

## بررسی تغییر شکل جانبی مونوپایل توربین های بادی فراساحلی ناشی از بارهای محیطی

چکیده :

یک مطالعه ی تحلیلی برای ارزیابی رفتار جابجایی مونوپایل توربین های بادی فراساحلی در خاک های ماسه ای اجرا شده است. این سیستم متشکل از یک شمع، برج توربین و خاک مدل سازی شده ی سه بعدی با مدل المان محدود در ANSYS است. آنالیز دینامیکی در یک حوزه ی زمانی شامل خاک که به عنوان مواد ساده و بارهای موج و باد اجرا می شود به عنوان بارهای استاتیکی بر برج توربین عمل می کنند. رفتار مونوپایل در خاک با در نظرگیری تعامل شمع-خاک آنالیز شد. مطالعه نشان می دهد که جابجایی شمع و زاویه تیلت شمع به مشخصه های خاک و طول جاسازی شده و قطر شمع بستگی دارد.

### 1. مقدمه

توربین های بادی ابزارهای قدرت مندی برای بهره برداری از انرژی باد هستند. توربین های بادی ساحلی نیاز به مقدار زیادی فضا برای تولید انرژی دارند. بنابراین این گامی طبیعی برای قرارگیری توربین های بادی دریایی بود (OWT). بادهای در دریاها شدت بیشتری را در مقایسه با ساحل دارند. اجزای اصلی توربین های دریایی عبارتند از پره های توربین، گهواره روتور، قطعات انتقالی و پایه آن. توربین ها دارای 2 یا 3 پره هستند اما بیشتر 3 پره مورد استفاده قرار می گیرد. ظرفیت متراکم برای توربین های بادی دریایی در اروپا تقریباً 9-10 GW است. اغلب 4 تا 11 دور در دقیقه برای هر توربین در نظر گرفته شده است.

طراحی و ساختار فونداسیون توربین های بادی به سبب شرایط ناملازم محیطی به یک چالش تبدیل شده است. ساختارهای پشتیبان برای OWT، سازه مونوپایل، سازه سه پایه ای، سازه شبکه ای، سازه های بر مبنای گرانس و سازه های شناور هستند.

استفاده از مونوپایل زمانی رخ می دهد که عمق آب بین 10 تا 30 متر باشد. OWT که بر فونداسیون مونوپایل پشتیبانی می شود از نظر دینامیکی حساس است چرا که فرکانس های طبیعی این سازه ها نزدیک به فرکانس های متعدد اعمال شده بر آنها است. تضعیف سختی خاک بارگیری های چرخه ای و دینامیک از خاک ممکن است منجر

به جابجایی زیاد توربین شود و عملکرد آن را به خطر بیندازد. معمولاً توربین های بادی نمی توانند بیش از 0.5 درجه زاویه انحراف داشته باشند. لنگر واژگونی در روساخت جاکت پشتیبانی شده با چند شمع، به عنوان بارهای محوری به مخالف شمع های پایه انتقال می یابند. برای مونوپایل ها، لنگرهای واژگونی توسط واکنش افقی خاک در امتداد طول مونوپایل نگاه داشته می شوند. همان طور که شمع در بالای آن ثابت نیست، می توان آزادانه آن را چرخاند و انتقال داد. شمع بایستی به اندازه کافی بلند باشد که بتواند ظرفیت خاک را در امتداد خود جابجا کند تا همه بار انتقال یابد و از ضربه ی پنجه جلوگیری کند. بنابراین تعامل شمع-خاک تاثیر بسزایی برای مقاومت در برابر بارهای جانبی دارد. ارتباط بین نیروهای جانبی (P) به کار گرفته در مونوپایل و جابجایی جانبی شمع (Y) بر حسب منحنی P-Y نشان داده می شود که همان تعامل شمع-خاک سیستم سختی جانبی خاک است. این مطالعه با رفتار جابجایی شمع با در نظر گیری تعامل شمع-خاک برای بارگیری برج توربین بادی سروکار دارد.

## 2. توربین های بادی و مشخصه های خاک

حدود 75 درصد توربین های بادی دریایی بر اساس های مونوپایل هستند. مکانی در **Rameswaram, Tamilnadu** بر اساس داده های محیطی بدست آمده از موسسه ملی تکنولوژی دریایی (NIOT) Chennai برای این امر انتخاب شد. اساساً سطح مقطع خاک متشکل از شن و چند لایه لای و خاک رس است. خاک به عنوان یک ماده ی الاستیک رفتار می کند؛ بنابراین با مدل Drucker-prager مدل سازی می شود. معیار عملکرد Drucker-prager، یک مدل وابسته به فشار برای تعیین تسلیم شدگی مواد تحت فشار پلاستیکی است. این معیار برای مقابله با تغییر شکل پذیری پلاستیکی خاک معرفی شده است.

مواد مونوپایل و برج توربین، فولاد هستند و مشخصه های مقاومت آن ها، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و چگالی هستند. برج توربین با ارتفاع 80 متر و قطر متقاطع 4.5 متر توسط NIOT انتخاب شده است. قطر (D) مونوپایل ها در محدوده ی 4 تا 6 متر و طول آن از 7D تا 8D متغیر است.

## 3. بارهای برج توربین

پاسخ ساختار پشتیبان، وابسته به شرایط بارگیری است که مشابه آزمایش در محیط دریا است.

### 3.1 بار موج

بار های دیگر همانند این بارها در مقایسه با بار موج، نامنظم هستند و مورد توجه قرار نمی گیرند. برای سازه های باریک و کشیده، معادله موريسون می تواند برای محاسبه ی بارهای موج [3]، [4]، [5]، [7] و [7] مورد استفاده قرار بگیرد.

نیروی موج = نیروی رانش + نیروی اینرسی (لختی)

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho D |U| U + \rho C_I \pi D^2/4 a_x \quad (1)$$

$C_D$  - ضریب رانش (پسا)

$\rho$  - چگالی جرمی آب دریا = چگالی وزنی آب / شتاب ناشی از گرانش بر حسب  $kg/m^3$

$D$  - محدوده پیش بینی شده به محور استوانه‌ای / واحد طول (m)

$C_I$  - ضریب اینرسی برای استوانه ی دایره‌ای صاف

$U$  - مولفه ی بردار سرعت آب ناشی از موج نرمال بر محور بر حسب (m/s)

عبارتی برای سرعت و شتاب:

$$U = \{h_w \pi \cosh(k(z_2 + d_w)) \cos(kx - \omega_w t)\} / \{T_w \sinh(kd_w)\} \quad (2)$$

$$a_x = \{h_w \pi^2 \cosh(k(z_2 + d_w)) \sin(kx - \omega_w t)\} / \{T_w^2 \sinh(kd_w)\} \quad (3)$$

$h_w$  - ارتفاع موج (m)

$k$  - عدد موج ( $m^{-1}$ )

$\omega_w$  - فرکانس موج (rad/sec)

$T_w$  - دوره تناوب موج (S)

$d_w$  - عمق آب (m)

### 3.2 بار باد

نیروی باد بر ساختار توربین بستگی به اندازه و شکل عضو ساختار در مسیر باد و سرعت وزش باد دارد.

بار باد عامل بر پره های توربین همان معادله ی 3 است.

$$F_b = 0.5 \rho_a \pi R_T^2 V^2 C_T (\lambda_s) \quad (4)$$

$F_b$  - بار باد عامل بر طوقه در N

$V$  - سرعت باد در ارتفاع طوقه در m/s

$R_T$  - شعاع روتور در m

$\rho_a$  - چگالی هوا که برابر است با 1.23kg/m<sup>3</sup> at 15.1°C at 1atm

نسبت سرعت نوک:

$$\lambda_s = V_r R_T / V \quad (5)$$

$V_r$  - سرعت روتور در rad/sec

$R_T$  - قطر روتور در m

$$V(z) = u^* / k_a \ln (z/z_0) \quad (6)$$

$k_a$  - ثابت فون کارمان

$z_1$  - ارتفاع برج در m

$z_0$  - پارامتر زبری = 0.0001 دقیقه‌ی دریای آرام بدون موج

$u^*$  - سرعت اصطکاکی باد از 10 min میانگین سرعت باد در ارتفاع Ht برابر 10m محاسبه شده است.

$$u^* = \sqrt{k} U_{10} \quad (7)$$

که ثابت اصطکاک سطح برابر است با  $k = \{k_a / \ln (H_t/z_0)\}^2$

بار باد بر برج توربین به سرعت باد در امتداد برج بستگی دارد. برج به قطعات مختلف تقسیم شده است و به عنوان بار متمرکز در هر قطعه عمل می کند.

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \mu^2 \cdot C_s \cdot A \quad (8)$$

$F$  - نیروی باد در KN

$\rho$  - چگالی هوا در

$\mu$  - سرعت باد در

A - ناحیه پیش بینی شده در

انتقال سرعت به دیگر ارتفاع ها برابر است با:

$$V = V_{ref} \times \ln(Z/0.002) / \ln(Z_{ref}/0.002)$$

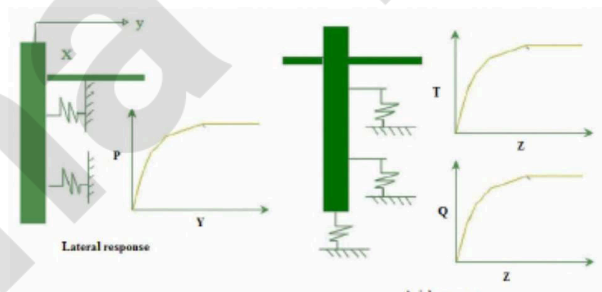
(9)

$V_{ref}$  - سرعت پایه ی باد در ارتفاع مبنای 10 متر

$Z_{ref}$  - ارتفاع مبنا

#### 4. تعامل شمع-خاک

توربین های بادی پشتیبانی شده با مونوپایل، از هر دو بارهای محوری و جانبی توسط تعامل خاک در اطراف مونوپایل مقاومت می کنند. مقاومت محوری خاک، به وسیله ی ترکیب چسبندگی محوری شمع و خاک فراهم می شود و مقاومت بارپذیری (تحمل) در نوک شمع در شکل 1 نشان داده شده است. رابطه ی بین انتقال برشی شمع-خاک تجهیز شده و انحراف محلی شمع در هر عمق با استفاده از منحنی t-Z تعریف می شود. رابطه بین مقاومت متحمل و تجهیز شده و انحراف محوری نوک با استفاده از منحنی Q-Z تعریف می شود. مقاومت جانبی خاک توسط تعامل جانبی خاک، در شکل 2 نشان داده شده است. شمع تحت بارگیری جانبی، پاسخ خاک را با توجه به منحنی P-y که مقاومت خاک را با انحراف شمع بیان می کند، تعریف می کند. یک منحنی p-y رابطه ی غیرخطی بین مقاومت خاک با دیواره شمع و انحراف جانبی شمع را تعریف می کند.



شکل 1 منحنی سختی تعامل شمع-خاک

مقاومت جانبی نهایی خاک به بارهای جانبی را می توان با استفاده از روش منحنی  $p-y$  برآورد کرد. منحنی  $p-y$  غیرخطی است و به چندین پارامتر شامل، عمق، تنش برشی خاک و مشخصه های خاک بستگی دارد. توسعه ی منحنی  $p-y$  به ظرفیت بارپذیری (تحمل) جانبی شمع بستگی دارد. ظرفیت بارپذیری جانبی نهایی خاک به صورت بسزایی به عمق کم آن بستگی دارد.

$$P_{us} = [C_1 \times H + C_2 \times D] \times \gamma \times H$$

$$P_{ud} = C_3 \times D \times \gamma \times H$$

$P_u$  - مقاومت نهایی (نیرو/ واحد طول) در  $KM/m$

$\gamma$  - وزن موثر خاک در  $KN/m^3$

$H$  - عمق در  $m$

$\Phi$  - زاویه ی اصطکاک داخلی خاک

$D$  - میانگین قطر شمع از سطح تا عمق در  $m$

عبارت زیر مقاومت خاک را نشان می دهد:

$$P = A \times P_u \times \tan h \left[ \left\{ \frac{k \times H}{A \times P_u} \right\} \times y \right]$$

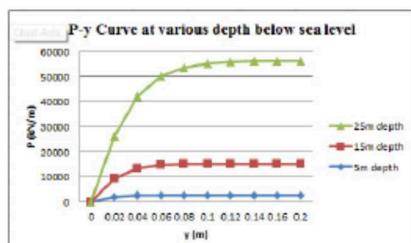
$p_u$  - ظرفیت بارپذیری نهایی در عمق  $H$  در  $kN/m$

$k$  - مدول ورودی واکنش خاک بستر در  $KN/m^3$

$y$  - انحراف جانبی در  $m$

$H$  - عمق خاک در  $m$

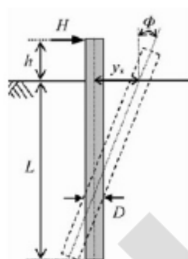
از معادلات بالا، سختی جانبی خاک در هر عمقی محاسبه شده است. تغییرات منحنی  $p-y$  به عمق خاک از بستر دریا بستگی دارد که در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2 منحنی  $p-y$  در عمق های 5، 15 و 25 متر پایین تر از سطح دریا

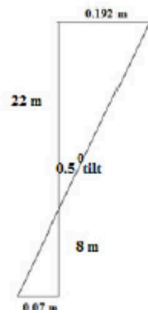
### 5. جابجایی و واکنش های جانبی خاک

بارهای جانبی باد بر برج و لنگر واژگونی ناشی از بارهای جانبی، توسط واکنش جانبی خاک و لنگر (گشتاور) مقاوم در خاک مقاومت می شوند. به علت بارهای جانبی، شمع ها متمایل به چرخش حول یک محور می شوند. مونوپایل ها با قطر 4 تا 6 متر، رفتاری سخت دارند؛ بنابراین در پنجه ی شمع رفتاری منفی را از خود نشان می دهند (شکل 3).



شکل 3 تیلت (شیب) مونوپایل صلب حول یک محور

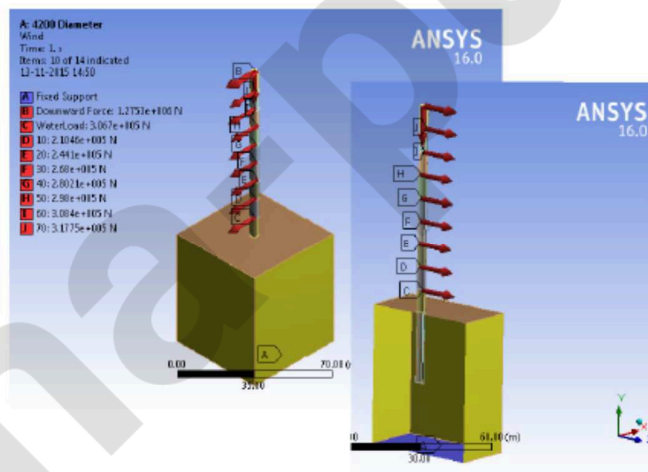
حداکثر تیلت مجاز یکنواخت در خاک ماسه ای برابر 0.5 درجه است. در محاسبات برای یک نقطه محور با طول 30 متر در 22 متر پایین تر از کف دریا قرار می گیرد؛ آنگونه که در شکل 4 نشان داده شده است. از زاویه تیلت 5 درجه، جابجایی در هر نقطه در امتداد طول شمع محاسبه می شود و از محور  $p-y$  وابسته به مقدار جابجایی در هر نقطه، واکنش جانبی خاک محاسبه می شود.



شکل 4 حداکثر جابجایی در تیلت 5 درجه در بالا و پایین شمع

## 6. مدل سازی المان محدود در ANSYS

یک مدل المان محدود سه بعدی مونوپایل، برج و خاک اطراف آن در شعاع 20 متری محور (میله) شمع و 30 متر پایین شمع، در ANSYS مدل سازی شده است. مشخصه‌ی ماده برج و مونوپایل بر ساختاری فولادی است. خاک به عنوان ماده‌ی صریح با مشخصه‌های مقاومت ماده مانند مدول الاستیسیته، نسبت پواسون 0.25 و چگالی 18  $\text{kg/m}^3$  مدل سازی شده است. اصطکاک بین شمع و خاک، توسط جفت‌های contact-target ایجاد می‌شود. خاک به عنوان لایه‌ای همگن مدل سازی می‌شود. مدول الاستیسیته‌ی خاک، شیب منحنی  $p$ - $\gamma$  در عمق 15 متر است. شرایط مرزی ثابت در پایین خاک و موانع (مقید) جانبی در اطراف جانبی خاک ایجاد می‌شوند. بارهای باد، در امتداد برج توربین به عنوان بارهای متمرکز که در شکل 5 نشان داده شده است، ایجاد می‌شوند.



شکل 5 مدل برج، مونوپایل و خاک در ANSYS

## 7. جابجایی جانبی شمع در قطر ها و عمق های مختلف شمع

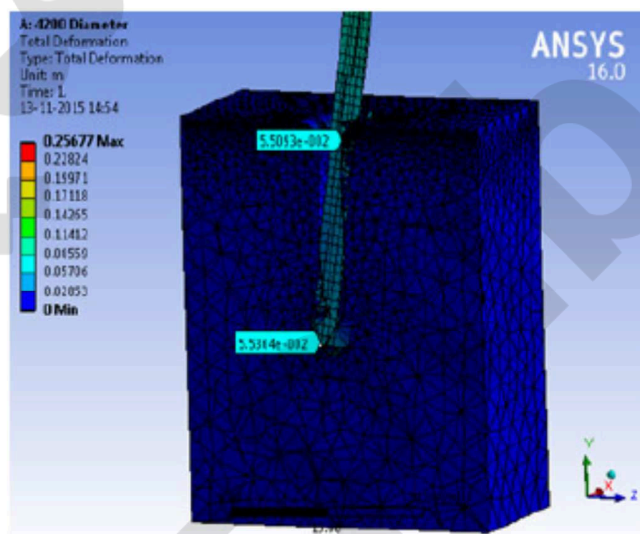


زمانی که خاک یک ماده صریح باشد، آنالیز صریح دینامیکی با بارگذاری استاتیک اجرا می شود. طول شمع در بین 7D تا 8D است که D قطر مونوپایل است. تصمیم گرفته شد که نسبت L/D برابر 7.14 حفظ شود. از این رو قطر و طول مربوطه در جدول 1 نشان داده شده است.

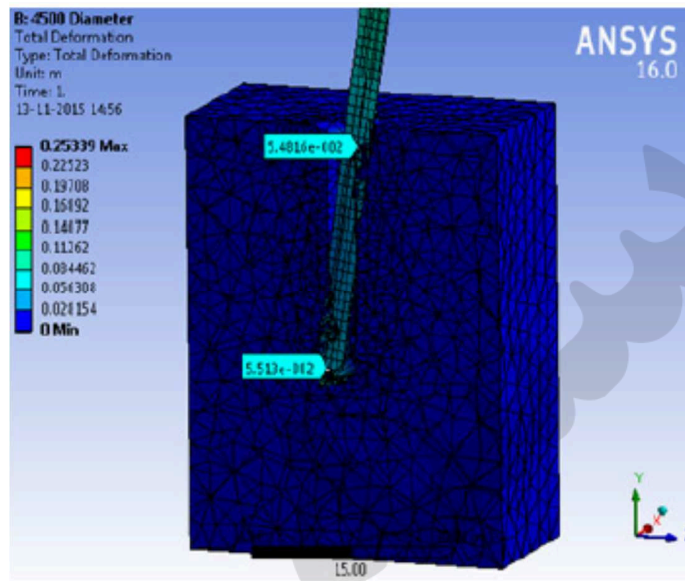
جدول 1 قطر و طول شمع

SI.NO	قطر شمع (m)	طول شمع (m)	نسبت L/D
1	4.2	30	7.14
2	4.5	32	
3	5	35.7	
4	5.3	37.84	

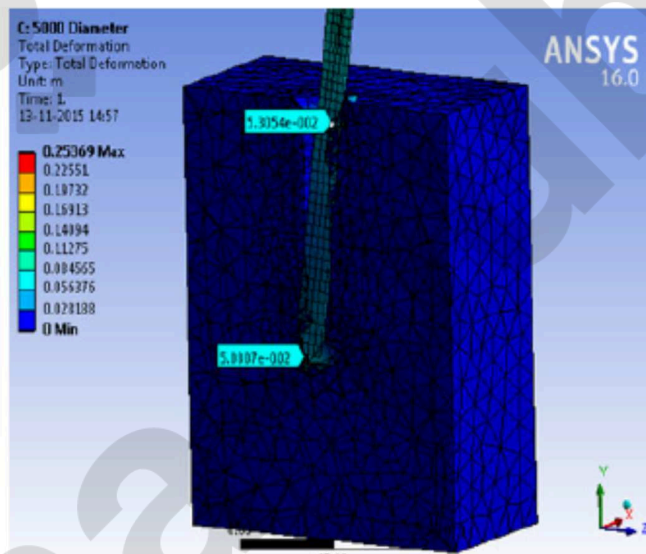
شکل های 6 تا 9 نتایج بدست آمده بعد از آنالیز دینامیکی را نشان می دهد.



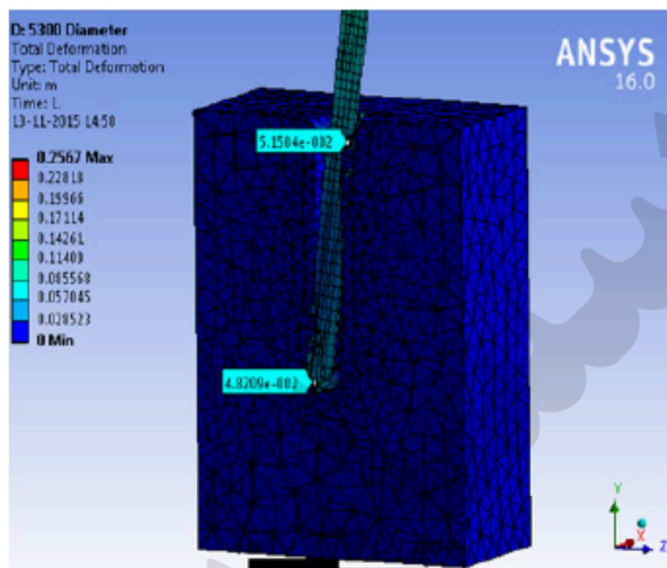
شکل 6 جابجایی در سطح بستر دریا شمع و پنجه ی شمع با قطر 4.2 متر



شکل 7 جابجایی در سطح بستر دریا شمع و پنجه ی شمع با قطر 4.5 متر



شکل 8 جابجایی در سطح بستر دریا شمع و پنجه ی شمع با قطر 5 متر



شکل 8 جابجایی در سطح بستر دریا شمع و پنجه ی شمع با قطر 5.3 متر

بعد از اجرای مطالعه ی پارامتری با تغییر دادن قطر ها و طول ها و ثابت نگه داشتن نسبت  $L/D$ ، نتایج زیر در جدول 2 بدست آمد.

جدول 2 زاویه تیلت تغییر شکل بدست آمده برای نسبت  $L/D$  مربوطه

SI.NO	طول / قطر	تغییر شکل در کف دریا (m)	تغییر شکل در پنجه ی شمع (m)	زاویه تیلت
1	4,2/30	0,0551	0,0553	0,21
2	4,5/32	0,0548	0,05513	0,209
3	5/35,7	0,0531	0,0508	0,198
4	5,3/37,84	0,0516	0,0482	0,19

تغییر شکل مثبت در کف دریا و تغییر شکل منفی در پنجه شمع وجود دارد. زاویه تیلت بدست آمده کمتر از 5 درجه است که این در بازه ی ایمنی است.

### 9. نتیجه گیری

همان طور که طول و قطر افزایش می یابد، تغییر شکل در کف دریا و پنجه شمع کاهش می یابد.

زاویه تیلت بدست آمده با افزایش قطر و طول، کاهش می یابد و زاویه تیلت بدست آمده کمتر از 5 درجه است که در بازه ای ایمنی است.

شمع ها بدلیل بارهای جانبی مربوط به عمل لنگر واژگونی بر برج، حول یک محور چرخانده می شود و در آن نقطه در کف دریا جابجایی مثبت و در پنجه شمع جابجایی منفی دارد.