الفصل العاشر

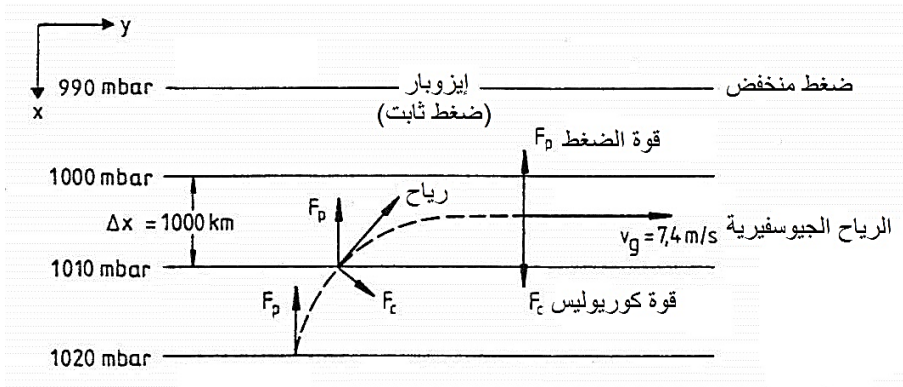
طاقة الرياح

1-10 نشوء الرياح:

نتيجة الاشعاع الشمسي المتفاوت على مساحات واسعة من الكرة الارضية تنشأ فوارق ملحوظة في درجات الحرارة وبالتالي في الضغط الجوي مما يتسبب في اندفاع الهواء من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضغط المنخفض. حركة الهواء هذه تدعى رياحا.

إن التاثير الاولي للقوة F_P (قوة فرق الضغط) يضاف إلى القوة الناتجة عن تأثير دوران الارض (الحركة النسبية للكتلة الهوائية) أو قوة كوريوليس F_c .

يبين الشكل (1-10) آلية تأثير هذه القوى على حركة الرياح



شكل (1-10) مثال عددي على الرياح الجيوسفيرية في النصف الشمالي للكرة الارضية

في نصف الكرة الشمالي تؤثر قوة كوريوليس دافعة التيارات الهوائية نحو اليمين عند النظر باتجاه حركة الرياح، بينما يكون الدفع نحو اليسار في نصف الكرة الجنوبي.

إن الرياح التي تنشأ تحت تأثير القوتين السابقتين تسير وفق خطوط الضغط الثابت أو موازية لها عندما تتساوى القوتين Fc, Fp وتسمى بالرياح الجيوسفيرية. تساوي قوة كوريوليس إلى جداء تسارع كوريوليس الذي يسود على خط عرض معين وكتلة جزيئة الهواء المتحركة أو:

$$\langle 1-10 \rangle \qquad Fc = 2\omega \sin\beta\, \vartheta g \Delta x \Delta y \Delta z.\, \rho a \qquad [N]$$

ω : السرعة الزاوية لدوران الأرض عند القطبين $[1/s]$

$\sin\beta$: السرعة الزاوية لدوران الارض عند خط العرض $\beta[1/s]$

$\Delta x \Delta y \Delta z$: حجم جزيئة الهواء المدروسة $[m^3]$

ρa : كثافة الهواء $[kg/m^3]$

ϑg : سرعة الرياح الجيوسفيرية $[m/s]$

تساوي قوة الضغط المؤثرة على جزيئة الهواء إلى جداء فرق الضغط والمساحة التي تشغلها الجزيئة أو:

$$\langle 2-10\rangle \qquad Fp = \Delta p \Delta y \Delta z \qquad [N]$$

Δp : فرق الضغط المثر على جزيئة الهواء $[N/m^2]$

$\Delta y \Delta z$: المساحة التي تشغلها الجزيئة $[m^2]$

من العلاقة $\langle 1-10\rangle$ والعلاقة $\langle 2-10\rangle$ ينتج من أجل $Fp = Fc$:

$$\langle 3-10\rangle \qquad \Delta p = 2\omega \sin\beta \, \vartheta g \Delta x . \rho a \qquad [N]$$

وتحسب السرعة الجيوسفيرية من العلاقة:

$$\langle 4-10\rangle \qquad \vartheta g = \frac{\Delta p}{\Delta x} . \frac{1}{2\omega \, \rho a \sin\beta} \qquad [m/s]$$

نلاحظ أن نسبة تغير الضغط $\Delta p/\Delta x$ تعتبر مقياسا للسرعة الجيوسفيرية عند خط عرض معين.

مثال: أوجد السرعة الجيوسفيرية عند خط عرض 50 شمالاً إذا بلغ معدل تغير الضغط $\Delta p = 10\ [mbar]$ لكل مسافة $\Delta x = 1000\ [km]$

الحل:

نحسب سرعة دوران الارض:

$$w = \frac{2\pi}{24.60.60} = 7.3.10^{-5} \qquad [\ s^{-1}]$$

ونعتبر $\rho_a = 1.2 \qquad [kg/m^3]$

عندها:

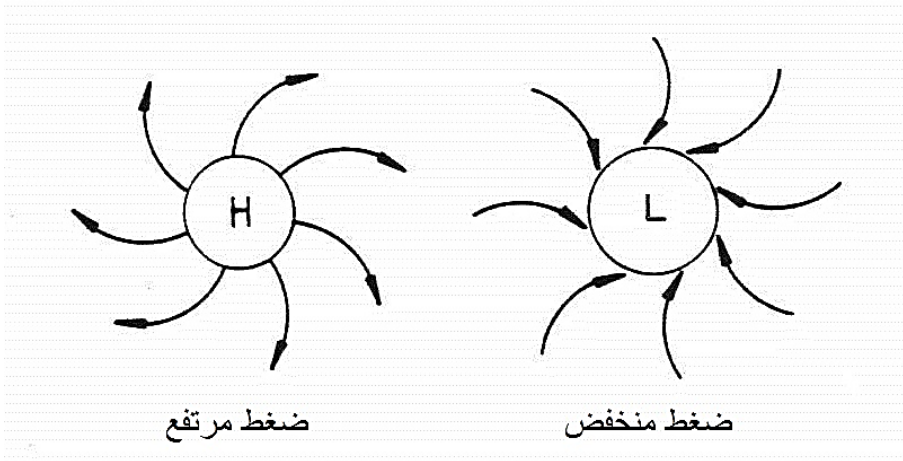
$$\vartheta g = \frac{1000}{1000.10^3} \cdot \frac{1}{2.7{,}3 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}2 . \sin 50}$$

أو:

$$\vartheta g = 7{,}4 \qquad [m/s]$$

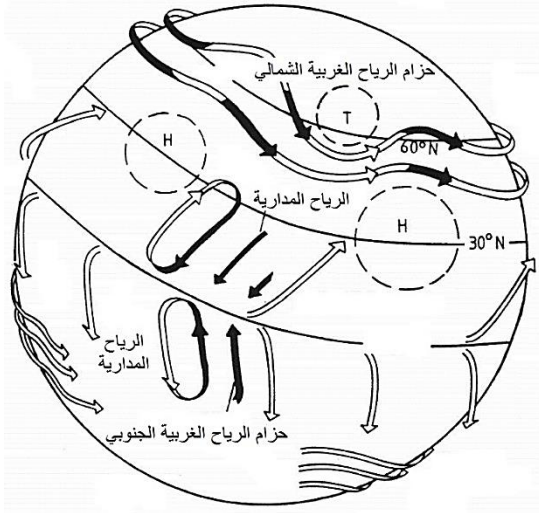
إذا كان مسار الريح منحنيا تؤثر على جزيئة الهواء قوة طاردة مركزية إضافة إلى قوتي الضغط وكوريوليس ولا تكون الرياح عندها جيوسفيرية. تؤثر على حركة الرياح قرب سطح الارض أيضا قوة الاحتكاك بسطح الارض وتتشكل طبقة حدية بارتفاع يتراوح بين m600 – m300 تكون فيها سرعة الرياح أقل من السرعة الحرة في الطبقات الاعلى ويؤدي ذلك إلى انحراف مسار الريح عن خطوط الضغط الثابت، ويزداد هذا الانحراف مع الاقتراب من سطح الأرض، بينما تكون تيارات الهواء في الطبقات فوق الحدية أقرب إلى مسايرة خطوط (ايزوبار) الضغط الثابت.

يبين الشكل 10–2 مبدأ حركة التيارات الهوائية قرب سطح الارض في مناطق الضغط المنخفض والمرتفع في نصف الكرة الشمالي.



شكل (10–2) حركة التيارات الهوائية قرب سطح الارض في مناطق الضغط المرتفع والضغط المنخفض في نصف الكرة الشمالي

يميز على الارض نوعان أساسيان من الرياح –الرياح المدارية وحزامي الرياح الغربية الشمالي والجنوبي كما في الشكل 10–3 والقوة الاساسية المحركة للرياح المدارية هو الاشعاع الشمسي الشديد في منطقة خط الاستواء



شكل10–3 مخطط مبسط لنظام حركة الرياح الرئيسي على الارض

الذي يسخن الهواء فيتجه نحو الاعلى ثم شمالا وجنوبا في الارتفاعات العليا وبسبب قوة كوريوليس تنحف التيارات شرقا وقبل وصولها إلى خط عرض 30شمالا وجنوبا تكون قد بردت فتنخفض وتعود لتتجه إلى خط الاستواء وتنحرف بسبب قوة كوريوليس نحو الغرب.

فأغلب الاحيان تتأثر هذه التيارات بتيارات ناشئة عن التسخين المحلي ولا تبقى الصورة واضحة كما هو مبين في الشكل 10–3.

في المناطق الشمالية والجنوبية من الكرة الارضية وعند خط عرض $\beta = 60$ تسود الرياح الغربية التي تشكل ما يشبه الحزام حول الارض. وتختلف طبيعة وشدة هذه الرياح إلى حد كبير حسب شدة تأثرها بالتيارات المحلية. مثال على رياح مميزة وشديدة رياح شمال الاطلسي المعروفة للطيارين حيث تحتاج الطائرة في عبورها من أوروبا إلى أمريكا الشمالية وقت أكبر بكثير من الوقت اللازم للاتجاه المعاكس. وتكون الرياح هنا شديدة بسبب تأثرها بالتيارات المحلية الناتجة عن التيارات البحرية المتجهة من أمريكا جنوبا إلى شمال شرق المحيط الاطلسي.

القوة المحركة لحزامي الرياح الغربية الشمالي والجنوبي هي الفوارق الكبيرة في الضغط والحرارة بين خطي عرض 30 و70 شمالا وجنوباً. وتعتبر الرياح الغربية شمالا وجنوبا أوفر طاقة وأكثر جدوى لاستثمار الرياح كأحد أشكال الطاقات المتجددة من المناطق المدارية.

10-2حركة الرياح:

10-2-1 شدة الرياح:

تقسم سرة الرياح وفق مقياس بيوفورت (Beaufort) إلى 12 درجة وفق الجدول 10-1

10-2-2 اتجاه الرياح:

كاتجاه الرياح نعتمد عادة الاتجاه الجهة التي تهب منها الرياح. يتوضع القطر العربي السوري على خطوط عرض تقع شمال المنطقة المدارية مباشرة ولا تنتمي إلى منطقة الرياح الغربية الشمالية وبالتالي لا يعتبر القطر غنيا بموارده الريحية. ومع ذلك يؤدي انزياح الكتل الهوائية النشطة ووجود ساحل على بحر متوسط النشاط إلى نشوء فعاليات جوية مقبولة وخاصة على بعض مناطق القطر المفتوحة نسبياً على البحر.

جدول (10-1) شدة الريح حسب مقياس بيوفورت

شدة الرياح	مجال سرعة الرياح [m/s]	تأثير الرياح
0 ساكنة	0 ÷ 0.2	يتحرك الدخان عاموديا
1 خفيف جدا	0.3 ÷ 1.5	يتحرك الدخان بشكل مائل
2 خفيفة (نسيم)	1.6 ÷ 3.3	حركة الهواء محسوسة
3 رياح ضعيفة	3.4 ÷ 5.4	حركة أوراق الشجر
4 رياح معتدلة	5.5 ÷ 7.9	حركة أغصان الشجر
5 رياح نشيطة	8 ÷ 10.7	حركة فروع الشجر
6 رياح قوية	10.8 ÷ 13.8	يسمع عويل الرياح
7 رياح شديدة	13.9 ÷ 17.1	حركة جذوع الأشجار
8 شبه عاصفة	17.2 ÷ 20.7	انحناء جذوع الأشجار-صعوبة في السير
9 عاصفة	20.8 ÷ 24.4	انتزاع قرميد الأسطح
10 عاصفة شديدة	24.5 ÷ 28.4	اقتلاع الأشجار
11 عاصفة إعصارية	28.5 ÷ 32.6	تأثير مدمر
12 إعصار	32.7 -36.9	تدمير شامل

الاتجاه الأكثر شيوعاً للرياح ذات القيمة الاستثمارية. هو الاتجاه الغربي وجزئياً الشمال الغربي والجنوب الغربي.

10 – 2 – 3 سرعة الرياح الوسطية:

يمكن حساب القيمة الوسطية السنوية لسرعة الرياح لمنطقة معينة من العلاقة التالية:

$$\langle 5-10\rangle \qquad \overline{\vartheta_1} = \frac{\int_1^2 \vartheta . dt}{t_2 - t_1} \qquad [m/s]$$

من العلاقة السابقة:

$\overline{\vartheta_1}$: القيمة الوسطى لسرعة الرياح في سنة معينة i $[m/s]$

ϑ : سرعة الرياح $[m/s]$

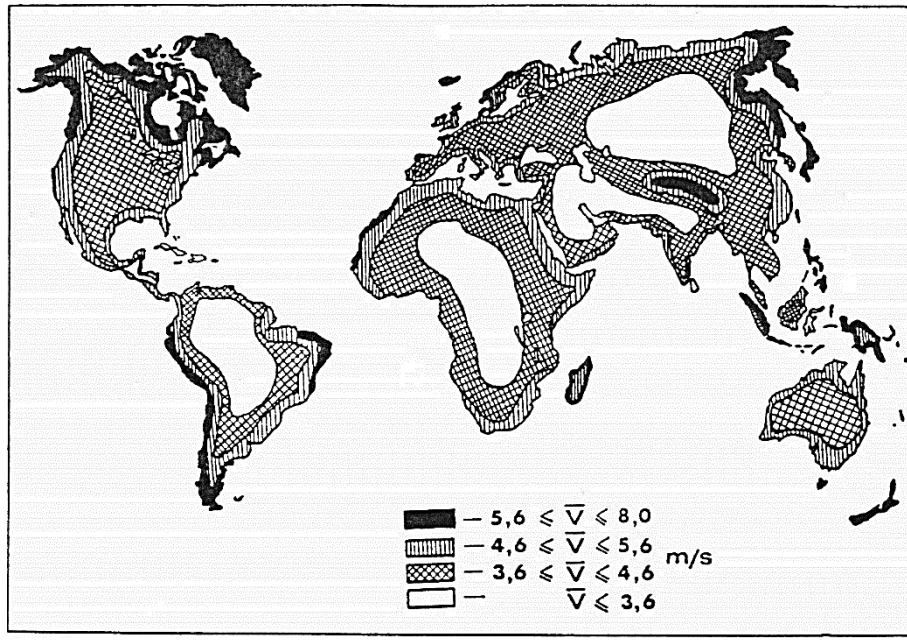
t : الزمن $[s]$

$t_2 - t_1$: الفترة الزمنية $[s]$

يتم إيجاد القيمة الوسطية السنوية لسرعة الرياح لسنوات عديدة n ثم ايجاد متوسط القيم وتعتمد كسرعة وسطية سنوية حسابية:

$$\langle 6-10\rangle \qquad \overline{\vartheta} = \frac{1}{n} . \sum_1^n \overline{\vartheta}_i \qquad [m/s]$$

إن سرعة الرياح فوق البحر المتوسط تبدأ بالتناقص بعد وصولها إلى الشاطئ بسبب الاحتكاك بتضاريس الأرض وبالتالي فالسرعة على الشاطئ تكون أكبر منها في المناطق الداخلية.



شكل 4–10 توزع سرعة الرياح الوسطية السنوية على اليابسة

يبين الشكل (4–10) ذلك جيداً حيث يكون متوسط سرعات الرياح في المناطق الداخلية القارية (اللون الأبيض) منخفضاً. بينما يكون متوسط سرعات الرياح على الشواطئ هو الأعلى (لا سيما في منطقتي حزامي الريح الغربيين، الشمالي والجنوبي)

10–2–4 سرعة الرياح الوسطية الشهرية:

تحسب سرعة الرياح الوسطية الشهرية بنفس طريقة حساب السرعة الوسطية السنوية حيث تمثل القيمة الوسطية للسرعات الآلية خلال الفترة الزمنية للشهر المعني.

وتعطى السرعة الوسطية الشهرية تصورا أكثر وضوحا لسرعة الرياح في منطقة معنية من السرعة الوسطية السنوية.

10-2-5 بروفيل السرعة الشاقولية:

بسبب عدم استواء سطح الأرض تتشكل بالقرب من سطح الأرض طبقة حدية تكون سرعة الرياح فيها بسبب الاحتكاك والموانع أقل من سرعة التيارات الحرة في الأعلى، وتختلف سماكة هذه الطبقة حسب نوع العوائق والتضاريس وقد يصل ارتفاع هذه الطبقة إلى $600[\mathrm{m}]$ وأكثر.

في حالة الكثير من العنفات الريحية يتطلب الحصول على محصول جيد ارتفاع يصل إلى $200[\mathrm{m}]$.

يمكن إيجاد السرعة الوسطية على ارتفاع H من العلاقة التالية:

$$\langle 6-10\rangle \qquad \bar{\vartheta}_{\mathrm{H}} = \bar{\vartheta}_{10}\left(\frac{\mathrm{H}}{10}\right)^{\mathrm{g}} \qquad [\mathrm{m/s}]$$

H : الارتفاع $[\mathrm{m}]$

g : معامل الخشونة لسطح الأرض $[-]$

$\bar{\vartheta}_{\mathrm{H}}$: السرعة الوسطية على ارتفاع H $[\mathrm{m/s}]$

$\bar{\vartheta}_{10}$: السرعة الوسطية على ارتفاع $10[\mathrm{m}]$ $[\mathrm{m/s}]$

أما قيم g فهي:

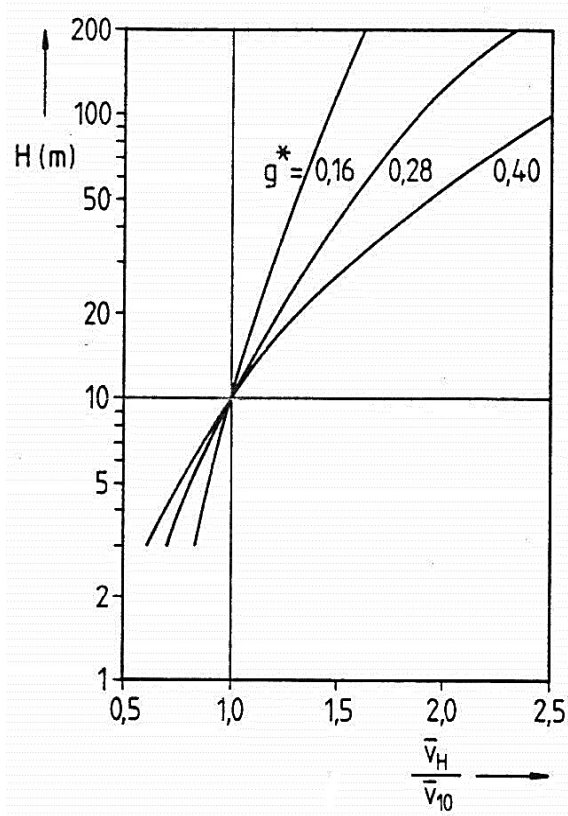
0.16 : للمناطق المنبسطة السهلية.

0.28 : لمناطق ذات عوائق متوسطة بارتفاعات من 10 إلى 15 متر.

0.4 : المناطق ذات عوائق كبيرة نسبيا مثل الأشجار العالية والأبنية الشاهقة وكذلك التلال والجبال.

وتكفي دقة العلاقة السابقة لارتفاعات تصل إلى $200[\mathrm{m}]$ أما لارتفاعات أكبر فيؤثر تغير درجات الحرارة على سرعة الرياح، يبين الشكل (10-5) تأثير احتكاك سطح الأرض على سرعة

الرياح على ارتفاعات مختلفة وتكون سرعة الرياح عند ارتفاع [m]100 أكبر بـ 2.5 مرة من تلك عدن ارتفاع [m]10 عندما تكون العوائق كبيرة.



الشكل (10 –5) تأثير احتكاك سطح الأرض على سرعة الرياح على ارتفاعات مختلفة

10–2–6 تكرار سرعة الرياح:

يفيد فهم تكرار سرعة الرياح في إبراز صورة أكثر وضوحا لميزات الرياح الطاقية بينما لا تقدم السرعة الوسطية المعلومات الكافية حيث يتم دراسة السرعات المختلفة على مدى ساعات العام البالغة 8760 ساعة.

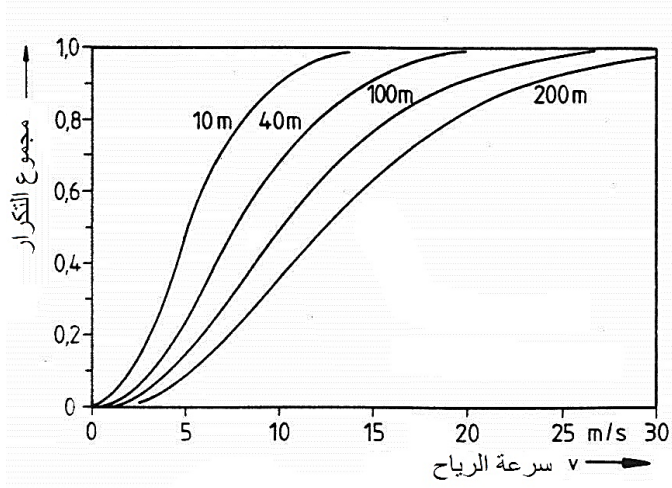
يبين الجدول (10–2) تكرار السرعة لثلاث مناطق غنية ومتوسطة الغنى وفقيرة بمحصول طاقة الرياح. قياسات السرعة مأخوذة على ارتفاع 15 متر.

جدول (10–2) تكرار السرعة لمناطق مختلفة الغنى بطاقة الرياح

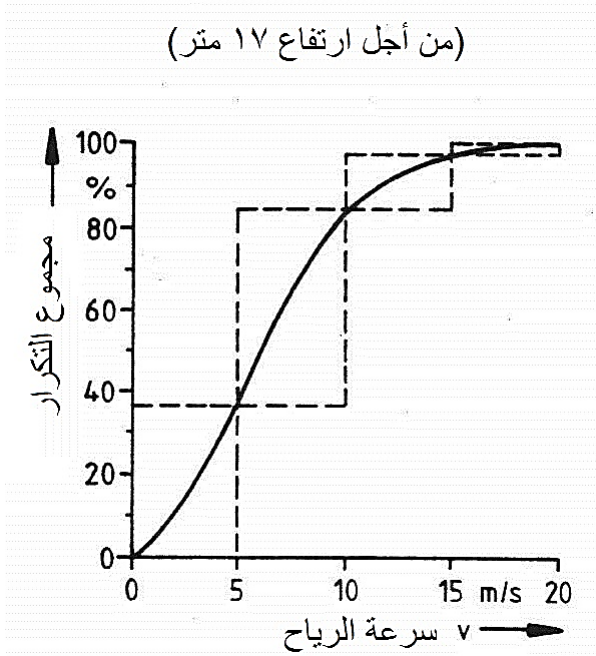
غنى المنطقة بطاقة الرياح	تكرار السرعة				السرعة الوسطية السنوية
	0–5 $\frac{m}{s}$	5–10	10–15	15–20	
غنية	0.25	0.55	0.17	0.03	7.5
متوسطة الغنى	0.45	0.5	0.05	0.00	5.5
فقيرة	0.8	0.17	0.03	0.00	2.5

يلاحظ انه في المناطق الفقيرة يأخذ المجال الأول قيمة عظمى بينما تكون القيمة العظمى في المناطق الغنية في المجال التالي ويكون مجموع التكرار للمجال الثاني والثالث والمفيدين اقتصاديا يبلغ حوالي 0.72 للمناطق الغنية و0.2 للمناطق الفقيرة و0.55 للمناطق المتوسطة الغنى. يبين الشكل (10–6) مجموع تكرار لمنطقة غنية بطاقة الرياح من أجل ارتفاعات مختلفة. تفيد مخططات كهذه في حساب محصول الطاقة في منطقة معينة عند تحديد نوع العنفات الريحية.

بينما الشكل (10–7) يبين مجموع التكرار لنفس المنطقة إنما على ارتفاع 17 متر. يبين الشكل كذلك مجموع التكرارات للمجالات الواردة في المجدول (10–2) بشكل مفصل.



شكل (10–6) مجموع التكرار لمنطقة غنية بطاقة الريح من أجل ارتفاعات مختلفة



شكل (10–7) مجموع التكرار لنفس المنطقة الواردة في الشكل (10–6) من أجل ارتفاع 17 متر.

10-2-7 القيم الحدية لسرعة الرياح وفترات السكون الكافي:

بسبب الحركة الغير منتظمة للرياح تتغير سرعة الرياح واتجاهها بشكل مفاجئ ولفترات قصيرة. وتنتج القيم الحدية لسرعة الريح في حالتي الهبوب الشديد أو سكون الرياح. فقد تحدث فترات تكون فيها سرعة الرياح أقل من السرعة اللازمة لتشغيل العنفة الهوائية.

تسمى هذه الفترات بفترات السكون الطاقي لا تعمل خلالها العنفة الريحية، أما القيم العظمى لسرعة الريح فلها اهمية خاصة للحسابات التصميمية لمتانة الريش وعناصر الحركة واستقرار العنفة.

وتعتبر بشكل عام السرعة الحدية للسكون الطاقي للعنفات الحديثة $5[m/s]$ رغم أن القيمة المتعارف عليها متريولوجيا هي $3[m/s]$.

بعض العنفات الحديثة تعمل عند سرعات أدنى من$5[m/s]$. أي أن السرعة الحدية للسكون الطاقي تكون بين $3 \div 5[m/s]$ بينما تكون السرعة الحدية للعنفات البطيئة غالباً بحدود $3[m/s]$.

تزداد فترات السكون الطاقي في المناطق الفقيرة بطاقة الريح وتكون أقل في المناطق الغنية بطاقة الريح ويقل أو يزداد الإنتاج النوعي للطاقة للعنفات الريحية ويلعب ذلك الدور الرئيسي في اختيار المناطق المناسبة لاستثمار طاقة الرياح.

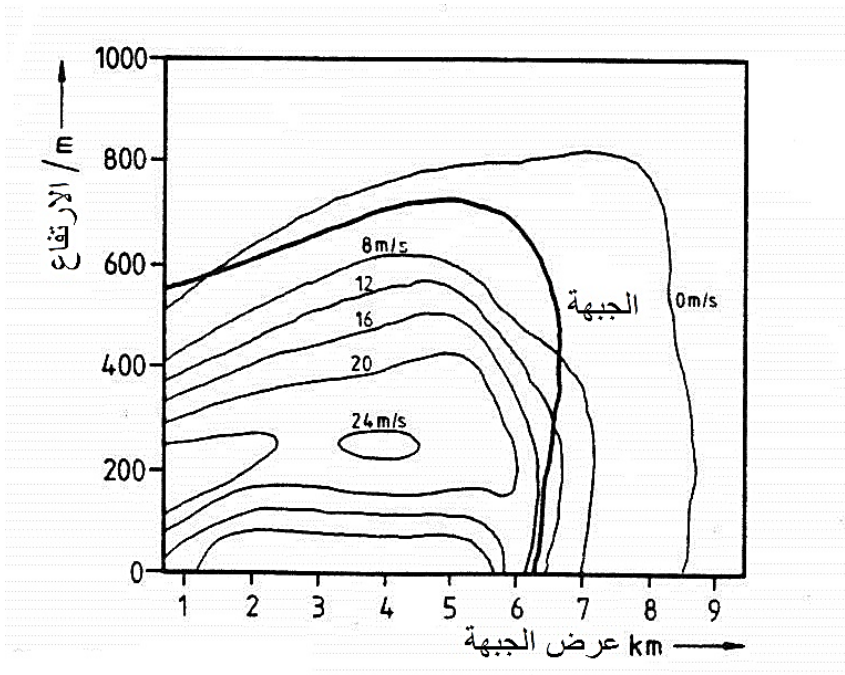
كذلك فإن الرياح تكون أقل نشاطا في فصل الصيف وتزداد فترات السكون الطاقي أما شتاءً فتكون أكثر نشاطا مما يتيح مزيدا من الطاقة يمكن استثمارها لأغراض التدفئة.

يتسبب الهبوب المفاجئ في إحداث سرعات حدية عالية لفترات قصيرة، يمكن الحكم على شدتها بمعامل الهبوب $k = \vartheta_{max}/\bar{\vartheta}$ والذي يمثل النسبة للسرعة العظمى والسرعة الوسطية خلال فترة زمنية قصيرة (حوالي 10 دقائق) وتتراوح قيمة الهبوب غالبا بين 1,1 و 1,9 وتصل القيمة العظمى لسرعة الريح في حالة الهبوب إلى 6 أو 7 أضعاف السرعة الوسطية السنوية ويتم مراعاة ذلك في الحسابات التصميمية للريش والعنفة.

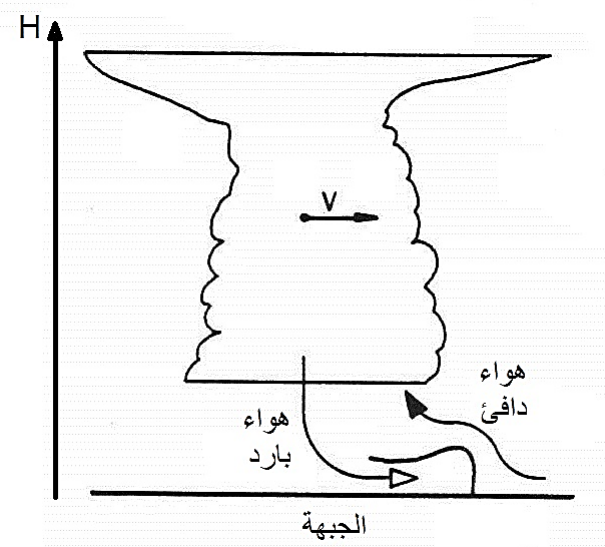
وعندها يجب أخذ أثر الارتفاع بالحسبان أيضا حيث تكون سرعة الهبات عند ارتفاع 150 متر مثلا أعلى بحوالي 50%.

وبسبب التبريد السريع للعواء في الغيوم المثلجة غالبا ما تحدث تيارات صاعدة وهابطة تتسبب في زيادة سرعة الريح عند الارتفاع المذكور إلى ضعفين أو ثلاثة أضعاف أحيانا.

الشكل (10–8) يبين طريقة تشكل هبات كهذه وتوزع سرعات الريح في مقطع شاقولي لجهة هبوب بينما الشكل (10–9) التيارات الصاعدة والهابطة مع تغير السرعة شاقولياً (طريقة تشكل الهبات).



شكل (10–8) توزع لسرعات الرياح في مقطع شاقولي لجهة هبوب

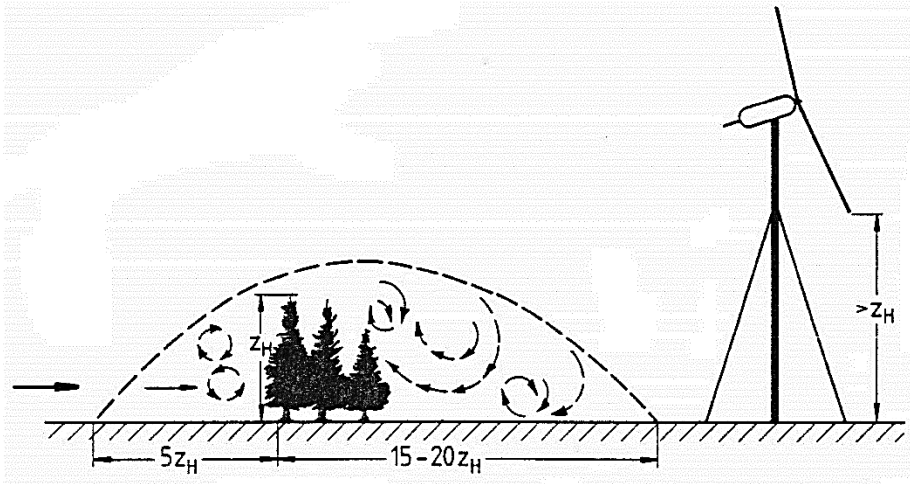


شكل (10–9) تشكل جهة هبوب ناتج عن التبريد في غيوم باردة (مثلجة) وحدوث تيارات صاعدة وهابطة

10–2–8 حركة الريح عبر العوائق ومسافات التأثير:

يبين الشكل (10–10) طريقة تأثير العوائق على حركة الرياح وكذلك مسافة تأثير العائق حسب ارتفاعه.

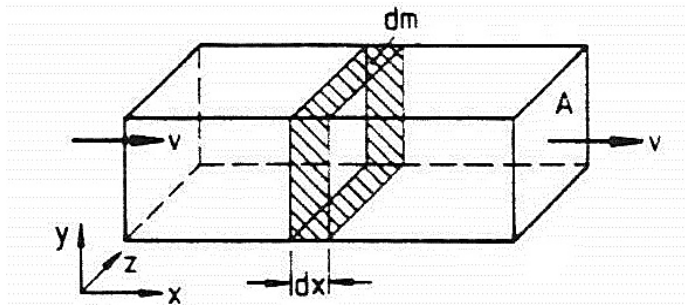
ويجب مراعاة ذلك عند اختيار موقع العنفة، عند تصميم مزرعة ريحية يؤخذ بالحسبان التأثير المتبادل للعنفات التي تشكل كل منها عائقا بالنسبة للأخرى، ولكي يكون التأثير المتبادل أصغرياً تترك مسافات كافية وتختلف حسابات المسافات اللازمة حسب المراجع، لكن غالبا تترك مسافة تعادل 8 إلى 10 أضعاف قطر العنفة في اتجاه الهبوب الرئيسي ومسافة 3 إلى 5 أضعاف قطر العنفة في الاتجاهات الأخرى.



شكل (10–10) مجال وطريقة تأثير العوائق على حركة الرياح

10–3 استطاعة التدفقات الريحية:

تحسب استطاعة التدفقات الريحية على السطح العمودي على اتجاه الريح حسب الشكل (10–11)



الشكل (10–11) استنتاج كثافة الاستطاعة

تحسب الطاقة الحركية لعنصر الكتلة dm من العلاقة التالية:

$$\langle 8-10\rangle \qquad dE = \frac{1}{2} dm \vartheta^2 \qquad [J]$$

ϑ: سرعة الريح $[m/s]$

يحسب عنصر الكتلة من العلاقة:

$$\langle 9-10\rangle \qquad dm = \rho_a dV \qquad [kg]$$

ρ_a: كثافة الهواء $[kg/m^3]$

V: حجم الهواء $[m^3]$

وعنصر الحجم من العلاقة:

$$\langle 10-10\rangle \qquad dV = Adx \qquad [m^3]$$

أما السرعة:

$$\langle 11-10\rangle \qquad v = \frac{dx}{dt} \qquad [m/s]$$

أو:

$$dx = v \cdot dt$$

ويكون عنصر الكتلة:

$$\langle 12-10\rangle \qquad dm = A\rho_a \vartheta dt \qquad [kg]$$

وينتج:

$$\langle 13-10\rangle \qquad dE = \frac{1}{2}A\rho_a \vartheta^3 dt \qquad [J]$$

وتحسب الاستطاعة من العلاقة:

$$\langle 14-10\rangle \qquad P = \frac{dE}{dt} \qquad [W]$$

أو:

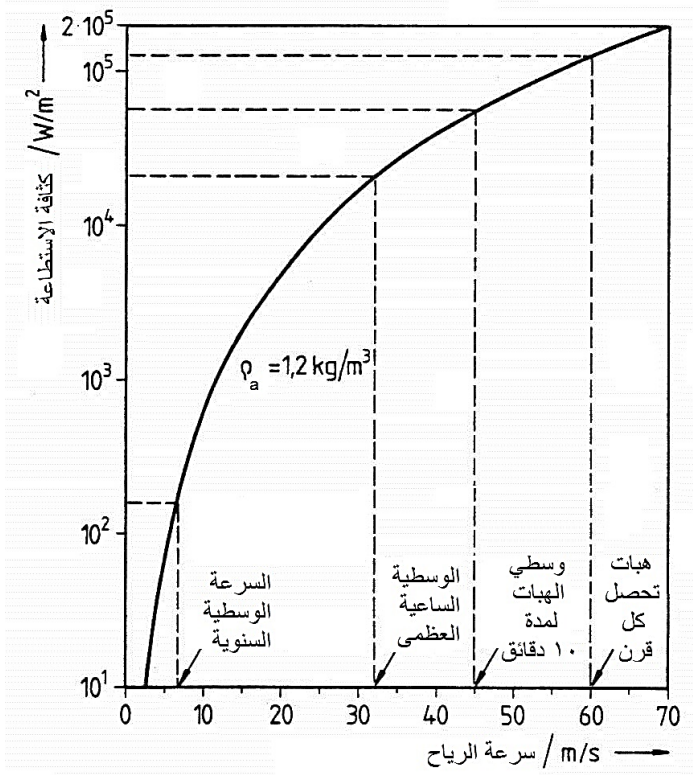
$$\langle 15-10\rangle \qquad p = \frac{1}{2}\rho_a A\, \vartheta^3 \qquad [W]$$

أما الاستطاعة لواحدة المساحة فتصبح:

$$\langle 16-10\rangle \qquad p = \frac{1}{2}\rho_a A\vartheta^3 \qquad [W]$$

أي أن استطاعة الريح تتناسب مع مكعب السرعة.

يبين الشكل (10–12) العلاقة بين السرعة والاستطاعة وكذلك الاستطاعة الخاصة ببعض السرعات المميزة عند كثافة للهواء ثابتة قدرها $\rho_a = 1{,}2\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ لمنطقة فيها سرعة الرياح الوسطية السنوية تبلغ $\bar{\vartheta} = 7{,}2\ [m/s]$.



شكل (10–12) كثافة الاستطاعة كتابع لسرعة الريح

نلاحظ أن استطاعة الريح تتغير في مجال كبير لدى تغير سرعة الريح في مجال واقعي.

فقد تصل استطاعة الريح عن هبات قوية إلى $70\ [kW/m^2]$ وفي الأعاصير تتجاوز $100\ [kW/m^2]$ وهذه الاستطاعة عند سرعة الريح مساوية إلى السرعة الوسطية السنوية في منطقة غنية بطاقة الريح لا تتجاوز $300 - 200\ [W/m^2]$ إن الاستطاعة الكبيرة المحتملة تتسبب في مصاعب تصميمية كبيرة.

10–4 الطاقة السنوية المتاحة:

يمكن حساب طاقة الرياح المتاحة خلال فترة زمنية معينة من إجراء تكامل على الاستطاعة الناتجة عن واحدة السطوح خلال عام فتكون هذه الطاقة لواحدة السطح:

$$\langle 17-10\rangle \qquad Ea = \frac{\rho_a}{2}\int_1^2 \vartheta^3 dt \quad [\,J/m^2\cdot a]$$

$(t_2 - t_1)$: فترة العام الكامل $[s/a]$

إذا تم حساب الطاقة المتاحة سنويا على أساس السرعة الوسطية السنوية وليس وفق التكامل السابق فنحصل على قيمة صغيرة جدا فهي لا تتجاوز لمنطقة غنية بالرياح $1500[kWh/m^2a]$ بينما تبلغ لنفس المنطقة عند حساب الطاقة وفق التكامل $\langle 10-17\rangle$ حوالي $4000[kWh/m^2a]$

10–5 قياس سرعة الريح:

10–5–1 أنبوبة براندل:

في الجريانات الصفائحية للسوائل المثالية وبدون احتكاك فإن علاقة برنولي:

$$\langle 18-10\rangle \qquad \rho_g = \rho_s + \frac{1}{2}\rho_a\vartheta^2 \qquad [N/m^2]$$

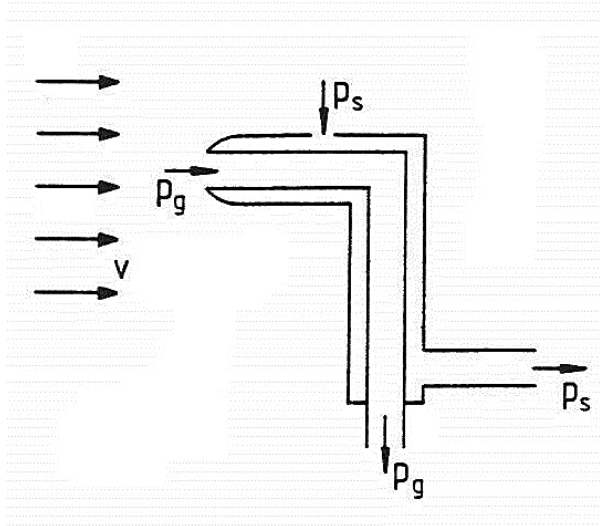
تبين العلاقة بين الضغط الكلي $p_g[N/m^2]$ والضغط الاستاتيكي $p_s[N/m^2]$ وسرعة السائل $v\,[m/s]$ وتستخدم هذه العلاقة بدقة كافية في حساب سرعة الريح رغم عدم توفر الشروط السابقة في الجريانات الهوائية الحرة.

ينتج من العلاقة السابقة علاقة السرعة التالية:

$$\langle 19-10\rangle \qquad v = \sqrt{2\frac{P_g - P_s}{\rho_a}} \qquad \left[\frac{m}{s}\right]$$

يمكن حساب vمن مقادير مقاسة للضغط الكلي والضغط الاستاتيكي.

ويستخدم أنبوب براندل شكل (10–13) لقياس كلا الضغطين المذكورين.



شكل (10–13) قياس سرعة الريح بواسطة أنبوبة براندل

من المهم توجيه الأنبوب باتجاه الريح تماما وإلا تكون النتائج غير دقيقة، ومن سلبيات هذه الطريقة صعوبة القياس عند سرعات عادية للريح بسبب الحصول على قيم صغيرة لفرق الضغط $(p_g - p_s)$ وبالتالي فاستخدام هذه الطريقة غير شائع في القياسات المترولوجية بل تستخدم عند سرعات كبيرة وفي الأنفاق الهوائية.

10–5–2 مقياس الضغط ذو السائل الساخن:

يستخدم تأثير تبريدا لتيارات الهوائية لسلك من البلاتين أو القولفرام، حيث يسخن السلك كهربائيا بتيار ثابت وعندها يكون الفرق في درجات الحرارة بين السلك t_d الهواء t_a يتناسب مع معامل التبادل الحراري وبالتالي مع سرعة الهواء ويكون التناسب عكسيا بين فرق درجات الحرارة وجذر السرعة أو:

$$\langle 20-10\rangle \qquad (t_d - t_a) \sim \frac{1}{\sqrt{\vartheta}}$$

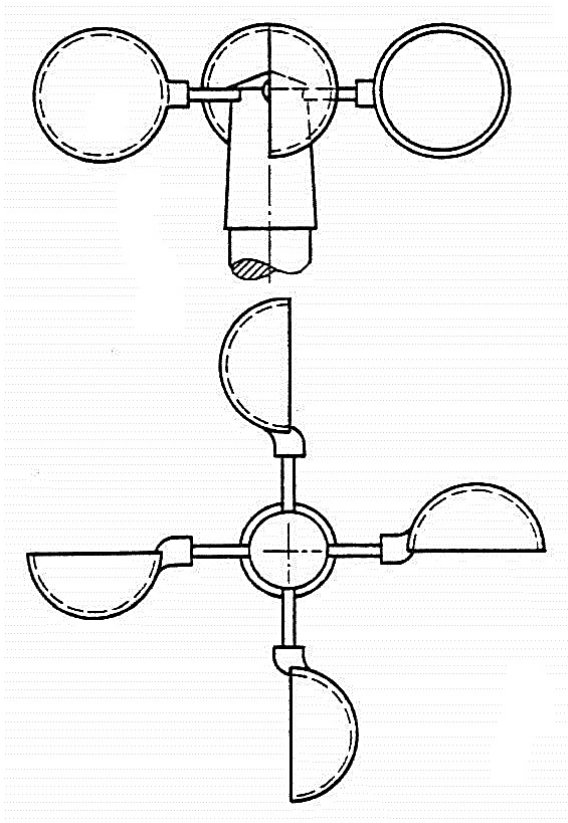
بواسطة دارات كهربائية مناسبة يمكن قراءة السرعة من جهاز القياس مباشرة.

تعتبر أجهزة قياس السرعة ذات السلك الساخن مناسبة للاستخدام في حالات السرعات الصغيرة نظراً للفرق الكبير نسبياً في درجات الحرارة وتستخدم هذه الأجهزة كأجهزة يدوية.

يتوضع السلك الحساس في حجرة أنبوبية محمية من التأثيرات الجانبية، ولتكون القياسات دقيقة يجب توجيه الأنبوب باتجاه الريح تماماً.

10–5–3 جهاز قياس السرعة ذو الطاسات المتصالبة:

في هذا الجهاز تستخدم لقياس سرعة الرياح حقيقة أن مقاومة السطوح المقعرة للتيارات الهوائية أكبر من السطوح المحدبة. ويبين الشكل (10–14) بنية جهاز قياس سرعة ذو طاسات متصالبة.



شكل (10–14) جهاز قياس سرعة ذو طاسات متصالبة

على محور شاقولي يوضع تصالب من طاسات نصف كروية ذات فتحات متوضعة شاقولياً ولا يحتاج الجهاز إلى توجيه باتجاه الريح بل يكفي أن يبقى المحور شاقولياً، والعلاقة بين سرعة الرياح وعند دورات الجهاز تكون طردية أو:

$$\langle 21-10\rangle \qquad v = a_A + b_A U \qquad [m/s]$$

b_A : معامل التناسب

v : سرعة الرياح $[m/s]$

a_A : ثابت الاحتكاك $[m/s]$

U : السرعة المحيطية للمقياس $[m/s]$

للأجهزة الأكثر شيوعا القيم التالية:

$$0.2 \leq a_A \leq 1 \quad ، \quad b_A \cong 2.6$$

يلاحظ من العلاقة السابقة انه لا يمكن قياس سرعات $\vartheta \leq a_A$ كم وأن سرعات قريبة من a_A تكون قياساتها غير دقيقة، وتكون القياسات مقبولة فقط عندما تكون السرعات المقاسة $\vartheta > 3[m/s]$ إلا أنه تم تطوير أجهزة اكثر حداثة باحتكاك قليل وعطالة قليلة أيضا، يمكن بواستطها قياس سرعات أقل من ذلك بكثير .

لتحسين أداء الجهاز يتم البحث عن قيم صغيرة ما أمكن لثابت الاحتكاك ويتم ذلك باستخدام مضاجع قليلة الاحتكاك وطاسات ذات أصغر كتلة ممكنة وعداد دورات دون ملامسة (الكتروني مثلا) بسبب التغيير المفاجئ في سرعة الرياح تؤثر عطالة الأجزاء المتحركة بشكل ملحوظ على دقة الجهاز، ومع ذلك فإن هذه الاجهزة تلاقي انتشارا واسعا بسبب سهولة تسجيل القياسات وعدم تؤثر المؤشر بجهة الرياح.

تتم معايرة الجهاز وإيجاد قيم a_A وفي نفق هوائي لمعرفة سرعة الرياح يجب معرفة عدد دورات الجهاز في واحدة الزمن n وبذلك تكون سرعة الرياح:

$$v = a_A + b_A 2 r_A \pi n \qquad [m/s] \qquad \langle 22 - 10 \rangle$$

r_A : نصف قطر الدوران عن محور الدوران وحتى مركز الطاسات $[m]$

n: عدد الدورات في الثانية $[s^{-1}]$

يمكن قياس عدد الدورات ميكانيكيا (بنظام نقل للحركة) أو كهربائيا دون ملامسة (بخلايا كهرضوئية).