مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (35) العدد (1) 2013
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (35) No. (1) 2013

حساب الارتفاع المناسب للأبراج الحاملة لخطوط نقل الطاقة الكهربائية عند تقاطعها مع منشآت هندسية

الدكتور يوسف يوسف *

(تاريخ الإيداع 26 / 3 / 2012. قُبِل للنشر في 16/ 12 / 2012)

□ ملخّص □

إن مسألة حساب ارتفاع الأبراج الحاملة لخطوط نقل الطاقة الكهربائية عند تقاطعها مع منشآت هندسية هي إحدى الوسائل المهمة في تصميم الشبكات الكهربائية، ويعتمد حلها على الطريقة التقليدية لحساب إحداثيات النواقل . ولكن هذه المسألة تصبح معقدة أو مستحيلة الحل عندها يلزمنا حل فراغي، وخصوصاً عندما يتجه الريح بزاوية على نواقل خطوط نقل الطاقة مع وجود فرق بين نقاط ارتفاع التعليق. في هذه الحالة من الأفضل استخدام الطريقة المتجهية المعتمدة في هذا البحث. ووفقاً لذلك قمنا بإيجاد نموذج رياضي ووضع برنامج بلغة C^{++} لحساب إحداثيات النقطة الدنيا لمنحني تعليق النواقل والمسافة الأصغرية بين هذه النواقل والمنشآت الهندسية، والارتفاع المناسب للأبراج .

الفروق الحسابية ما بين الطريقة التقليدية و المتجهية تبلغ قيماً كبيرة تزداد مع زيادة زاوية الميل.

الكلمات المفتاحية : نموذج رياضي– قوة تأثير الريح – خطوط نقل– عوازل – منشآت هندسية

---

* أستاذ مساعد– قسم هندسة الطاقة – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (35) العدد (1) 2013
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (35) No. (1) 2013

Transmission lines at their intersection with engineering installations

Dr. Youcef Youcef *

(Received 26 / 3 / 2012. Accepted 16 / 12 / 2012)

□ ABSTRACT □

The equation of towers height calculation carryingpower transmission lines at their intersection with engineering installation is one of the methods of designing power nets,the solution of which depends on the traditional method for calculating conductors coordinates. Sometimes this problem becomes so complicated or impossible to solve, therefore, we have to use the space solution mainly when the wind direction made an angle with these transmission lines and the points of hanging height difference. In this case it is better to use the vector method which we used at the present work. We used a mathematical model to calculate the minimum point coordination of the transmission lines curves and the minimum distance between the engineering installation and that of these transmission lines, and the suitable carrying towers heights, a cording to the permissible electrical equipment laws. So we could find the suitable towers heightcoordinates by using the C^{++} applicable program.

Calculation errors between traditional and vector method reaches high value which increases with the slope angle increasing of conductors.

Key words: mathematical model, wind power – effect –transmission lines insulators, engineering installation.

***Assistant professor, Electrical Power Department - Faculty Mech&Elect, Tishreen university-Lattakia-Syria**

مقدمة :

إن حساب إحداثيات النواقل، وحساب ارتفاع الأبراج الحاملة لخطوط نقل الطاقة الكهربائية اعتماداً على الطريقة التقليدية [1, 2, 3, 4, 5] وخصوصاً عندما يلزمنا حلٌ فراغي يصبح مسألة صعبة الحل وتؤدي إلى حسابات معقدة وإنشاءات إضافية ولاسيما عند تأثير الريح بزاوية ما في خطوط نقل القدرة الكهربائية، في هذه الحالة يصبح مفيداً استخدام الطريقة المتجهية [6] لحساب إحداثيات النقطة السفلية لمنحني تعليق النواقل في الفراغ والمعتمدة في هذا البحث، ومن ثم حساب المسافة الأصغرية بين هذه النواقل والمنشآت الهندسية ومقارنتها بالمسافة المسموح بها في قواعد التجهيزات الكهربائية المنظمة، لذلك فإذا كانت هذه المسافة لا تحقق ذلك يتم زيادة الارتفاع أو إنقاصه، ولكن هناك ارتفاعاً مسموحاً به للأبراج، فإذا تجاوزنا الارتفاع المسموح به فإن ذلك سيؤدي إلى زيادة كبيرة في التكاليف الإنشائية، ومن هنا فإنه يجب البحث عن نموذج رياضي مع برنامج حاسوبي لتحديد الارتفاع المناسب.

أهمية البحث وأهدافه :

يهدف البحث لإيجاد نموذج رياضي يستند على الطريقة المتجهية،و يتيح لنا حساب إحداثيات النقطة الدنيا لمنحني تعليق النواقل تحت تأثير قوى الريح المتجهة بزاوية ما في النواقل والمسافة الأصغرية بين هذه النواقل والمنشآت الهندسية، ومقارنة هذه المسافة بالمسافة المسموح بها بقواعد التجهيزات الكهربائية ومن ثم ذلك حساب الارتفاع المناسب للأبراج الحاملة ومن ثم كتابة برنامج بلغة C^{++} للقيام بذلك مع إمكانية استخدامه في التطبيقات الحسابية .

طريقة البحث ومواده :

سنقوم بدايةً باستخدام الطريقة المتجهية لحساب إحداثيات النقطة السفلية لمنحني تعليق النواقل في الفراغ وذلك بفرض أنه لدينا خط نقل قدرة هوائي، تؤثر فيه قوى متجانسة $\overline{P}$. وإحداثيات أي نقطة ما M من الناقل يمكن أن تحدد من خلال نصف القطر $\overline{R}$، فإذا اخترنا بداية الإحداثيات في النقطة A شكل (1) فإنه كمحدد يحدد موضع النقطة على منحني التعليق، ونأخذ طول القوس S المأخوذ من نقطة البداية A حتى النقطة M .

نصف القطر الموافق للنقطة M هو عبارة عن تابع متجهي ذي متحول عددي S أي أن :

$$\overline{R} = \overline{R}(S)$$

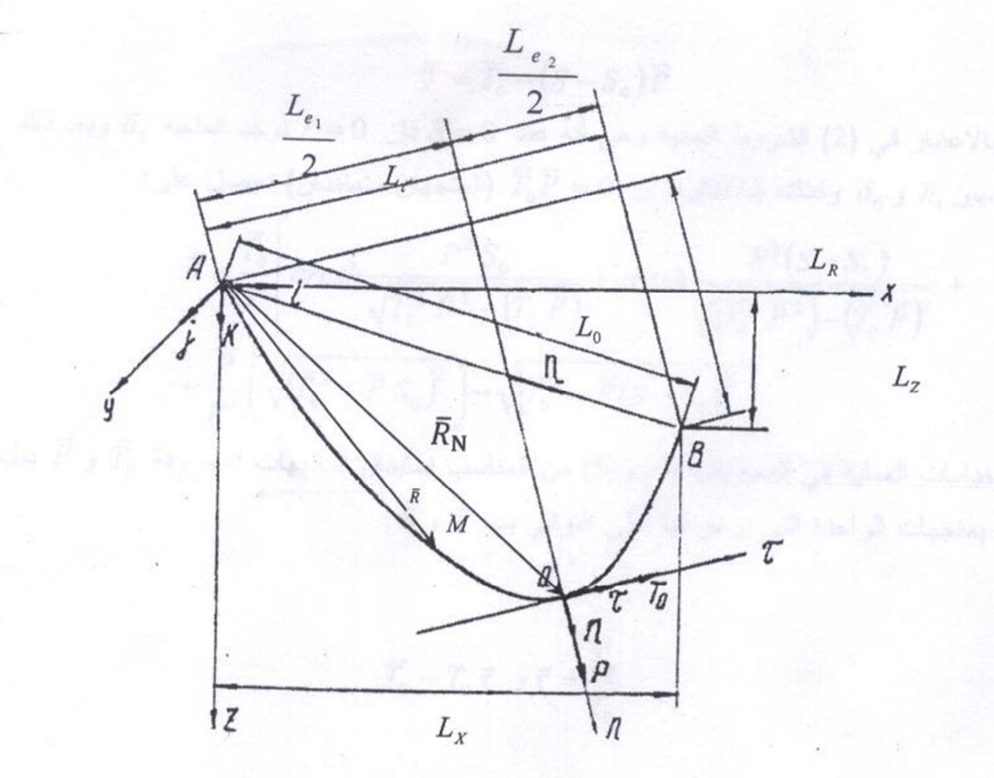
للحصول على معادلة توازن الناقل بالشكل المتجهي من الأفضل أن نكتب القيم الابتدائية للفتحات والقوى المتوزعة بانتظام $\overline{P}$ بالشكل المتجهي. إن إحدى ميزات الصيغ المتجهية للمعطيات الأولية والنهائية هي إمكانية الحصول على المساقط الفراغية للقيم المبحوث عنها وبالتالي فإن متجه التوتر في الناقل يعطى بالمعادلة التالية [6]:

$$\overline{T} = -\overline{P}s + \overline{a}_o \qquad (1)$$

حيث $\overline{a}_o$: متجه الثابت التكاملي الذي يحدد بالشروط الابتدائية .

إحداثيات أي نقطة من الناقل يمكن أن تعطى بالشكل المتجهي وفقاً للمعادلة التالية [6] :

$$\overline{R} = \overline{a_1} + \frac{1}{P}\left[\overline{a}_o - \frac{\overline{a}_o\dot{P}}{P^2}\overline{P}\right] arcsh \frac{\left|\overline{P}\right|^2 s - \overline{a}_o\overline{P}}{\sqrt{a_o^2\overline{P}^2 - \left(\overline{a}_o\overline{P}\right)^2}} - \frac{\overline{P}}{P^2}\left|\left(\overline{a}_o - \overline{P}S\right)\right| \qquad (2)$$



الشكل(1): مخطط توضع الناقل تحت تأثير متجه الحمولة الخارجة $\overline{P}$ والتحديد الاتجاهي لأية نقطة من منحني تعليق خط نقل القدرة الكهربائية

المعادلتان (1)، (2) هما الحل العام بالشكل المتجهي لمسألة تحديد التوتر والتوضع الفراغي للخيط اللدن الثقيل في الشروط الساكنة. الحل الخاص يمكن الحصول عليه عن طريق إيجاد قيم محددات ثوابت المتجهات $\overline{a}_o$ ،$\overline{a}_1$ بالشروط الحدية المعطاة.

تتوزع قوة اتجاه الريح توزعاً متجانساً وباتجاه واحد على كل عنصر من عناصر الناقل بغض النظر عن انزياحه عن المستوى الشاقولي، وهكذا فإن المتجه– المحصل من الوزن وقوة تأثير الريح – يؤثر في كل عنصر من الناقل، وهو ثابت يرمز له بالرمز $\overline{P}$ ، ويمكن أن نجري بعض التعديلات على المعادلات (1)،(2)ونوجد بعد ذلك القيمة s_o حيث طويلة قوة التوتر ستكون أصغرية لهذا الهدف نفاضل مربع المعادلة (1) ونساويه للصفر ، عندها نجد أن:

$$S_o = \frac{\overline{a}_o \overline{P}}{\overline{P}^2}$$

ونبدلها في المعادلة(1) وهكذا نحصل على متجه قوة التأثير $\overline{T_o}$ في النقطة S=So .

$$\overline{T}_o = \overline{a}_o - \overline{P}\,\frac{\overline{a}_o \overline{P}}{\overline{P}^2} \qquad (3)$$

من المعادلة (1) وبمعرفة أن في النقطة S=So التوتر $\overline{T} = \overline{T}_o$ نوجد :

$$\overline{T}_o = \overline{a}_o - \overline{P} S_o$$

من هنا :

$$\overline{a}_o = \overline{T}_o - \overline{P} S_o$$

وبالتالي :

$$\overline{T} = \overline{T}_o - (S - S_o)\overline{P} \qquad (4)$$

إذا أخذنا بالحسبان في (2) الشروط الحدية، وهي أنه عند S=0 $\overline{r}=o$ نوجد المتجه $\overline{a}_1$ وبعد ذلك بمعرفة قيمة المتجهين $\overline{a}_1$ ، $\overline{a}_o$ ، وكذلك إذا تذكرنا أن $\overline{T}_o\overline{P}=0$ (المتجهان متعامدان) نحصل على :

$$\overline{R}=\frac{\overline{T}_o}{P}\left[\begin{array}{l} arcsh\dfrac{P^2S_o}{\sqrt{\overline{T}_o^{\,2}\overline{P}^{\,2}-\left(\overline{T}_o\overline{P}\right)}}+arcsh\dfrac{P^2\left(S-S_o\right)}{\sqrt{\overline{T}_o^{\,2}\overline{P}^{\,2}-\left(\overline{T}_o\overline{P}\right)^2}}+ \\ +\dfrac{\overline{P}}{P^2}\left(\sqrt{\left(\overline{T}_o^{\,2}+\overline{P}S_o\right)^2}\right)-\sqrt{\left[\overline{T}_o^{\,2}-\overline{P}\left(S-S_o\right)\right]^2} \end{array}\right] \qquad (5)$$

في الاستخدامات العملية في المعادلات (4)، (5) من المناسب استبدال المتجهات المعروفة $\overline{T}_o,\overline{P}$ بطويلتهم مضروبة بمتجهات الواحدة التي يرمز لها على التولي بـ $\overline{\tau}$و $\overline{n}$.

أي أن :

$$\overline{T}_o=T_o\cdot\overline{\tau}\Leftarrow\quad \overline{\tau}=\frac{\overline{T}_o}{T_o} \qquad (6)$$

إذ إن :

$\overline{\tau}$: متجه الواحدة الذي يحدد اتجاه المماس لمنحني الناقل عندما يكون عمودياً على الحمولة (الشكل (1)).

متجه القوة الإجمالية $\overline{P}$ في المعادلة(5) المؤثرة في وحدة طول الناقل N/m يمكن كتابته على النحو التالي:

$$\overline{P}=\left(P_C+G\right)\overline{K}+\overline{Q} \qquad (7)$$

حيث :

P: الوزن الذاتي لـ 1m من الناقل N/m .

G: وزن الجليد على 1m من الناقل N/m ، ويحدد من المراجع [2, 1].

$\overline{Q}$: متجه قوة ضغط الريح على 1m من الناقل N/m.

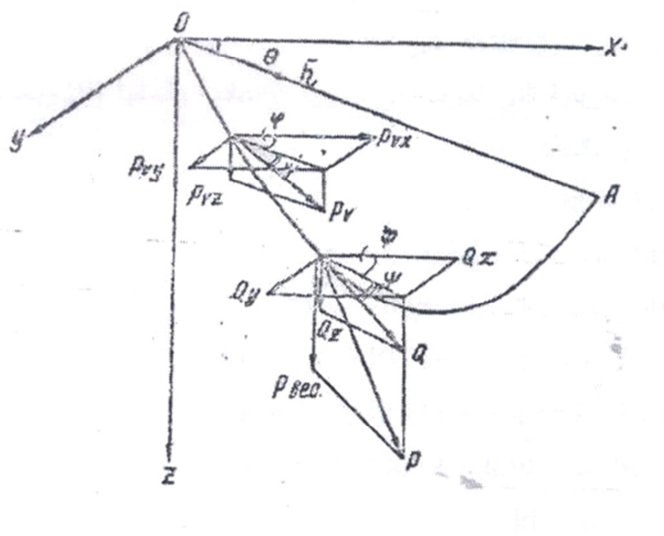
القوة P_c هي القوة المؤثرة في وحدة طول لناقل الناتجة عن الوزن الذاتي له، وتحدد بالمعطيات المرجعية وفقاً لماركة النواقل وتصميمها وعددها في الطور.للنواقل المشطورة يأخذ بالحسبان كذلك وزن القطع المباعدة. لهذا فإن الوزن الإجمالي للقطع المباعدة سيستبدل بقوة متوزعة على الطور .

$$P_P=\frac{Q_P}{l_P},\quad N/m \qquad (8)$$

حيث:

Q_P : وزن القطع المباعدة N، . l_P : المسافة بين القطع المباعدة، m.

عند حل المسائل المرتبطة الحسابات الميكانيكية للنواقل يجب أن نأخذ بالحسبان الاتجاه العشوائي للريح بالنسبة للناقل. ولإيجاد الحمولة الإجمالية ومركباتها من الضروري أن نوجد الصيغ المناسبة ولذلك نختار نظام الإحداثيات الديكارتي الموضح على الشكل (2).



الشكل (2) مخطط تحليل حمولة الواحدة الإجمالية لمركباتها على المحاور X, Y, Z

إذا فرضنا أن اتجاه المستقيم O A الذي يصل نقاط تعليق الناقل على برجين متجاورن ينطبق مع متجه الواحدة $\overline{\eta}$ فإن الأخير يمكن أن نكتبه :

$$\overline{\eta} = \eta_x \overline{i} + \eta_Z \overline{k} = \cos\theta\ \overline{i} + \sin\theta\ \overline{k} \qquad (9)$$

هنا θ : الزاوية في المستوي الشاقولي بين المستقيم oA والمحور X.

متجه الحمولة الريحية على الناقل يمكن أن يحلل على المحاور الإحداثية لمركباته على النحو التالي(الشكل(2)):

$$\overline{P_V} = P_{Vx}\overline{i} + P_{V.y}\overline{j} + P_{VZ}\overline{k} = P_{V\perp}\left(\cos\varphi\cos\psi\ i + \sin\varphi\cos\psi\overline{j} + \sin\psi\ \overline{k}\right) \qquad (10)$$

حيث:

$\overline{k}, \overline{j}, \overline{k}$: متجهات الواحدة على المحاور الإحداثية.

φ: الزاوية في المستوي الأفقي بين اتجاه الريح والمحورX.

ψ : الزاوية في المستوي الشاقوليبين اتجاه الريح والمستوي الأفقي.

$P_{V\perp}$: قوة تأثير الريح العمودي في الناقل، وتحسب من العلاقة التالية [2]:

$$P_{V.\perp} = \alpha \cdot k_l \cdot C_x \cdot q \cdot F \cdot \beta, \quad N/m \qquad (11)$$

حيث :

q : ضغط السرعة للريح في الحالة التي هي قيد الدراسة، [N/m].

α : عامل يأخذ بالحسبان عدم تجانس ضغط سرعة الريح بالفتحة ويمكننا أن نكتب العبارات التالية لحساب α باستعمال طريقة الاستكمال الخطي [8, 7].

$$\alpha = 1,\ when\ q \prec 270\ N/m^2$$
$$\alpha = -0.00115q + 1.3115\ when\ 270 \le q \prec 400\ N/m^2$$
$$\alpha = -0.000667q + 1.1167\ when\ 400 \le q \le 550\ N/m^2$$
$$\alpha = -0.002381q + 0.881\ when\ 550 \le q \le 760\ N/m^2$$
$$\alpha = 0.7\ when\ q \ge 760\ N/m^2$$

K_l: عامل يبين مدى تأثير طول الفتحة في الحمولة الريحية، واعتماداً على القياسات التجريبية في روسيا الاتحادية وألمانيا وباستعمال طريقة الاستكمال الخطي يمكن أن نكتب [7 ,8 ,9]:

$$k_l = 1.2,\ when\ l \prec 50\ m$$
$$k_l = -0.002l + 1.3\ when\ 50 \le l \prec 100\ m$$
$$k_l = -0.001l + 1.2\ when\ 100 \le l \prec 150\ m$$
$$k_l = -0.0005l + 1.125\ when\ 150 \le l \prec 250\ m$$
$$k_l = -0.0007l + 1.17\ when\ 250 \le l \prec 500\ m$$
$$k_l = -0.0003l + 0.98\ when\ 500 \le l \prec 700\ m$$
$$k_l = 0.7,\ when\ l \succ 700\ m.$$

C_X : عامل المقاومة الجبهي يأخذ مساوياً $C_x=1.1$ ، وعند الجليد أو : $C_x=1.2$ when $d<20mm$.

β: الزاوية بين متجه الريح والفتحة.

F: مساحة المقطع العرضي لـ 1m من نواقل الطور.

عند ارتفاع أكبر من 15m يجب أن نأخذ بالحسبان زيادة ضغط سرعة الريح بالارتفاع .

ضغط سرعة الريح في الاتجاه قيد الدراسة يساوي [2 ,3 ,5]:

$$q = q_o \cdot kb, \quad N/m^2 \qquad (12)$$

حيث :

q_o : ضغط سرعة الريح العياري لارتفاع حتى 15m من سطح الأرض، N/m^2

K_b : عامل تصحيح زيادة ضغط سرعة الريح بالارتفاع ويمكن أن يحسب بالصيغ التالية المستخرجة باستخدام طريقة الاستكمال الخطي ومعطيات المراجع [3 ,5 ,7 ,8] :

$$k_b = 1\ when\ h_n \prec 15\ m$$
$$k_b = 0.05h_n + 0.25\ when\ 15 \le h_n \prec 20\ m$$
$$k_b = 0.05h_n + 0.25\ when\ 20 \le h_n \prec 40\ m$$
$$k_b = 0.01h_n + 1.1\ when\ 40 \le h_n \prec 60\ m$$
$$k_b = 0.0087h_n + 1.225\ when\ 60 \le h_n \prec 100\ m$$
$$k_b = 0.005h_n + 1.6\ when\ 100 \le h_n \prec 200\ m$$
$$k_b = 0.003h_n + 1.933\ when\ 200 \le h_n \prec 350\ m$$
$$k_b = 3.1,\ when\ h_n \ge 350\ m.$$

حيث:

h_n: ارتفاع توضع مركز ثقل الناقل، ويحسب بالصيغة التالية[2 ,3 ,5]:

$$h_n = h_l - \frac{2}{3} f_o, \quad m$$

حيث :

h_l : الارتفاع المتوسط لتثبيت النواقل على الأبراج، m

f_o : سهم تدلي النواقل، m

ضغط سرعة الريح العياري يحدد بالصيغة التالية[5,2] :

$$q_o = \frac{V^2}{16}, \quad N/m \tag{13}$$

حيث :

V: سرعة الريح على ارتفاع 10m فوق سطح الأرض m/s

عند اتجاه الريح بزاوية على الناقل فإن قوة ضغط الريح Q تحدد بوصفها جداء حمولة الريح العمودية $P_{V\perp}$ وجيب زاوية β بين اتجاه الريح والناقل:

$$Q = P_{V\perp} \sin\beta \tag{14}$$

والمتجه $\overline{Q}$ هو متجه على امتداد المتجه $\overline{P_V}$ وبالتالي:

$$\overline{Q} = \frac{\overline{P_V}}{P_{V\perp}} Q = \overline{P_V} \sin\beta \tag{15}$$

وإذا اعتبرنا أن اتجاه كل عنصر من الناقل موازٍ للخط OA يمكننا أن نكتب:

$$\left|\overline{P_V} X \overline{\eta}\right| = P_{V\perp} \cdot l \cdot \sin\beta \tag{16}$$

فإذا عوضنا عن قيمة العلاقة(14) في (16) نحصل على :

$$Q = \left|\overline{P_V} X \,\overline{\eta}\right| \tag{17}$$

فإذا حسبنا طويلة الجداء الشعاعي(17) وباستخدام قيمة المتجه $\overline{P_V}$بالمعادلة (10) والمتجه $\overline{\eta}$ بالمعادلة (9) والمتجه $\overline{Q}$من العلاقة (15) فإننا نحصل :

$$\overline{Q} = P_{V\perp}\left(\cos\varphi\cdot\cos\psi\,\bar{i} + \sin\varphi\cdot\cos\psi\,\bar{j} + \sin\psi\,\bar{k}\right)\cdot \sqrt{\sin^2\varphi\cdot\cos^2\psi + \sin^2\theta\cdot\cos^2\varphi\cdot\cos^2\psi + \frac{1}{2}\sin^2\theta\cdot\cos\varphi\cdot\sin^2\psi} \tag{18}$$

نعوض المعادلة (7) في المعادلة (18) وبعد مجموعة من التحويلات نحصل على المعادلات النهائية للحمولة المحصلة P ومركباتها P_Z, P_Y, P_X:

$$\left.\begin{aligned}
P &= \sqrt{P_c^2 + P_{V\perp}^2\left(\sin^2\varphi\cdot\cos^2\psi+\sin^2\theta\cdot\cos^2\varphi\cdot\cos^2\psi+\cos^2\theta\cdot\sin^2\psi-\frac{1}{2}\sin2\theta\cdot\cos\varphi\cdot\sin2\psi\right)}\\
P_X &= Q_X = P_{V\perp}\cdot\cos\varphi\cdot\cos\psi\sqrt{\sin^2\varphi\cdot\cos^2\psi+\sin^2\theta\cdot\cos^2\varphi\cdot\cos^2\psi+\cos^2\theta\cdot\sin^2\psi-\frac{1}{2}\sin2\theta\cdot\cos\varphi\cdot\sin2\psi}\\
P_y &= Q_y = P_{V\perp}\cdot\sin\varphi\cdot\cos\psi\sqrt{\sin^2\varphi\cdot\cos^2\psi+\sin^2\theta\cdot\cos^2\varphi\cdot\cos^2\psi+\cos^2\theta\cdot\sin^2\psi-\frac{1}{2}\sin2\theta\cdot\cos\varphi\cdot\sin2\psi}\\
P_Z &= P_C + P_{V\perp}\cdot\sin\psi\sqrt{\sin^2\varphi\cdot\cos^2\psi+\sin^2\theta\cdot\cos^2\varphi\cdot\cos^2\psi+\cos^2\theta\cdot\sin^2\psi-\frac{1}{2}\sin2\theta\cdot\cos\varphi\cdot\sin2\psi}
\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

عندما يتجه الريح في المستوى الشاقولي فإن الزاوية $\psi = 0$ في العلاقة (19)، وعند تساوي ارتفاع التعليق فإن الزاوية θفي العلاقة (19) تأخذ قيمة مساوية للصفر .

متجه الحمولة المحصلة $\overline{P}$في المعادلة (7) يمكن أن نعبر عنه من خلال الطويلة P ومتجه واحدة اتجاه الحمولة $\overline{n}$:

$$\overline{P} = P \cdot \overline{n} \qquad (20)$$

من هنا نجد :

$$\overline{n} = \frac{\overline{P}}{P} = \frac{P_x}{P}\bar{i} + \frac{P_y}{P}\bar{j} + \frac{P_z}{P}\bar{k}$$

أو من خلال الحمولات النوعية (الشكل(3))

$$\overline{n} = \frac{\overline{\gamma}}{\gamma} = \frac{\gamma_x}{\gamma}\bar{i} + \frac{\gamma_y}{\gamma}\bar{j} + \frac{\gamma_z}{\gamma}\bar{k}$$

متجه الفتحة المائلة $\bar{l}$ يملك ثلاثة مساقط كما هو مبين على الشكل(3)، وهذا يعني أنه يعرف لدينا طول الفتحة وثلاثة مساقط ، وبما أن :

$$\bar{l} = l \cdot \overline{\eta} \qquad (21)$$

إذ إن :

$\overline{\eta}$: متجه واحدة اتجاه الفتحة أي أن:

$$\overline{\eta} = \frac{\bar{l}}{l} = \frac{l_x}{l}\bar{i} + \frac{l_y}{l}\bar{j} + \frac{l_z}{l}\bar{k}$$

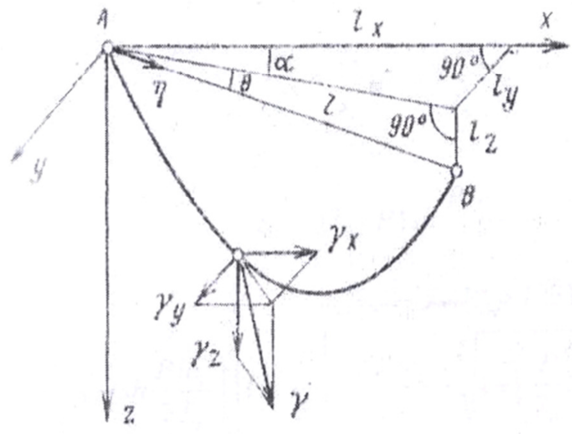
متجه الواحدة $\overline{\eta}$ يمكن أن يعبر عنه من خلال التوابع المثلثية للزوايا α، θ :

$$\overline{\eta} = \cos\alpha \cdot \cos\theta\,\bar{i} + \sin\alpha \cdot \cos\theta\,\bar{j} + \sin\theta\,\bar{k} \qquad (22)$$

عند α =0 فإن المعادلة (22) تأخذ شكل المعادلة (9).

المتجه $\overline{\tau}$يتوضع في مستوي الناقل أي في مستوي المتجهين $\overline{\eta}$، $\overline{n}$ ما عدا ذلك فهو عمودي على المتجه $\overline{n}$ وطويلته تساوي الواحد . فإذا أخذنا بالحسبان هذه الشروط يمكننا أن نثبت رياضياً أن [10] :

$$\overline{\tau} = \frac{\overline{\eta} - (\overline{\eta} \cdot \overline{n})\overline{n}}{\sqrt{1 - (\overline{\eta} \cdot \overline{n})^2}} \qquad (23)$$



الشكل (3) مساقط الفتحة المائلة والحمولة على الناقل

فإذا كتبنا المعادلة (5) مع الأخذ بالحسبان (6) و (20) فإننا نحصل على :

$$\overline{R} = \frac{T_o}{P}\left[arcsh\frac{P}{T_o}S_o + arcsh\frac{P}{T_o}(S - S_o)\right]\cdot\overline{\tau} + \\ + \frac{T_o}{P}\left(\sqrt{1+\frac{P^2}{T_o^2}S_o^2} - \sqrt{1+\frac{P^2}{T_o^2}(S-S_o)^2}\right)\cdot\overline{n} \qquad (24)$$

في العلاقة (24) بالإضافة للمتغير S لدينا القيمة المجهولة S_o. ولتحديد متغيرات العلاقة السابقة يمكن أن يتم التعبير عنها من خلال قيم معروفة ولذلك يمكن استخدام قيمة طول الفتحة المكافئ، وذلك وفق رموز الشكل (1)، وبالتالي يمكن الكتابة [11]:

$$l_{e.1,2} = l_e + \frac{2T_o}{P}arcsh\frac{P\cdot l_n}{2T_o\cdot sh\dfrac{P\cdot l_\tau}{2T_o}} \qquad (25)$$

حيث :

l_{e1}, l_{e2} : الفتحة المكافئة الكبيرة والصغيرة على التوالي.

l_n, l_τ : مساقط المستقيم الواصل بين نقاط التعليق على المحاور τ ، n التي تنطبق مع اتجاه المتجهات $P, \overline{T}_o$.

يمكن أن نكتب من الشكل (1) العلاقات التالية :

$$\bar{l}_o = \bar{l}_\tau + \bar{l}_n$$

أو :

$$\bar{l}_o\cdot\overline{\eta} = \bar{l}_\tau\cdot\overline{\tau} + \bar{l}_n\cdot\overline{n}$$

من المساواة الأخيرة يمكن أن نكتب:

$$\bar{l}_\tau = l_o(\overline{\eta}\cdot\overline{\tau}) = l_o\sqrt{1-(\overline{\eta}\cdot\overline{n})^2} \qquad (27)$$

$$\bar{l}_\tau = l_o(\overline{\eta}\cdot\overline{\tau}) \qquad (28)$$

إذا بدلنا القيم l_n, l_τ في (24) يمكن كتابة قيمة الإحداثيات τ (الشكل(2)) للنقطة الصفرية للناقل بالنسبة لنقاط التعليق بالنسبة للنقطة A ($S = S_o$) :

$$\tau = \frac{l_{e1}}{2} = \frac{T_o}{P}arcsh\frac{P}{T_o}S_o \qquad (30)$$

من العلاقة (30) نوجد S_o :

$$S_o = \left(\frac{T_o}{P}\right)sh\frac{P\cdot l_{e1}}{T_o}{}_o \qquad (31)$$

بمعرفة S_o نكتب العلاقات (23) في الشكل النهائي التالي:

$$\overline{R} = \left[\frac{l_{e1}}{2} + \frac{T_o}{P} arcsh\left(\frac{P}{T_o} S - sh\frac{P \cdot l_{e1}}{2T_o}\right)\right] \cdot \overline{\tau} + + \frac{T_o}{P}\left(ch\frac{P \cdot l_{e1}}{2T_o} - \sqrt{1 + \left(\frac{P}{T_o} S - sh\frac{P \cdot l_{e1}}{2T_o}\right)^2}\right) \cdot \overline{n} \quad (32)$$

وضع النقطة السفلية من الناقل يحدد من الشرط $\overline{T}\ \overline{K} = 0$ حيث $\overline{K}$ متجه الواحدة الشاقولي(الشكل(1))، وهكذا فإن إحداثيات النقطة السفلية $\overline{R}_N$تساوي :

$$\overline{R}_N = \left[\frac{l_{e1}}{2} + \frac{T_o}{P} arcsh\left(\frac{\overline{\tau} \cdot \overline{K}}{\overline{n} \cdot \overline{K}}\right)\right] \cdot \overline{\tau} + + \frac{T_o}{P}\left(ch\frac{P \cdot l_{e1}}{2T_o} - \sqrt{1 + arcsh\frac{\overline{\tau} \cdot \overline{K}}{\overline{n} \cdot \overline{K}}}\right) \cdot \overline{n} \quad (33)$$

بعد إيجاد العبارة التحليلية لحساب إحداثيات النقطة السفلية لمنحني تعليق الناقل في الفراغ يمكن إيجاد النموذج الرياضي لحساب المسافة الدنيا ما بين هذه النقطة والمنشأة الهندسية ، وذلك باستخدام الطريقة المتجهية ، من خلال اعتبار الناقل والمنشأة الهندسية يقعان في جملة إحداثيات واحدة . بداية الناقل ونهايته وكذلك المنشأة الهندسية يعب عنها من خلال متجهات تبدأ من بداية الإحداثيات وسنعتبر أن المنشأة الهندسية معبر عنها من خلال نقطة أو من خلال قطعة مستقيمة ، وفي هذه الحالة سنوجد المسافة الأصغرية بن نقطتين أو بين نقطة وقطعة مستقيمة. المسافة الأصغرية بين نقطتين معروفة ولا تحتاج إلى دراسة ، وسنستخدم الصيغة مباشرة في البرنامج.

سنعالج الآن كيفية تحديد المسافة الأصغرية ما بين قطعة مستقيمة متوضعة بشكل عشوائي ، والتي تمثل جزءاً من المنشأة الهندسية وبين النقطة السفلية من الناقل.

المعادلة المتجهية البارامترية للمستقيم OA (الشكل (4)) تكتب بالشكل التالي[10]:

$$\overline{R}_1 = \overline{A} + \lambda_1\left(\overline{B} - \overline{A}\right) \quad (34)$$

حيث :

λ_1: متغير من 0 وحتى 1 .

معادلة نصف قطر المتجه المار من خلال متجهات نهاية القطعة المستقيمة والنقطة N تأخذ الشكل التالي:

$$R_{1N} = \sqrt{\left|\overline{AN}\right| + \lambda_1^2\left|\overline{AB}\right| - 2\lambda\left(\overline{AN} \cdot \overline{AB}\right)} \quad (35)$$

حيث :

$\left|\overline{AB}\right|, \left|\overline{AN}\right|$: طويلة المتجهات المقابلة L_{AB} , L_{AN}.

$\overline{AN}, \overline{AB}$: الجداء العددي (السلمي) لهذه المتجهات.

لتحديد المسافة الأصغرية ما بين قطعة مستقيمة متوضعة بشكل عشوائي في الفراغ ونقطة من الضروري أن نوجد القيمة الأصغرية للعلاقة (35)، والتي مجال تحديدها هو عبارة عن قطعة مستقيمة نهايتها 1 ,0 (الشكل (4)). إذا ساوينا المشتق لهذه العلاقة بالمحدد λ_1للصفر نحصل على :

$$\lambda_1^o = \frac{\left(\overline{AN} \cdot \overline{AB}\right)}{L^2 \cdot AB} AB$$

ولإيجاد النهاية الأصغرية أو الأعظمية لهذه الدالة في النقطة الحدية يجب أن نأخذ المشتق الثاني للعلاقة (35). التابع $R_{1N}(\lambda_1)$ يملك نهاية أعظمية عندما تتحقق المتراجحة التالية :

$$\frac{\partial^2 R_{1N}}{\partial \lambda_1^2} \prec 0$$

وأصغرية عندما :

$$\frac{\partial^2 R_{1N}}{\partial \lambda_1^2} \succ 0 .$$

الخطوة التالية هي تحديد النهاية الأعظمية أو الأصغرية لهذه الدالة على القطعة المستقيمة $1-0$:

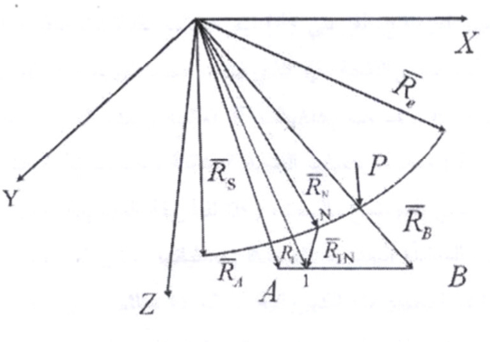
$$\frac{\partial^2 R_{1N}}{\partial \lambda_1^2} = \frac{L_{AB}^2 \cdot R_{1N} - \left[L_{AB}^2 \cdot \lambda_1 - \left(\overline{AN} \cdot \overline{AB}\right)\right] \frac{\partial R_{1N}}{\partial \lambda}}{R_{1N}^2}$$

بما أن $\frac{\partial R_{1N}}{\partial \lambda_1^2}$ عند λ_1^0 يساوي الصفر فإن :

$$\frac{\partial^2 R_{1N}}{\partial \lambda_1^2} = \frac{\left(\overline{AB}\right)^2}{R_{1N}}$$

بما أن $\frac{\partial^2 R_{1N}}{\partial \lambda_1^2}$ أكبر من الصفر فإن التابع داخل القطعة المستقيمة يملك نهاية أصغرية وعلى الحدود عندما $\lambda_1^0 = 0$ فإن $R_{1N} = \left|\overline{AN}\right|$ ، وعند $\lambda_1 = 1$ فإن :

$$R_{1N} = \sqrt{\left|\overline{AN}\right|^2 + \left|\overline{AB}\right|^2 - 2\left(\overline{AN} \cdot \overline{AB}\right)}$$



الشكل 4: المخطط الحسابي لتحديد المسافة الأصغرية عند تقاطع ناقل خطوط نقل القدرة الكهربائية مع منشأة هندسية معطاة إحداثياتها على شكل قطعة مستقيمة ($\overline{R}_s, \overline{R}_e$: المتجهات الحديّة التي تحدد إحداثيات تثبيت الناقل إلى الأبراج، P : الحمولة النوعية على وحدة طول الناقل، $\overline{R}_N$: المتجه الذي يحدد النقطة السفلى للناقل، $\overline{R}_A$: المتجه الذي يحدد بداية القطعة المستقيمة المحددة للمنشأة، $\overline{R}_B$: الإحداثيات التي تحدد نهاية القطعة المستقيمة المحددة للمنشأة.)

النتائج والمناقشة :

على أساس النموذج الرياضي الموصوف سابقاً تم وضع مخطط صندوقي مع برنامج بلغة C^{++} لحساب الارتفاع المناسب للأبراج الحاملة لخطوط نقل الطاقة الكهربائية عند تقاطعها مع منشآت هندسية . المخطط الصندوقي مبين على الشكل (5).

في الصندوق (1) يتم إدخال المعطيات الأولية والتي تشمل الأبعاد الهندسية والخواص الفيزيائية الميكانيكية لخطوط نقل الطاقة الكهربائية المأخوذة من المراجع التصميمية، وكذلك مجموعة الشروط المناخية المحددة في قواعد التجهيزات الكهربائية والمعايير التصميمية(سماكة طبقة الجليد، وسرعة الريح)، وإحداثيات المنشأة الهندسية والمسافة الأصغرية المسموح بها بين المنشأة والناقل والارتفاع للبرج .

في الصندوق(2)يتم حساب الارتفاع المحول للبرج بعد حساب سهم التدلي التقريبي، وفي التقريبات اللاحقة تمت عملية زيادته أو إنقاصه حتى نصل إلى المسافة المناسبة بين النقطة السفلى للناقل والمنشآت الهندسية وفي حال عدم التحقق من ذلك ينصح المستخدم باستخدام نوع آخر من النواقل Z. في الصندوق (3) لدينا البرنامج الفرعي لحساب القوى المناخية المؤثرة في نواقل خطوط نقل الطاقة إذ يتم حساب الحمولة الوزنية الناتجة عن وزن النواقل والقطع المباعدة ، كما يتم حساب الحمولة الريحية عندما يتجه الريح عمودياً على الفتحة، وعوامل التصحيح للحمولة الناتجة عن تأثير الريح المتجهة عمودياً في فتحة الناقل كعامل عدم تجانس ضغط سرعة الريح بالفتحة وعامل مدى تأثير طول الفتحة على الحمولة الريحية وعامل تصحيح زيادة ضغط سرعة الريح بالارتفاع، وعامل المقاومة الجبهي. طريقة حساب هذه العوامل موضحة على النموذج الراضي والمعادلات المستخرجة باستخدام طريقة الاستكمال الخطي، وتتوضع ضمن البرنامج، كما يتم إيجاد الحمولة الناتجة عن تأثير الجليد في الناقل، وسماكة طبقة لجليد التي تتعلق بارتفاع نقاط التعليق وقطر الناقل. حساب عوامل التصحيح تم بناءً على المعطيات المرجعية وباستعمال طريقة الاستكمال الخطي، وهي مستخدمة ضمن البرنامج مع مساقط قوى تأثير الريح بزاوية على خطوط نقل الطاقة الكهربائية وفرق الارتفاع وهذا لم يُؤخذ بالطرق التقليدية. في البرنامج الفرعي (4) تم حساب إحداثيات النقطة السفلية للناقل وذلك على النحو التالي: يحدد مساقط متجه الحمولة $\overline{\eta}$ الذي يحدد اتجاه المستقيم الواصل بين نقطتي التعليق للأبراج وبعد ذلك مساقط متجه الحمولة $\overline{n}$ وحساب إحداثيات $\overline{\tau}$ (متجه واحدة المماس لمنحني تعليق الناقل المتعامد مع الحمولة الإجمالية P) ، وبعد ذلك يتم حساب الفتحة المكافئة وحساب إحداثيات النقطة السفلية للناقل التي قمنا بإيجادها تحليلاً بالنموذج الرياضي الموضح في سياق البحث. في الصندوق(5) تم حساب المسافة الأصغرية بين الناقل والمنشأة الهندسية المعطاة إحداثياتها، وبعد ذلك تم إجراء مقارنة النتائج في الصندوق (6) بالمعايير الموجودة في قواعد التجهيزات الكهربائية ثم العودة مباشرة إلى الصندوق(2) . فإذا كانت المسافة أقل من المسموح بها تتم زيادة ارتفاع البرج ، وفي حالة العكس يتم في الصندوق(7) طباعة الارتفاع المناسب للبرج.

للتأكد من صحة النموذج المقترح والمبني على الطريقة المتجهية فقد قمنا بحساب إحداثيات النقطة السفلى بواسطته، والتي تشكل العصب الرئيسي في حساب المسافة بينها وبين المنشأة الهندسية المدروسة ، والتي على أساسها يتم حساب ارتفاع البرج مع مقارنة إحداثيات النقطة السفلية بالطريقة التقليدية المستخدمة والمستخرجة على اعتبار أن الناقل هو عبارة عن عارضة تؤثر فيها القوى نفسها التي تؤثر في الناقل، والتي تعدّ أن الريح تهب بشكل عمودي على الفتحة أما تأثير زاوية الميل فيحسب بشكل تقريبي. أجرينا بعض لحسابات لتوضيح تأثير زاوية الميل وزاوية هبوب الريح في مساقط الحمولة الريحية التي تؤثر بدورها في إحداثيات النقطة السفلية للناقل .

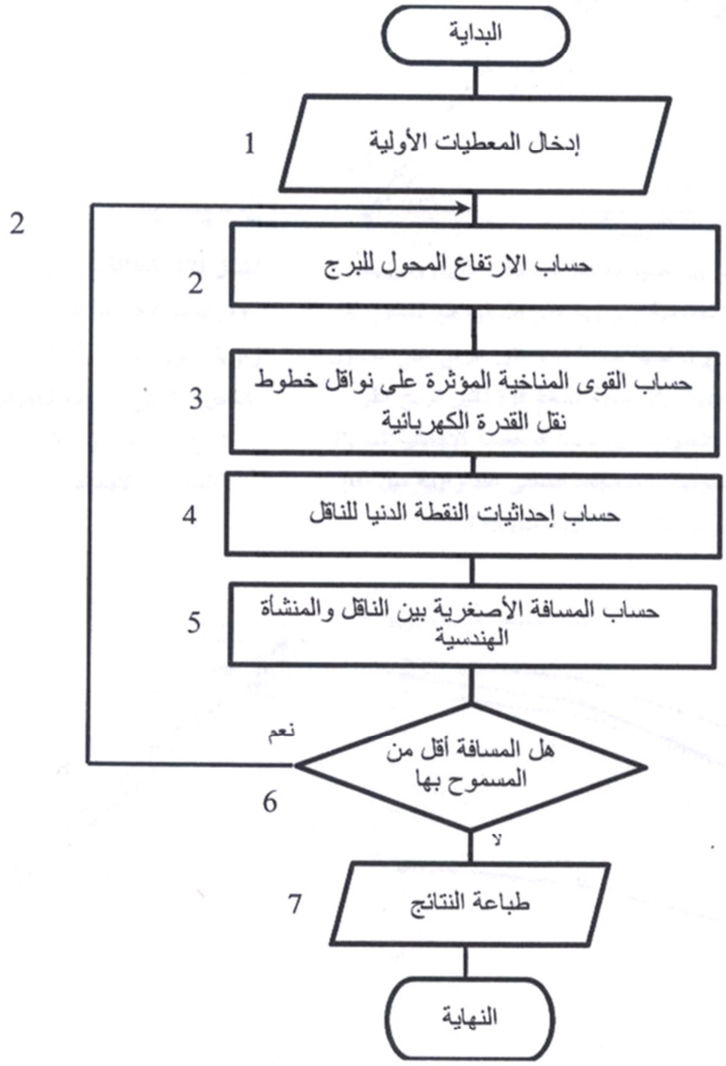
أجريت الحسابات على ناقل AC−400، وهو أحد النواقل المستخدمة في التوترات 220Kv ، والمعلق بين برجين . طول الفتحة 1000m ، والجهد في النقطة الصفرية $5.51\ kg/mm^2$ ، وسرعة الريح 30 m/s . الجدير ذكره أن البرنامج صالح لاستخدام أي ناقل وعند ظروف مناخية مختلفة وعند إجهادات مختلفة لحساب ارتفاع أي برج.

في البداية تمت دراسة تأثير زاوية هبوب الريح، والتي تشكل مساقطها عنصراً مهماً في الطريقة المتجهية الموضحة في النموذج الرياضي. نتائج الدراسة تم رسمها على الشكل(6) بواسطة برنامج الماتلاب. الشكل (6) يبين لنا أنه عند زاوية ميل تساوي الصفر نسبة المركبة P_X إلى المركبة العمودية تبلغ قيمتها الصفرية عند زاوية هبوب الريح(0^o) ، وتبلغ قيمتها الأعظمية عند زاوية هبوب (45^o) وتتناقص إلى الصفر عند زاوية هبوب مقدارها 90^o . أما نسبة المركبة الأفقية P_Y إلى المركبة العمودية للريح فإنها تبلغ قيمتها الصفرية عند الزاوية صفر ثم تزداد حتى تبلغ 80% من قيمتها عند زاوية 20^o ، و50% من قيمتها عند زاوية 45^o ، وعند زاوية 70^o تبلغ 90% من قيمتها .

أما عند زاوية ميل 35^o فإن نسبة مسقط القوى P_x على المركبة العمودية لهبوب الريح تبلغ عند الزاوية صفر 58%، وعند الزاوية 30^o تبلغ 60%، وعند الزاوية 55^o − 50%، وعند الزاوية 70^oتبلغ 32% ، وعند الزاوية 85 − 10% ، وعند 90 صفر . أما نسبة المركبة P_x إلى المركبة العمودية P_Y فإنها تبلغ الصفر .

عند الزاوية صفر وعند الزاوية 10^o −10% ، وعند زاوية 20^o −20%، وعند زاوية 40^o −50%، وعند زاوية 60 − 80% ، وعند زاوية 70 − 90%، وعند زاوية 90 − 100%.

لدراسة تأثير زاوية الميل تم إجراء حسابات لإيجاد مساقط هذه القوة على المحاور الإحداثية Y, X بالنموذج المقترح في البحث وعند زاوية هبوب ريح مقدارها 25درجة ، وكما هو مبين بالشكل (7) أنه عند زاوية ميل 0 تبلغ المسقط على المحور P_x حوالي 13% ويبلغ 24% عند زاوية ميل 20 درجة. أما المسقط P_Y فإنه تبلغ حوالي 38% يزدد ويبلغ حوالي 45 عند زاوية ميل مقدارها 20درجة.

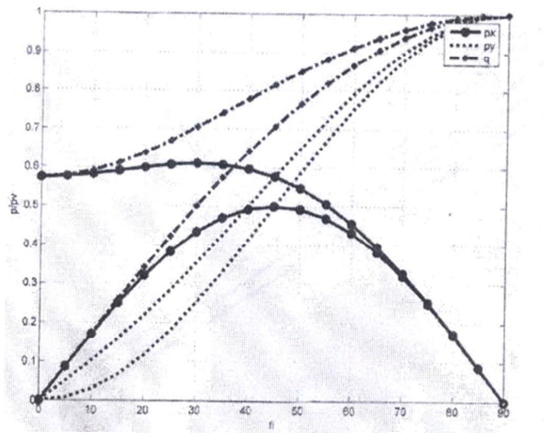


الشكل (5): المخطط الصندوقي لخوارزمية حساب الارتفاع المناسب للأبراج الحاملة لخطوط نقل القدرة الكهربائية

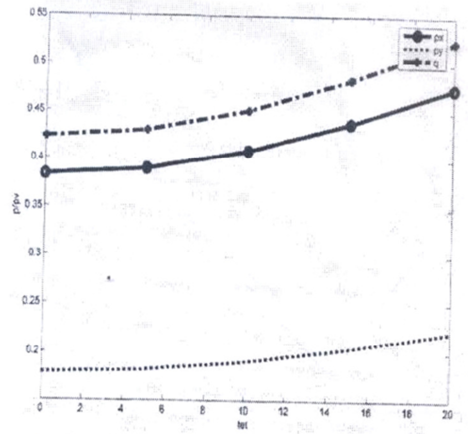
كما أجريت الحسابات لدراسة كيفية تأثير زاوية هبوب الريح وزاوية الميل في إحدثيات النقطة الدنيا للناقل بالطريقة المتجهية. ومقارنتها بالطريقة التقليدية . نتائج الحساب مع المقارنة مبينة على الأشكال (8)،(9)، (10).

الشكل (8) يبين لنا أنه مع تزايد زاوية الميل تنخفض الإحداثيات الأفقية للنقطة الدنيا للناقل . والفرق بين الحساب بالطريقة التقليدية والطريقة المتجهية عندما يتجه الريح عمودياً على الفتحة يزداد مع تزايد زاوية ميل الناقل حيث يبلغ عند زاوية ميل مقدارها 0 – 7% يزداد إلى 37% عند زاوية ميل مقدارها 15 درجة . أما عند حساب الإحداثيات الأفقية بزاوية هبوب للريح حوالي 45^o فإن الفرق بالحساب ما بين الطريقة المتجهية عندما يكون الريح عمودية وعند زاوية 45 يبلغ قيماً كبيرة تبلغ 50 وحتى 80. وهذا الفرق بالحساب بالطريقة المتجهية بزاوية هبوب قريبة من 90 كما هو مبين بالشكل (8) . عند زاوية 75 فإن هذا الفرق ينخفض. كما نرى على الشكل (9) مع تزايد زاوية

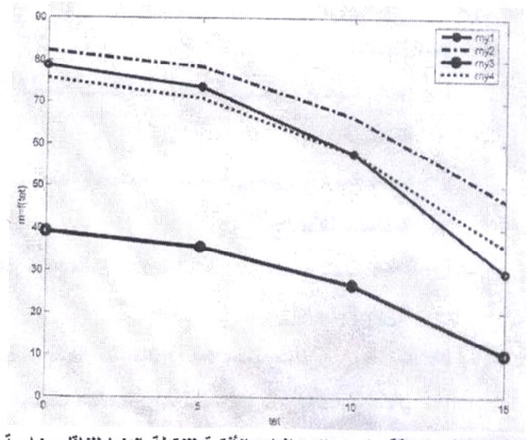
الميل فإن الإحداثيات الشاقولية للنقطة الدنيا للناقل تزداد. الفرق عند الحساب بالطريقة التقليدية والطريقة المتجهية عندما يتجه الريح عمودياً على الفتحة يتراوح ما بين 2− 11% وهو ما يشكل قيمة كبيرة تبلغ حتى 11m.



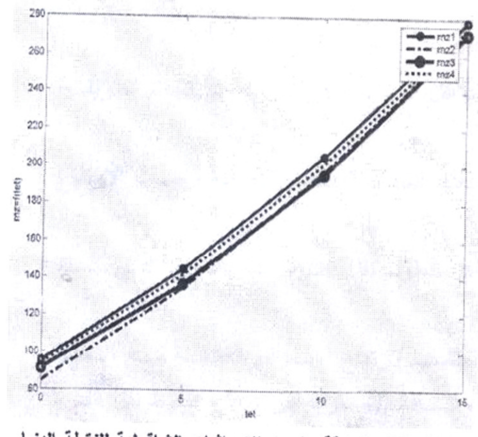
الشكل (6): العلاقة ما بين نسبة مساقط قوة تأثير الريح ومركبتها الإجمالية إلى المركبة العمودية والزاوية التي تشكلها مع المحور X عند زاوية ميل 0، 35 (P_x: نسبة مسقط قوة تأثير الريح على المحور X إلى المركبة العمودية، P_y: نسبة مسقط قوة تأثير الريح على المحور Y إلى المركبة العمودية، q: نسبة المحصلة الإجمالية لـ P_x وP_y على المركبة العمودية، المنحنيات السفلى عند زاوية ميل (0) والمنحنيات العليا عند زاوية ميل 35).



الشكل (7): العلاقة ما بين نسبة مساقط مركبة قوة تأثير الريح ومركبتها الإجمالية إلى المركبة العمودية وزاوية الميل عند زاوية هبوب ريح $25C°$ (P_x: نسبة مسقط تأثير الريح على المحور X إلى المركبة العمودية، P_y: نسبة مسقط قوة تأثير الريح على المحور Y وإلى المركبة العمودية، q: نسبة المحصلة الإجمالية (P_y, P_x) إلى المركبة العمودية).



الشكل (8): العلاقة ما بين الإحداثيات الأفقية للنقطة الدنيا للناقل وزاوية الميل (r_{ny1}، r_{ny2}: الإحداثيات الأفقية للنقطة الدنيل للناقل عندما يتجه الريح عمودياً على الفتحة بالطريقة المتجهية والتقليدية على التوالي. r_{ny3}، r_{ny4}: الإحداثيات الأفقية للنقطة الدنيا للناقل بالطريقة المتجهية عندما يتجه الريح بزاوية مقدارها $45°$ و $75°$ على الفتحة على التوالي).

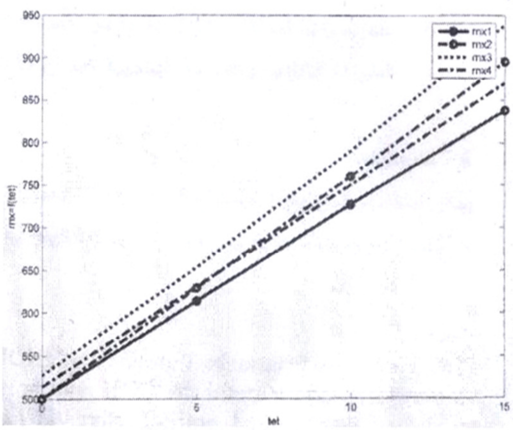


الشكل (9): العلاقة ما بين الإحداثيات الشاقولية للنقطة الدنيا للناقل وزاوية الميل (r_{nz1}، r_{nz1}: الإحداثيات الشاقولية للنقطة الدنيا للناقل عندما يتجه الريح عمودياً على الفتحة بالطريقة المتجهية والتقليدية على التوالي. r_{nz3}، r_{nz4}: الإحداثيات الشاقولية للنقطة الدنيا للناقل بالطريقة المتجهية عندما يتجه الريح بزاوية مقدارها $45°$ و $75°$ للفتحة على التوالي.

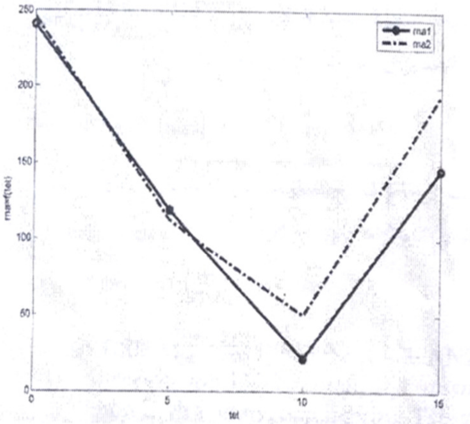
الفرق بالحساب بالطريقة المتجهية عند هبوب الريح بزاوية مقدارها 75 درجة على الفتحة يزداد بمقدار 1−2% ، وهذا الفرق يزداد مع تناقص زاوية الهبوب إذ تبلغ عند الزاوية45 درجة من 2−6 مقارنة بالحساب عند الزاوية 90.

الشكل (10) يبين لنا أنه مع تزايد زاوية الميل فإن إحداثيات النقطة الدنيل للناقل على المحور X تزداد. الفرق عند الحساب بالطريقة التقليدية والطريقة المتجهية أنه عندما تتجه الريح عمودياً على الفتحة يتراوح ما بين (1−2)%. أما الفرق ما بين الحساب بالطريقة المتجهية عند هبوب ريح بزاوية مدارها 75 درجة على الفتحة وعندما يكون عمودياً فيبلغ (2−4)% ، وعند زاوية مقدارها 45^{o} (5−12)%.

كما تم حساب المسافة الصغرية ما بين إحداثيات معطاة لمنشأة هندسية والنقطة الدنيا للناقل عندما تهب الريح بشكل عمودي بالبرنامج وبالطريقة التقليدية ، فكما هو واضح فإنه عند زاوية ميل صغرى هناك انطباقً ما بين حساب المسافة الأصغرية ما بين الطريقة التقليدية والطريقة المتجهية المستخدمة في البرنامج، وهذا الفرق يزداد مع زيادة زاوية الميل .



الشكل (10): العلاقة ما بين مساقط إحداثيات النقطة الدنيا للناقل على المحور X وزاوية الميل r_{nx1} ، r_{nx2} : إحداثيات النقطة الدنيا للناقل على المحور X عندما يتجه الريح عمودياً على الفتحة بالطريقة المتجهية والتقليدية على التوالي، r_{nx3} ، r_{nx4} : إحداثيات النقطة الدنيا للناقل بالطريقة المتجهية عندما يتجه الريح بزاوية مقدارها 45° و 75° للفتحة على التوالي).



الشكل (11): تغير المسافة الأصغرية ما بين المنشأة الهندسية والناقل عند تغير زاوية الميل عند هبوب الريح بشكل عمودي على الناقل (r_{nq1} : المسافة الأصغرية ما بين الناقل والمنشأة الهندسية محسوبة بالبرنامج، r_{nq2} : المسافة الأصغرية ما بين الناقل والمنشأة الهندسية محسوبة بالطريقة التقليدية).

الاستنتاجات:

1. إعداد نموذج رياضي لحساب إحداثيات النقطة الدنيا للنواقل الكهربائية في الفراغ باستخدام الطريقة المتجهية .
2. إعداد نموذج رياضي لحساب المسافة الأصغرية بين النقطة الدنيا للنواقل والمنشآت الهندسية مع حساب الارتفاع المناسب للأبراج.
3. إعداد نموذج رياضي لحساب القوى المؤثرة في نواقل خطوط نقل الطاقة الكهربائية بما في ذلك الريح المتجهة بزاوية على الفتحة .
4. تم وضع برنامج بلغة C^{++} يتيح لنا القيام بالحساب المناسب لارتفاع الأبراج الحاملة مع الأخذ بالحسبان تأثير الريح مهما كان اتجاهها بالنسبة للناقل، والمسافة الأصغرية بين نواقل خطوط نقل القدرة الكهربائية والمنشآت الهندسية. وهذا البرنامج يمكن استخدامه في التطبيقات العملة لهذه الغاية.

5. الإحداثيات الشاقولية للنقطة الدنيا للناقل تزداد مع زيادة زاوية الميل. أما الإحداثيات الأفقية فتنخفض والإحداثيات على المحور X تزداد. الفرق بالحساب بين الطريقة التقليدية والمتجهية عندما يكون الريح عمودياً على الفتحة تبلغ من (2–7)% لإحداثيات النقطة الدنيا للناقل على المحور X ومن (7–37)% لإحداثيات النقطة الدنيا للناقل على المحور Y ومن (1–2)% لإحداثيات النقطة الدنيا للناقل على المحور Z.
6. عند حساب المسافة الأصغرية ما بين المنشأة الهندسية والنقطة الدنيا للناقل فإن هناك تطابق ما بين الطريقة التقليدية والمتجهية عند زوايا الميل الصغرى ويزداد الفرق مع زيادة زاوية الميل.

التوصيات :

يمكن استخدام البرنامج الموضوع في التطبيقات العملية لحساب ارتفاع أبراج خطوط نقل الطاقة الكهربائية، وحساب المسافة الأصغرية بين النواقل والمنشآت الهندسية، وحساب القوى المؤثرة في النواقل.

المراجع :

1. LEI, H.; LIMCING, W.; GUANZHICHENG. Design of interphase composite spacer for 500 Kv compute Transmission line.XIXthed, international symposium on high voltage engineering Tsinghua University, Beijing, China,2005.
2. HUSAIN, A. Electrical power systems. Delhi, India,1998, 270.
3. BCHINAKOVICH, A.D. Mechanical calculation power transmission lines. Industrial press, USSR, 1990,284.
4. SCH LABBACH S; ROFASILI,K.H. Power system Engineering. WILGY-VCH Verlag G mbh & COKGTA,FRG,2008,350.
5. GRIGSBY,L.L. Electric power generation, Transmission, and Distribution CRC Press, USA,2007,600.
6. *الحساب الستاتيكي لقضبان التجميع اللدنة لمحطات توزيع الطاقة المكشوفة* . مجلة جامعة حلب ، سوريا، سلسلة العلوم الهندسية، العدد 2012،103، 18.
7. الميرمي سعيد . *مبادئ التحليل العددي* . الدار العربية للكتاب، ليبيا ، 1994، 288.
8. NAKAMURA .Applied Numerical Methods in shoichiro. Ohio University,USA,2000,604.
9. BKMETOVE, B,M. Span length approximation effect in the wind power effect calculation of electric power transmission lines . N 4, power press, Moscow, USSR,1984,52-53.
10. COLDVEIN, E. The vectorial analysis and the field theory. The Sciences, Linengrad, Moscow,USSR,1988,180.
11. KISSLMAN, L. M. Electric power Conductors Calculation Methods in the Mountains Zones. Power press, Moscow, USSR,1990,184