربینهای محور افقی دو پره و سه پره میباشد [۳]. این کد توسط آزمایشگاه انرژیهای تجدید پذیر ایالات متحده تهیه و تدوین شده است. به منظور طراحی توربین بادی برای مقابله با دو نیروی باد و موج، این نیروها در نرم افزار FAST توسط دو زیر برنامه محاسبه میشوند. فایل اطلاعات باد را با استفاده از زیر برنامه برنامه این کد محاسبه میگردند.

۳ – کنترل سازهای توربین بادی

هر سازهای که ساخته میشود در طول عمر خود با احتمال وقوع بارگذاریهای بحرانی از جمله تحریکات جانبی ناشی از موج، زلزله، باد و… مواجه میشود که در صورت وقوع هریک از آنها، سازه باید مقاومت کافی داشته باشد. در سالهای اخیر به دلیل نیاز روز افزون بشر، محدودیتهای موجود در روشهای طراحی سنتی شامل میرایی اندک سیستمهای سازهای و مصالح، جهت جذب انرژی بارهای دینامیکی و دارابودن خواص دینامیکی ثابت و غیرقابل تطبیق با بارهای دینامیکی خارجی، موجب ایجاد روشهای نوین و سازهای و خسارات وارده شده است. سیستمهای کنترل سازهای به منظور کاهش لرزشهای ناخواستهای هستند که به هر دلیلی بر منظور کاهش لرزشهای ناخواستهای هستند که به هر دلیلی بر

میتوانند به شکلهای مختلفی طراحی شوند. روشهای کنترل سازه شامل سیستم کنترلی غیرفعال، سیستم کنترلی نیمه فعال، سیستم کنترلی فعال و سیستمهای کنترلی ترکیبی است [۶]. سیستم بکار گرفته شده در این پژوهش سیستم کنترل غیرفعال است.

سیستمهای کنترل غیرفعال را میتوان سیستم اتلاف انرژی دانست که با استفاده از برخی ابزارها و مواد، سختی و میرایی سازه را افزایش میدهند. سیستمهای کنترل غیرفعال نیاز به هیچگونه منبع انرژی خارجی ندارند. این سیستمها قابل اعتماد بحساب می -آیند چون ابزارها عموما بر اساس اصولی مانند لغزش اصطکاکی، جاری شدن فلز، اختلاف فاز حركت، تغییرات ویسکوالاستیک مایعات و جامدات عمل میکند. در بین ابزارهای مختلف اتلاف گر انرژی در سیستم کنترلی غیر فعال میراگر جرم تنظیم شونده به دلیل عملکرد بالا و هزینهی پایین آن بسیار مورد توجه بوده است. در سیستم میراگر جرم تنظیم شونده، وزنهای به جـرم مشـخص در محلی از سازه نصب می شود و تنها توسط یک فنر و یک میراگر با ضریب سختی و میرایی معین به سازه وصل می گردد. با انتخاب مقادیر مناسب برای جرم و ضریب سختی فنر و ضریب میرایی میراگر، دامنهی ارتعاشات سازه در مود اول کنترل می گردد. در صورتی که این میراگر بصورت غیرفعال در سازه به کار گرفته شود باید با مود اول سازه که مهمترین فرکانس تحریک سازه است تنظیم شود تا بیشترین میزان کاهش جابجایی-ها در سازه را در پی داشته باشد [۵]. از میان ابزارهای مختلف اتلاف گر انرژی برای سیستمهای کنترل غیرفعال، در این پژوهش از میراگر جرم تنظیم شونده استفاده شده است. استفاده اولیه از میراگرهای تنظیم کننده در جهت کاهش اثرات تحریک باد بر روی سازهها بوده است [۶]. لازم به ذکر است که میراگر تنظیم شونده در صورتی که بصورت غیر فعال در سازه بکار گرفته شود، میتواند تنها برای یک فرکانس مشخصی از سازه اصلی تنظیم شود که این فرکانس معمولا فرکانس مود اول سازه میباشد. مود اول در حقیقت محتمل ترین نوع پاسخ سازه به تحريكات وارد شده است، هر چه مودها بالاتر ميروند به دلیل افزایش فرکانس احتمال وقوع کمتری دارند، عموما در سازه ها سه مود اول به منظور طراحی در محاسبات مورد بررسی قرار می گیرد که در این میان مود اول به دلیل احتمال رخداد بالا بیشترین نقش را دارد. هرگاه تحریک خارجی به نحوی باشد که سهم مودهای بالاتر در پاسخ سازه نسبت به مود اول قابل توجه باشد، در این صورت ممکن است سیستم جرم تنظیم شونده اثر معکوسی داشته و دامنه ارتعاشات را بیشتر نماید، توربین بادی فراساحلی نیز در صورتی که جهت جریان و باد در راستای فور افتر باشد، در همین راستا نیز دارای بیشترین میزان ارتعاش خواهد بود،

پس کاهش این ارتعاش که در مود اول راستای فور -افتر بیشـترین میزان خواهد بود میتواند به عنوان هدف پژوهش تعیین گردد. به منظور کنترل سازهای توربین های بادی فراساحلی کدی به نام کد FAST-SC توسط لاکنر و همکارانش در سال ۲۰۱۰ تهیه گردیده که این کد، نسخه توسعه داده شده کد اصلیFAST به منظور کنترل سازه ای توربینهاست. این کد که تمامی توانایی های کد FAST را داراست، قابلیت شبیه سازی کنترل غیرفعال سازهای توسط میراگر جرمی تنظیم شونده را دارد. در این کد دو میراگر جرم تنظیم شونده که بطور مستقل از هم عمل میکنند گنجانده شدهاند. به منظور مدل نمودن سیستم میراگر در یک توربین بادی لاکنر و همکارانش با درنظر گرفتن حضور میراگرها در ناسل توربین و با بهره گیری از دینامیک Kane که مبنای نرم افزار FAST نیز هست، اقدام به استخراج معادلات حركت نمودند، معادلات حركت جدید شامل معادلاتی به همراه معادلات مرتبط با میراگرها بود که به دلیل نوشتاری بودن فایل ورودی، بخشی برای وارد شدن پارامترهای مختلف میراگرها از جمله جـرم، میرایـی و سـختی در فایل اصلی ورودی گنجانده شد [۴]. میراگرهای شبیه سازی شده در این کد در ناسل توربین قرار دارند و قابلیت جابه جایی در دو مود حركتى توربين يعنى مود فور⊣فتر (Fore-After) و سايد-سايد (Side-Side) را دارا می باشند، شکل ۲ اجزا مختلف توربین بادی و نیز راستاهای حرکتی توربین را نشان میدهد.



شکل ۲ – اجزا و راستاهای حرکتی توربین بادی

۳-۱- توربین ۵ مگاواتی پایه کششی شناور

در این پژوهش کنترل سازهای توربین بادی ۵ مگاواتی پایه کششی شناور فراساحلی به عنوان یکی از توربینهای رایج در امر تحقیقات دانشگاهی و مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است، این توربین توسط آزمایشگاه انرژیهای تجدید پذیر ایالات متحده طراحی شده است.

به منظور کنترل سازهای این توربین از یک میراگر جرم تنظیم شونده در ناسل توربین بهره گرفته شده است که میراگر در راستای فور افتر توربین قابلیت جابهجایی دارد. مشخصات توربین ۵ مگاواتی مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

کششی	يايه	مگاواتی	۵	بادى	توربين	- مشخصات	- 1,	حدول
G				U .	0			

مقدار	مشخصه
۵ مگاوات	قدرت توربين
۳ پره، بطول ۶۱/۵ متر	پیکربندی روتر
۱۲۶ متر، ۳ متر	قطر روتر، هاب
۹۰ متر	ارتفاع هاب
	سرعت باد:
۳ متر برثانیه	سرعت باد شروع به کار
۱۱/۴ متر برثانیه	سرعت باد در حال کار
۲۵ متر بر ثانیه	سرعت باد اتمام کار
۱۱۰۰۰۰ کیلوگرم	جرم روتر
۲۴۰۰۰۰ کیلوگرم	جرم ناسل
۳۴۷۴۶۰ کیلوگرم	جرم برج
۶ متر	قطر پایه ی برج
۳/۸۷ متر	قطر بالای برج

به منظور معرفی مشخصات توربین، فایلهای ورودی نرم افزار FAST که فایلهای نوشتاری هستند، به نرم افزار معرفی شدند. به منظور بررسی، از ۲ سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و ۱۸ متر بر ثانیه استفاده گردید، این انتخاب به نحوی انجام گردید که سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه بین سرعت بادهای شروع به کار و در حال کار و سرعت باد ۱۸متر بر ثانیه بین سرعت باد در حال کار و اتمام کار توربین قرار داشته باشند. به منظور داشتن قابلیت آشفتگی که یکی از اصلی ترین پارامترهای نیروهای آیرودینامیکی است، از نرم افزار نوشته شده توسط آزمایشگاه ملی انرژی های تجدید پذیر ایالات متحده است که به منظور شبیه سازی آشفتگی در نیروی باد طراحی شده است [۷]، فایل خروجی این نرم افزار که فایل اطلاعات باد است به عنوان ورودی زیر برنامه AcroDyn به نرم افزار FAST معرفی گردید.

پیش بینی ارتفاع موج در کارهای مهندسی عموما بواسطهی طیف های موج انجام میشود. یکی از رایجترین طیفهای موج، طیف

موج جانسوپ (JONSWAP) است. به دلیل این که موج نیز منشا بادی دارد و این که توربینهای بادی باید برای هر دو نیروی باد و موج طراحی و محاسبه شوند، ارتفاع و پریود موج شاخص در این پژوهش بواسطه فرمول بندی این طیف بدست آمد، در این فرمول بندی پیش بینی ارتفاع و پریود موج بواسطه طول بادخور و سرعت باد انجام می شود [۸]. مشخصات مربوط به دادههای محیطی استفاده شده در جدول ۲ آورده شدهاند. فرمول های محاسبه ارتفاع موج شاخص بواسطه سرعت باد بصورت زیر می باشند.

$$W_A = 0.71 \, W^{1.23} \tag{1}$$

$$\frac{gH_s}{W_A} = 0.0016 \left(\frac{gF}{W_A^2}\right)^{0.5}$$
(7)

$$\frac{gT_s}{W_A} = 0.286 \left(\frac{gF}{W_A^2}\right)^{0.33} \tag{(7)}$$

در این فرمولها، W و W_A به ترتیب سرعت باد و سرعت باد اصلاح H_s شده هستند که هر دو بر حسب متر بر ثانیه تعیین می شوند، مقدار مقدار ارتفاع موج شاخص، T_s مقدار پریود موج شاخص، g مقدار شتاب گرانش زمین و F مقدار طول بادخور است.

جدول ۲ - مشخصات محیطی انتخاب شده			
مقدار	مشخصه		
۲۰۰ متر	عمق آب		
۱۰۰ کیلومتر	طول بادخور		
۳ متر	ارتفاع موج شاخص برای سرعت باد ۱۰ متر برثانیه		
۶/۴۵ ثانیه	پريود موج شاخص برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانيه		
۴ متر	ارتفاع موج شاخص برای سرعت باد ۱۸ متر برثانیه		
۸/۲۵ ثانیه	پریود موج شاخص برای سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه		

به منظور کنترل سازهای توربین پایه کششی، در این پژوهش از میراگرهای با وزن ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ تن، بهره گرفته شده که هریک به ترتیب دارای وزنی برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی جـرم بـالای سکوی توربین هستند. علت این انتخاب رایج بودن درصدهای وزنی عنوان شده به عنوان مبنای وزنی میراگرهـای TMD در مهندسـی عمران است. به علـت ایـن کـه تـوربین پایـه کششـی دارای رفتـار پیچیدهای است و تعریف یک مدل با درجه آزادی محدود برای این توربین زمانگیر و پیچیده است، به منظور محاسـبهی ثابـت فنـر و افزار FAST-SC استفاده شد. نحوه انجام کار بر این اساس بود که افزار مقداری برای ثابت میرایی، به عنوان مقدار اولیه درنظر گرفتـه شد و سپس مقدار ثابت فنر با آنالیزهای مختلف در نرم افزار تغییـر بدست آید، سپس ثابت فنر بای آن با بررسی مقدار جابجـایی حـداکثر بدست آید، سپس ثابت فنر بهینه بدست آمده، ثابت در نظر گرفتـه

شده و مقدار بهینهای برای ثابت میرایی با آنالیزهای مختلف بدست آمد.

مقادیر فرکانس طبیعی سازه با استفاده از آنالیز خطی سازی شده نرم افزار FAST بدست آمد و پارامترها به نحوی تعیین شدند که فرکانس طبیعی میراگر تقریبا با فرکانس طبیعی سیستم برابر باشد. مشخصات میراگرهای انتخابی و پارامترهای مربوط به آنها در جدول ۳ آورده شدهاند.

ابت میرایی	ثابت فنر ث	جرم میراگر ها	درصد
(N/m/s)	(N/m)	(Kg)	جرمى
1	17	γ	۱ درصد
14	۲۳۰۰۰	14	۲ درصد
۲۵۰۰	۳۰۰۰۰	71	۳ درصد
4	4	۲۸۰۰۰	۴ درصد

جدول ۳ - مشخصات میراگرهای انتخابی

۲-۳- صحت سنجی دادهها

مدل استفاده شده در این، پژوهش همانطور که اشاره شد یک توربین بادی پنج مگاواتی پایه کششی شناور است، دادههای مربوط به این توربین در سایت آزمایشگاه ملی انرژی های تجدید پذیر ایالات متحده موجود بوده و به صورت متعددی توسط پژوهشگران و محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱، ۱۰، ۹]. به منظور صحت سنجی دادههای مورد استفاده برای TMD، یک میراگر با جرم و مشخصات نشان داده شده در جدول زیر مورد استفاده قرار گرفت که توسط استوارت و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز بکار گرفته شده بود [۲۲].

جدول ۳ – مشخصات میراگر مورد استفاده توسط استوارت و همکاران

سختی	میرایی	جرم	پارامتر
N/m	N-s/m	Kg	
1220.	17	۱۰۰۰۰	مقدار

میراگر مورد استفاده در پژوهش استوارت برای یک توربین بادی پنج مگاواتی پایه کششی مشابه بود که برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی این صحت سنجی پارامتر مورد مطالعه توسط استوارت و همکاران مربوط به آسیب خستگی در جهت فور افتر توربین بود که به همین دلیل این پارامتر نیز در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت و میزان تفاوت نتایج نسبت به حالت کنترل نشده توربین، مقایسه گردید، نتایج گرفته شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۴ می توان چنین عنوان نمود که به دلیل خطای تقریبا ۲ درصدی در نتایج دو پژوهش انجام پذیرفته، داده های مورد استفاده در این مطالعه قابل استناد خواهند بود.

جدول ۴ – صحت سنجی پارامتر آسیب خستگی در راستای فور –افتر برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه

آسیب خستگی جهت فور ⊣فتر (kNm)	پارامتر
۳۳۶۸۴	كنترل نشده
877.8	نتيجه استوارت و همكاران
٣٢٧٩٠	نتيجه اين پژوهش
	میزان کاهش نسبت به
۱/۶ درصد	حالت كنترل نشده
	میزان درصد اختلاف با
۱/۸ در صد	نتيجه استوارت و همكاران

۴- ارزیابی خستگی در توربین بادی فراساحلی

طراحی اکثر توربینهای بادی بجای بارهای حداکثر، برای بارهای خستگی انجام می پذیرد. به همین دلیل، در این پژوهش نیز به منظور بررسی خستگی، تاثیر کنترل سازهای انجام شده بواسطه میراگر جرمی تنظیم شونده در کاهش بارهای وارد بر پای برج یک توربین بادی فراساحلی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بررسی خستگی در توربینهای بادی باید طبق اصول بیان شده در استاندارد ۱-۶۱۴۰۰ انجام شود. طبق این استاندارد باید ترکیب بار DLC1.2 در محاسبات در نظر گرفته شود. مطابق این ترکیب بار باید علاوه بر درنظر گرفته شدن بارگذاری اعمالی بواسطه ارتفاع و پریود طراحی در طول مدت زمان خستگی برای سازه، باید بازه وسیعی از ارتفاعات موج و پریودها که در جهات مختلف به سازه وارد می شوند، در محاسبات درنظر گرفته شوند. برای بررسی این ترکیب بار همانطور که عنوان شد، بازهی وسیعی از ارتفاعات موج و پریودهای مربوطه در کنار سرعت بادهای مختلف، در محاسبات، درنظر گرفته شد [۱۳]. به منظور انجام محاسبات خستگی در این پژوهش، حالت سه بعدی جهات موج و باد تنها به صورت یک بعدی جهت ساده سازی مسئله درنظر گرفته شدند. این بدین معنی است که تمامی ورودیهای موج و باد تنها در راستای فور ⊣فتر توربین بـر آن وارد گردیدند. در نظر گرفتن نیروی موج به دلیل منشا بادی بودن موج نیازمند اطلاعات بادی است. اما در کنار این موضوع اثرات خود نیروی باد باید بطور جداگانه مورد بررسی قرار بگیرد. به همین منظور ۱۲ سرعت باد مختلف یعنی از ۲ تـ ۲۴ متـر بـر ثانیـه بـ ا فواصل ۲ متر بر ثانیهای در نظر گرفته شد، اما بدلیل تفاوت نیروی باد در هنگام وزش، سرعت بادهای در نظر گرفته شده هریک با ۶ فايل اطلاعات باد مختلف محاسبه گشتند. اين فايل هـاى اطلاعـات باد به منظور داشتن قابلیت آشفتگی مجددا توسط نرم افزار

TurbSim محاسبه گردیدند. در نهایت به تعـداد ۷۲ آنالیز بـرای بررسی خستگی و بررسی تفاوت حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده انجام شد. برای هر سرعت باد در نظر گرفته شده، یک ارتفاع موج و پریود شاخص نیز با روش بیان شده، بدست آمد. جهت آنالیز خروجـیهای گرفتـه شـده از دو نـرم افـزار FAST و جهت آنالیز خروجـیهای گرفتـه شـده از دو نـرم افـزار I۴]. ایـن کد نیز توسط آزمایشگاه ملی انرژیهای تجدید پذیر ایالات متحـده تهیه شده، یک کد نوشته شده در نرم افزار متلب برای پس پردازش اطلاعات شبیه سازی شده توسط کدهایی همچـون FAST جهـت محاسبه پارامترهای مختلف خسـتگی است. ایـن کـد بـه منظـور محاسبه آماری اطلاعات و تخمین خستگی برای یک یا چند سـری

اطلاعات سبیه ساری سده توسط کدهایی همچون ۲۸۵۱ جهت محاسبه پارامترهای مختلف خستگی است. این کد به منظور محاسبه آماری اطلاعات و تخمین خستگی برای یک یا چند سری اطلاعات خروجی گرفته شده است [1۵]. به عنوان پارامترهای ورودی این نرم افزار، مقدار ۲۰ سال برحسب ثانیه یعنی مقدار ورودی این نرم افزار، مقدار ۲۰ سال برحسب ثانیه یعنی مقدار مقدار شیب مربوط به نمودار N-S فرض گردیده و دو کانال بررسی برای گشتاورهای پای برج توربین معرفی گردید تا زمان لازم تا خرابی برج توربین بواسطه گشتاورهای پای برج توربین محاسبه گردد.

۵ – نتیجه گیری

در این پژوهش کنترل سازهای یک توربین ۵ مگاواتی پایه کششی شناور بواسطه میراگر جرم تنظیم شونده با اجرام مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و رفتار سازه با حضور این میراگرها بررسی گردید. میراگرهای مورد استفاده تماما در ناسل توربین قرار داشته و اجرامی درحدود ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد جرم بالای سکوی توربین، یعنی ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ تی را دارا بودند. هدف از این پژوهش بررسی میزان کاهش پاسخ ارتعاشی سازه در درجات آزادی مختلف بود، در راستای همین هدف میزان زمان لازم برای خرابی سازه تحت دو پارامتر گشتاورهای پای توربین نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصله در حیطه این پژوهش را میتوان بصورت زیر خلاصه نمود. نتایج مربوط به پژوهش انجام شده در دو بخش مورد انجام شده توسط اجرام مختلف میراگر پرداخته میشود و در بخش دوم به بررسی پارامتر زمان لازم تا خرابی توربین مورد ارزیابی قرار میگیرد.

۵–۱– نتایج کنترل سازه ای توربین

پاسخ تاریخچه زمانی پارامترهای مختلفی از توربین همانند جابجایی بالای توربین در دو راستای ساید-ساید و فور افتر انجام گردید. تمامی این پاسخها در زمانی برابر با ۳۰۰ ثانیه با گامهای زمانی ۱۲۵ /۰۱۲۰ انجام شد تا رفتار توربین قابل بررسی باشد. این



شکل ۳ – پاسخ تاریخچه زمانی جابجایی بالای توربین در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده در راستای فور ⊣فتر (الف): سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، (ب): سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه

راستای فور -افتر شده است، ایـن کـاهش در مقـدار حـداکثر خـود حدود ۴۴/۲ درصد در سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه بوده و در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه حدود ۱۵/۷ درصـد بـوده کـه مقـادیر حـداکثر کاهش هر دو برای میراگر ۲۸ تنی بوده است. نمودار شکل ۵ پاسخ تاریخچه زمانی جابجایی بالای توربین در راسـتای سـاید-سـاید را نشان میدهد. با توجه به نمودارهای شکل ۵ میتوان دریافت که در راستای ساید-ساید توربین نیز بدلیل استفاده از میراگـر در ناسـل، حتی با وجود این که درجه آزادی میراگر مورد استفاده در راستای فور -افتر توربین بوده است، اما اسـتفاده از میراگـر در ناسـل، جابجاییها در راستای ساید-ساید توربین شده که این موضوع نیـز بیانگر مثبت بودن استفاده از میراگر مورد استفاده در ناسـل جابجاییها در راستای ساید-ساید توربین شده که این موضوع نیـز جابجایی بالای توربین در راستای ساید-ساید، دیگر اجـرام میراگـر جابجایی بالای توربین در راستای ساید-ساید، دیگر اجـرام میراگـر های جرمی تنظیم شونده است، این نمودار نیز حـاکی از آن است آنالیزها برای تمامی میراگرها جرمی انجام گردید، نتایج مربوطه برای میراگر جرمی ۲۱ تنی نمایش داده شده است. نمودارهایی نیز جهت مقایسه یدیگر میراگرها با میراگر ۲۱ تنی مورد بررسی، نمایش داده شده اند. همانطور که نمودارهای شکل ۳ نشان می-دهد، کاربرد میراگر ۲۱ تنی در توربین بادی فراساحـلی موجب کاهش جابجایی در بیشتر لحظات در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و برای تمامی لحظات در سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه بوده است. مقایسه این دو نمودار حاکی از آن است که حضور میراگر و موثرتر بوده و منجر به کاهش بیشتر جابجایی میگردد. نمودار شکل ۴ جابجایی بالای توربین در راستای فور افتر را برای دیگر اجرام میراگرهای جرمی تنظیم شونده را نشان میدهد. این نمودار حاکی از آن است که میراگر برای دیگر سرعت باد میراگرهای جرمی تنظیم شونده را نشان میدهد.

Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-24]





که افزایش جرم میراگر برای هر دو سرعت باد موجب کاهش بیشتر جابجایی در بالای توربین در راستای فور –افتر شده است، با توجه به نمودارهای شکل ۶، با وجود کاهش حادث شده در راستای ساید–ساید توربین بخاطر استفاده از میراگر در ناسل، به دلیل ایـن که درجه آزادی میراگر مورد استفاده در راستای فور –افتـر تـوربین بوده است، مقدار افزایش جرم میراگر تاثیر قابل تـوجهی در بیشـتر شدن میزان کاهش تها نداشته است. اما با این حال، افزایش جـرم میراگر به ۲۸ تن، کاهش ۲۶ درصدی جابجایی تها را در سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه موجب شده که این میزان نسبت بـه جـرم ۷ تنـی میراگر، تنها ۴ درصد بیشتر بوده است. در سرعت باد ۱۰ متر بـر ثانیه، افزایش جرم میراگر به ۲۸ تن موجب کاهش ۴/۲۱ درصـدی جابجایی شده و این میزان کاهش برای جرم ۷ تنی ۵/۶ درصد بوده حله که نشان از افزایش تقریبا ۷ درصدی جابجایی است و ایـن در حالی است که مقدار حـداکثر جابجایی در این نمودار در سـرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه برای میراگر ۴۱ تنی بوده است.





نتایج مربوط به کاهش و یا افـــزایش جابجایی ها در درجات آزادی مختلف، مورد بررسی در توربین به دلیل حضور میراگرهای مختلف در ناسل، در دو جدول ۵ و ۶ آورده شده اند، جدول ۵ نتایج مربوط به جابجاییها برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و جدول ۶ برای سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه است. کاهش جابجاییهای توربین زمانی ارزشمند خواهد بود که میزان بارهای وارد بر قسمتهای مختلف توربين يا بعبارت بهتر تنشهاى وارد بر اعضاى مختلف توربین کاهش پیدا کند، به منظور بررسی این مورد، در این پژوهش میزان گشتاور وارد بر پای برج را که پارامتر تاثیرگذاری در خستگی پای برج توربین است مورد بررسی قرار داده شده است. گشتاورهای پای برج در دو راستای فور ⊣فتر و ساید-ساید بررسی گردیده و تاثیر حضور میراگر در توربین در این گشتاورها ارزیابی شده است. بمنظور بررسی گشتاور یای برج و مقایسه ی میزان کاهش یا افزایش آن، تنها آنالیز برای میراگر ۲۱ تنی و برای سرعت باد بالا یعنی ۱۸ متر بر ثانیه انجام شد. نتایج مربوط به این تحلیل در شکل ۶ نشان داده شده است. بررسی این نمودارها نشان میدهد که در حالت کلی به دلیل حضور میراگر نیروی وارد بر پای برج توربین در راستای فور⊣فتر به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا مـی-کند که این نشان از بهبود رفتار لرزهای به دلیل کنترل انجام شده است. همچنین با توجه به نمودار می توان چنین بیان کرد که درصد کاهش برای گشتاور در راستای ساید-ساید بیشتر از راستای فور-افتر بوده است، اما باید توجه داشت که با وجود بیشتر بودن میزان درصد کاهش برای گشتاور راستای ساید-ساید، مقدار گشتاور در

اولين مود سا سرج سکو سوی سکو هيو سكو رول سکو

> پيچ سکو یاء سکو

راستای فور افتر کاهش بیشتری داشته که این موضوع بیانگر میزان تاثیر بیشتر میراگر در این راستا میباشد.

۵-۲- نتایج تحلیل خستگی (زمان لازم تا خرابی)

به منظور بررسی خستگی در توربین بادی، در این پژوهش، پارامتر زمان لازم تا خرابی توربین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بخش برای دو پارامتر گشتاور پای برج در راستای فور -افتر و ساید-ساید به عنوان موثرترین پارامترهای ایجاد کننده خستگی و خرابی در برج توربین مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل ۶ – درصد کاهش جابجایی بالای توربین در راستای ساید-ساید برای میراگرهای مختلف

· · · ·	میزان (کاهش + افزایش -) (درصد)			
ىم مود	میراگر ۷ تنی	میراگر ۱۴ تنی	میراگر ۱۴ تنی میراگر ۲۱ تنی میراگر ۲۸	
اولين مود فور افتر برج	$+\Delta/\lambda$	+11/٧	+1٣/۶	+1 \ / \
اولين مود سايد-سايد	+۶/۵	+10/1	+11/8	+1٣/۴
سرج سکو	+•/٣	+• / ٣	+• / ٣	+•/1
سوی سکو	$+\Delta/S$	+٩/۶	+۲۳/۷	+*•/*

جدول ۵- میزان درصد کاهش یا افزایش جابجاییها برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه

+11 / ۲	+11/7	$+1\omega/1$	$+r/\omega$	بد
+•/1	+•/ ٣	+•/٣	+• / ٣	
+ * • / *	+۲۳/۷	+ ٩ /۶	+ \ / <i>\</i>	
-17/0	- ٩ /۴	-٣/١	+ % / Y	
+ \ / \	-•/ \	-•/ A	+1/•	
+•/٨	+ ۲ / ۸	+•/ A	+•/ \	
+77/8	+77/F	+9/9	+٣/٩	

	میزان (کاهش + افزایش -) (درصد)			s 1.	
میراگر ۲۸ تنی	میراگر ۲۱ تنی	میراگر ۱۴ تنی	میراگر ۷ تنی	نام مود	
+44/2	+47/2	+ * •/ ٩	+ ٣ ٧/•	اولين مود فور -افتر برج	
+&X/W	+ ۶ •/ Y	+87/3	+ ۵۸ / ۷	اولين مود سايد-سايد	
+٣٧/١	+٣٧/١	+٣٧/١	+٣٧/١	سرج سکو	
+ Y •/ λ	+ % \/ Y	+&V\V	+ %٩/٩	سوی سکو	
+ 6 8 / 5	+& \ / \	+ 81/ 2	+87/4	هيو سکو	
+۶۴/۵	+&1/V	+&\/V	+87/V	رول سکو	
+٣۶/٧	+ ٣ ۶/٧	+۳۵/۷	+30/2	پيچ سکو	
+&&/+	+ & •/ A	+41/4	+ f •/ X	ياء سكو	





شکل ۷- نمودار تاریخچه زمانی گشتاور وارد بر پای برج برای میراگر ۲۱ تنی (الف): جهت ساید -ساید (ب): جهت فور -افتر

برای خرابی توربین شده است، در حالت کنترل نشدهی توربین میزان زمان لازم تا خرابی در پارامتر گشتاور حول محور Y پای برج توربین در حدود ۸ سال بوده که این میزان با استفاده از میراگر در ناسل در حدود ۳ سال افزایش داشته و به زمانی در حدود ۳

نتایج حاصل از انجام محاسبات برای خستگی بواسطهی اعدادی بر حسب ثانیه است که جدول ۷ نمایش دهنده نتایج مربوطه است. با توجه به این نتایج میتوان چنین عنوان کرد که حضور میراگر ۲۱ تنی در ناسل توربین بادی فراساحلی موجب افزایش زمان لازم کاهش داشته است. همچنین حضور میراگر ۲۱ تنی در ناسل توربین میتواند میزان گشتاور پای توربین را که عامل ایجاد کننده خستگی در برج توربین است، را در حدود ۵۰ درصد کاهش دهد. با بررسی میراگر منتخب ۲۱ تنی برای بررسی خستگی نیز میتوان چنین عنوان نمود که حضور این میراگر به دلیل کاهش حداکثر میزان جابجاییها و نیز گشتاور پای برج به حدود ۵۰ درصد، عمر خستگی سازه را در حدود ۳ سال برای راستای فور افتر و ۴ سال برای راستای ساید-ساید افزایش داده و زمان لازم برای خرابی سازه را نیز بصورت مشابه افزایش میدهد.

کلید واژگان

JONSWAP: Joint North Sea Wave Project OWT: Offshore Wind Turbines TLP: Tension Length Platform TMD: Tuned Mass Damper

۶ - مراجع

1- Lackner, M., Rotea, M., (2011), *Passive structural Control of Offshore Wind Turbines*, Journal of Wind Energy, Vol. 14, pp. 373–388.

2- Colwell, S., Basu, B., (2009), *Tuned Liquid Column Dampers in Offshore Wind Turbines for Structural Control*, Journal of Engineering Structures, Vol. 31, pp. 358-368.

3- Roderick, C., (2012), Vibration Reduction of Offshore Wind Turbines Using Tuned Liquid Column Dampers, Master's thesis, University of Massachusetts Amherst, April.

4- Lackner, M., Rotea, M., (2011), *Structural Control of Floating Wind Turbines*, Journal of Mechatronics, Vol. 21, pp. 704–719.

5- Franklin, Y.C, Hongping, J., Kangyu, L. (2008), Smart Structures Innovative For Seismic Response Control, Tylor and Francis Group.

6- Gawronski, W., (2004), *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*, Springer Pub.

7- Jonkman, J., Matha, D., (2009), *A Quantitative Comparison of the Responses of Three Floating Platforms*, Conf. Rep. NREL/CP-46726, National Renewable Energy Laboratory.

8- Jonkman, J., Buhl, M., (2005), *FAST User's Guide*, Tech. Rep. NREL/EL-500-38230, National Renewable Energy Laboratory.

9- Jonkman J., (2005), *Dynamics of Offshore Floating Wind Turbines – Model Development and Verification*, Journal of Wind Energy, Vol. 12, pp. 459–492.

10- Jonkman J., (2009), Model Development and Loads Analysis of an Offshore Wind Turbine on a Tension Leg Platform, with a Comparison to Other Floating Turbine Concepts, Subcontract Rep. سال رسیده است. نتیجه دیگر حاکی از آن است که به دلیل استفاده از میراگر در ناسل توربین فراساحلی مورد بررسی، میزان

جدول ۷- نتایج تحلیل خستگی (زمان لازم تا خرابی توربین برحسب

	تانية و سال)	
کنترل شده	کنترل نشده	پارامتر
۹/۷۹۱ × ۱۰ ^۸	$\Lambda/\Lambda V T \times 1$.	راستای فور –افتر حول
۳۱ سال =	۲۸ سال =	محور Y
1+/FT × 1+^	9/14 × 1+*	راستای ساید-ساید
۳۳ سال =	۲۹ سال =	حول محور X

زمان لازم برای خرابی توربین به دلیل بررسی گشتاور حول محور X افزایش پیدا کرده است. این زمان در حالت بدون کنترل در حدود ۲۹ سال بوده که به دلیل استفاده از میراگر به مقداری در حدود ۳۳ سال افزایش ۴ سالی زمان لازم برای خرابی سازه است.

۵-۳- جمع بندی

در این پژوهش کنترل سازهای یک توربین ۵ مگاواتی پایه کششی شناور بواسطه میراگر جرم تنظیم شونده با اجرام مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و رفتار سازه با حضور این میراگرها بررسی گردید، می توان چنین عنوان نمود که استفاده از میراگر جرم تنظیم شونده با اجرام مختلف، مىتواند به دليل كاهش ارتعاشات، موجب بهبود رفتار ارتعاشی توربین در تمامی درجات آزادی شود. با توجه به نتایج مربوط به میزان جابجاییها، حضور میراگر در ناسل توربین، در اکثر درجات آزادی، میتواند موجب کاهش قابل توجهی در جابجاییها شود به طوری که این کاهش در بهترین حالت برای درجه آزادی سووی سکو و بواسطهی میراگر ۲۸ تنی بوده که کاهشی در حدود ۷۰ درصدی را در پی داشته است. همچنین نتایج نشان میداد که مقدار جابجاییها بواسطه حضور میراگرها در ناسل، برای سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه در هر دو راستای فور⊣فتر و ساید-ساید کاهش قابل توجهتری را نسبت به سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه از خود نشان می دهد. در ارتباط با افزایش جرم میراگر در طول مطالعه می توان چنین عنوان نمود که افزایش جرم میراگر تا ۲۸ تن موجب کاهش بیشتر مقدار جابجاییها در بیشتر درجات آزادی می شود که نشان از بهبود رفتار ارتعاشی با افزایش جرم میراگر است. حضور میراگر در ناسل توربین بطور قابل توجهی گشتاور وارد بر پای برج توربین را کاهش میدهد، درصد کاهش در جهت ساید-ساید بیشتر از راستای فور افتر بوده است، اما به دلیل بیشتر کاهش پیدا کردن گشتاور در راستای فور افتر از لحاظ مقداری میتوان چنین عنوان نمود که میزان گشتاور در راستای فور-افتر بیشتر

13- Herbert, J., (1999), On the Fatigue Analysis of Wind Turbines, SANDIA Rep. SAND99-0089.

14- Hayman, G., (2012), MLife Theory Manual for Version 1.00. Tech. Rep. National Renewable Energy Laboratory.

15- Jonkman, J., (2007), *Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine*, Tech. Rep. NREL/TP-500-41958, National Renewable Energy Laboratory.

NREL/SR-500-45891, National Renewable Energy Laboratory.

11- Lackner, M., Rotea, M., (2010), *Structural Control of Floating Wind Turbines*, Journal of Mechatronics, Vol. 21, pp. 704–719.

12- Stewart, G., Lackner, M., (2013), *Offshore Wind Turbine Load Reduction Employing Optimal Passive Tuned Mass Damping Systems*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, pp. 1091-1104.