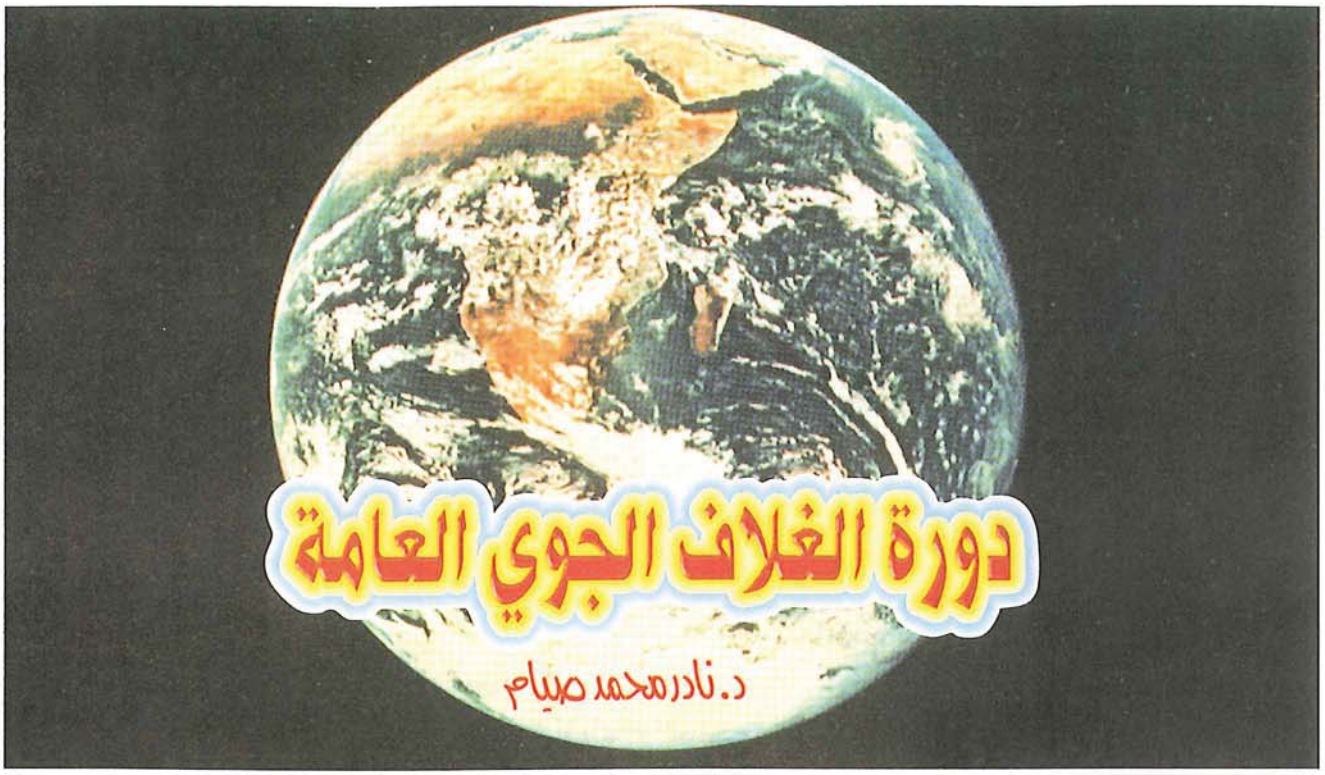


دورة الغلاف الجوي العامة

د. نادر محمد صيام

يعتري الغلاف الجوي حركات هوائية رأسية وطولية وعرضية ، ودورات من مختلف الأشكال والمقاييس ، فمنها ماتكون على مقياس صغير للغاية (Micro Scale Circulations) يحدث زوابع ودوامات هوائية صغيرة لا تناهز أقطارها بضعة أمتار وتدوم عدة دقائق ، ومنها ما يكون على مقياس متوسط (Meso Scale Circulations) تشكل رياحاً محلية تتراوح أقطارها الكيلومترات ومئاتها ، وتدوم عدة ساعات وحتى أكثر من يوم ، وعادة ماتعرف بالدورات الثلاثية (Tertiary Circulations).ومنها ما هو أكبر من ذلك وتشكل دورات واسعة ذات مقاييس كبيرة (Synoptic Scale Circulations) تجري حول مراكز الضغوط الجوية المرتفعة والمنخفضة مغطية مساحات شاسعة تتراوح بين مئات وآلاف الكيلومترات المربعة .

تتسم دورة الغلاف الجوي العامة بالتداخل والتعقيد والغموض في بعض جوانبها، وعليه فإنها ليست إلا معدلاً طويل الأمد لكل حركات الهواء والرياح على سطح الأرض يتحدد من خلال التحليل الإحصائي والمشاهدات الدؤوبة المستمرة لجريان الرياح العالمية .

العوامل المتحكمة في دورة الغلاف الجوي

هناك عوامل عديدة تتحكم في دورة الغلاف الجوي العامة وتحدد مظاهرها وتضبط آليتها، وتأتي في مقدمة تلك العوامل ما يلي : ـ

● طاقة الشمس الإشعاعية الحرارية

يشكل كل من سطح الأرض والغلاف الجوي نظاماً متكاملاً يمكن تشبيهه بالمحرك الحراري الضخم يمثل الغلاف الجوي الجزء المتحرك منه حيث يجعل من اختلاف كمية الطاقة الشمسية الساقطة عليه ـ التشمس (Insolation) ـ أداة لتحركه . فبسبب سقوط الأشعة الشمسية عمودية أو شبه عمودية على العروض الدنيا الاستوائية والمدارية تكون زاوية ارتفاع الشمس (Sun's Altitude Angle) فوقها كبيرة جداً وبالتالي تتلقى هذه العروض أكبر قدر من التشمس ، وبالمقابل يصل العروض العليا والقطبية أقل قدر من التشمس بسبب صغر تلك الزاوية .

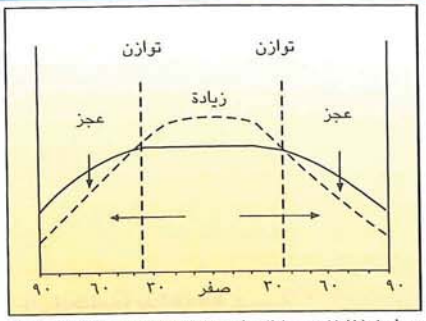
إضافة لذلك فإن الأشعة المائلة تعبر حيزاً كبيراً من الغلاف الجوي مما يؤدي إلي ضياع جزء كبير من طاقتها بواسطة الانعكاس والامتصاص والتبعثر .

علاوة علي ذلك فإن الأشعة المائلة مقارنة بالأشعة العمودية تتوزع علي مساحة أكبر مما يقلل من كمية الطاقة الساقطة على وحدة المساحة في العروض العليا والقطبية .

كذلك تساهم نسبة الألبيدو (معامل انعكاسية السطوح للطاقة الاشعاعية التي تناهز ٧٠٪ للغطاء الثلجي والجليدي) كثيرا في تقليل كمية التشمس الصافية في العروض العليا والقطبية ، لذلك فإن مايصل من تشمس إلى هذه العروض يظل منخفضاً جداً ، حيث قد يقل عن ٢٠٪ مما تتلقاه العروض الإستوائية.

بالمقابل فإن مايتلقاه سطح الأرض من طاقة اشعاعية شمسية ذات موجات قصيرة يشع بدوره طاقة حراريه اشعاعية أرضية ذات موجات طويلة ـ أشعة تحت الحمراء ـ تنطلق نحو الفضاء الخارجي . وقد بينت الدراسات أن ما تكتسبه العروض الدنيا المدارية والاستوائية من تشمس يزيد كثيرا عما تفقده من طاقة إشعاعية، بينما يكون الوضع معكوسا بالنسبة للعروض العليا والقطبية إذ تفقد من الطاقة أكثر مما تكسبه من التشمس .

بالرغم من ذلك لاتصبح العروض الاستوائية والمدارية أكثر حرارة مما هي عليه ، كما لاتزداد العروض العليا برودة أكثر أيضاً . ويعود الفضل في ذلك إلى أن دورة الغلاف الجوي العامة تعمل على نقل الطاقة الحرارية من العروض الدافئة ذات الطاقة الحرارية الكبيرة الفائضة التي تعد مصادر (Sources) للطاقة إلى العروض القطبية الباردة التي تمثل مراكز امتصاص (Sinks) للطاقة ، ويبين الشكل (١). أنه فقط عند درجة العرض ٣٧° وسطياً يتوازن مقدار التشمس مع ما يشعه سطح الأرض إلى الفضاء الخارجي .



● شكل(١) المتوسط السنوي للطاقة الشمسية الإشعاعية الواصلة إلي سطح الأرض عند درجات العرض المختلفة.

ويمكن ملاحظة عمليات نقل الطاقة وتبادلها بواسطة الرياح بوضوح في نصف الكرة الشمالي خلال فصل الشتاء في العروض الوسطى ، حيث يصاحب هبوب الرياح الجنوبية ارتفاعاً ملحوظاً في درجات الحرارة، بينما يصبح الجو بارداً عندما تهب الرياح الشمالية .

تجري عمليات نقل الطاقة الحرارية وتبادلها بين العروض المختلفة وفق نظام محكم وثابت يضمن بقاء الأوضاع المناخية على سطح الأرض على حالتها، وهذا يتطلب نقل مالايقل عن ٤×١٠^{١٥} واط ثانية (جول) من الطاقة يومياً من لعروض الدنيا المدارية والاستوائية عبر درجة العرض ٣٧° إلى العروض لعليا والقطبية.

ولاشك في أن التيارات المائية المحيطة تساهم أيضاً في نقل الطاقة الحرارية تبادلها عبر العروض الجغرافية ، لكن ظل دورها قليل نسبيا إذ لا يزيد ما تنقله عن ٢٥ أو ٣٠٪ من الطاقة ، وبذلك تبرز همية دورة الغلاف الجوي في أنها لعامل الرئيسي المتحكم في نقل الطاقة حرارية وتوازنها عبر العروض جغرافية، وبالتالي توزع الاقاليم المناخية لى سطح الارض.

تتواجد الطاقة في الغلاف الجوي ائماً في أشكال مختلفة ـ تتحول استمرار من شكل لآخر حين انتقالها واسطة دورة الغلاف الجوي ـ ويعبر نها جميعها بمحتوى الطاقة . وذلك وفقاً معادلة التالية:

$$R_n = Q = Lq + CpT + mgz + mV^2/2$$

حيث :ـ

R_n = الطاقة الشمسية الإشعاعية التشمس) الصافية الواصلة إلى سطح الأرض، Q = المحتوى الكلي للطاقة في الغلاف الجوي، . Lq= الطاقة الحرارية الكامنة المستخدمة في التبخر ، L = الطاقة الحرارية الكامنة لتبخير جرام من الماء . (٥٧٥ سعر حراري /جم)،q = كتلة بخار الماء المتبخرة ،CpT = الطاقة الحرارية المحسوسة ، Cp = الطاقة الحرارية النوعية للهواء عند ضغط ثابت وتساوي (٠,٢٤ سعر حراري/جم درجة الحرارة) ،T = درجة حرارة الهواء بمقياس كلفن، mgz = الطاقة الكامنة ، هنا m= كتلة الهواء ، وg = التسارع الأرضي ، z = الأرتفاع عن مستوى سطح البحر ، $mV^2/2$ = الطاقة الحركية المتحولة أثناء حركة الهواء على مختلف المقاييس ، وهي ضئيلة جداً حيث تتراوح من ٠,٥ ـ ١٪ من مجموع محتوى الطاقة في الأقاليم شديدة الرياح كما أنها لاتدوم طويلاً ، فما أن تتشكل حتى تتبدد بتأثير قوة الاحتكاك لذلك يمكن إهمالها.

● دورة الأرض حول محورها

ينجم عن دوران الأرض حول محورها قوتان تؤثر الأولى في اتجاه الرياح الهابة بينما تؤثر الثانية في سرعة جريانهاوهما :

*** قوة أو تسارع كوريوليس (Coriolis "Accelaration" Force)،**

وتعمل على انحراف الرياح الهابة في النصف الشمالي للكرة الأرضية نحو يمين خط اتجاهها ، ونحو يساره في النصف الجنوبي ، وتكون عمودية باتجاه الرياح بحيث لا تؤثر في سرعتها ، لذلك فهي المسؤولة عن هبوب الرياح بشكل نطاقي حول سطح الأرض خاصة في طبقات الجو العلياويتناسب مقدار الانحراف طردا مع مع السرعة الزاوية للأرض (Ω) وسرعة الرياح الأفقية (V) وجيب درجة عرض المكان (Sinϕ) الهابة فوقه الرياح ، ويعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$Co = 2\,\Omega\,V\,Sin\phi$$

وعادة يشار إلى القيمة ($2\,\Omega\,Sin\phi$) بثابت **كوريوليس** وتتراوح قيمته بين الصفر عند خط الاستواء ، و$١,٤٥٨ \times ١٠^{-٤}$/ثا عند القطب ، وتكون موجبة في النصف الشمالي للأرض وسالبة في نصفها الجنوبي.

*** العزم الزاوي (Angular Momentum) للأرض والغلاف الجوي :** حيث ينتج عن كروية الأرض تناقص محيط دوائر العرض مع الابتعاد عن خط الاستواء شمالا وجنوباً ، وعليه فإن كلاً من السرعة النطاقية للأرض والغلاف الجوي (Vz) ستختلف عند كل دائرة عرض وفقاً للمعادلة التالية :ـ

$$V_z = \Omega\, r\cos\phi$$

حيث :

r. Cosϕ = نصف قطر دائرة العرض في أي مكان على سطح الأرض (المسافة العمودية بين سطح الارض ومحور دورانها حول نفسها) .

وحتى يحافظ الغلاف الجوي على سرعته النطاقية فإن وحدة الكتلة فيه بعزم زاوي (M) عند كل دائرة عرض يعادل :ـ

$$M = \Omega\, r^2\, Cos^2\phi$$

ويلاحظ من هذه العلاقة أن العزم الزاوي كبير عند خط الاستواء ويتناقص تدريجيا مع درجات العرض إلى أن ينعدم عند القطبين .

يميل الغلاف الجوي إلى المحافظة على العزم الزاوي ، فعندما ينتقل حزام هوائي (أو كتل هوائية) باتجاه القطب أو إلى أي مكان تتناقص فيه المسافة بينه وبين محور دوران الأرض فإن سرعته تزداد إلى حد يسمح بأن يظل عزمه الزاوي ثابتاً ، وبالعكس إذا تحرك حزام هوائي (أو كتلة هوائية) باتجاه خط الأستواء أو أي مكان تزداد فيه المسافة بينه وبين محور الأرض فإن سرعته تقل إلى حد يحافظ فيه على عزمه الزاوي أيضاً.

واستناداً إلى ذلك تظهر أهمية تغير العزم الزاوي باتجاه القطب في استمرار تدفق الرياح الغربية (الغربيات) عبر العروض الوسطى بسرعة أكبر من سرعة الأرض في هذه العروض . وبالمقابل تظهر أهميته بإتجاه خط الاستواء بالمحافظة على تدفق الرياح الشرقية (الشرقيات) عبر العروض المدارية ، التي تهب أبطأ من سرعة الأرض .

*** قوة الاحتكاك (Friction Force) :**

وتعمل باتجاه معاكس للعزم الزاوي ، وتنتج عن احتكاك الرياح بسطح الأرض من جهة ، وعن لزوجة (Viscosity) الهواء ـ قوة الاحتكاك الداخلية الذاتية لجزئيات الهواء مع بعضها البعض ـ من جهة أخرى .

تعمل قوة الاحتكاك على كبح جريان الهواء خلال أقل من أسبوع إذا لم يعوض عزمها الزاوي ، حيث لولاها - بإرادة الله - لانطلقت الرياح بسرعة هائلة ودامت لفترات طويلة جداً .

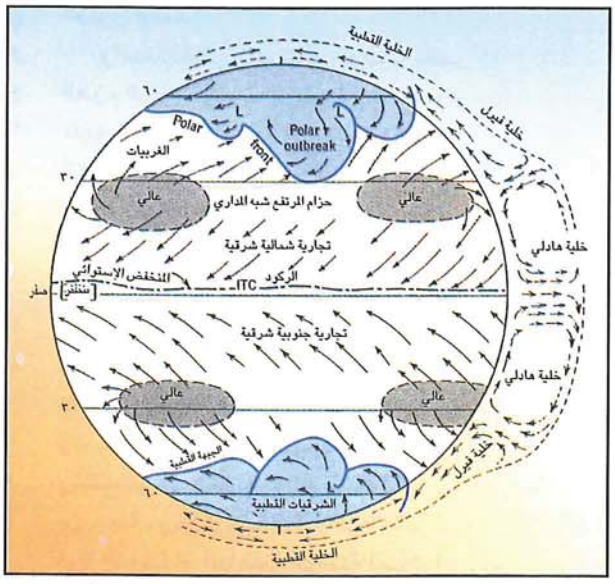
آلية دورة الغلاف الجوي العامة

يمكن تقسيم دورة الغلاف الجوي العامة في كل من نصفي الكرة الأرضية إلى ثلاث خلايا (دورات) رئيسة مترابطة مع بعضها البعض ، لكن لكل منها آلية حركية مميزة تسود على نطاق واسع من درجات العرض على سطح الأرض - كما هو مبين في شكل (٢)، وشكل (٣) - وذلك كما يلي :-

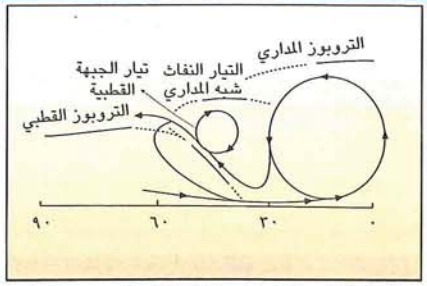
• خلية هادلي

تقع خلية هادلي - اقترحت آليتها عام ١٧٣٥م بواسطة عالم الأرصاد الجوية الإنجليزي هادلي - بين درجتي عرض ٣٠ شمالاً وجنوباً ووسطياً ، و بما أن خليتي هادلي في نصفي الكرة الأرضية متجاورتين وترتبط بينهما عوامل مشتركة فمن الأجدى دراسة آليتهما معاً ، وذلك مما يساعد أكثر على تفهمهما.

بسبب سقوط أشعة الشمس عمودية أو شبه عمودية ، وكبر زاوية ارتفاعها تكتسب العروض الوسطى الاستوائية مقدار عظيماً من الطاقة الشمسية الإشعاعية الحرارية (التشمس) ، يتحول قسم منها إلى طاقة



• شكل (٢) دورة الغلاف الجوي العامة على سطح الكرة الأرضية .



• شكل (٣) مخطط دورة الغلاف الجوي العامة في نصف الكرة الأرضية الشمالي .

حرارية محسوسة (CpT) تسخن سطح الأرض والهواء ، ويتحول القسم الآخر إلى طاقة حرارية كامنة (Lq) تستخدم في تبخير الماء ، لذلك تقل كثافة الهواء الاستوائي الساخن الرطب ويضطرب ، ويأخذ بالإرتفاع في الجو على شكل حركات هوائية تصاعدية يطلق عليها تيارات الحمل . فيسيطر على السطح ضغط منخفض واسع متطاول ينتشر على طول النطاق الاستوائي يعرف بالضغط المنخفض الاستوائي (Equatorial Trough) . ويكون تدرج الضغط فيه ضعيفاً تسود فيه رياح ضعيفة بسيطة ، لذلك يعرف أيضاً بنطاق الهدوء أو الركود (Doldrums).

يتمدد الهواء أثناء الارتفاع ، بسبب انخفاض الضغط وتتحول طاقته الحرارية المحسوسة (CpT) إلى طاقة كامنة (mgz) فيبرد كظمياً (Adiabatic) . وعندما يصل إلى مستوى التكاثف الرفعي ،يشكل سحباً كثيفة عميقة ضخمة من نوع كومولونيمبوس (Cumulonimbus) أو كومولوس (Cumulus) تؤدي إلى هطول أمطار غزيرة مصحوبة بعواصف رعدية قوية . وعندما يتكثف بخار الماء فإن طاقته الحرارية الكامنة (Lq) تتحرر لتتحول إلى طاقة حرارية محسوسة (CpT) تعمل على تسخين الهواء من جديد، مما يؤدي إلى ارتفاعه إلى مستوى أعلى فتزداد طاقته الكامنة (mgz) أكثر.

تخترق تيارات الحمل الهوائية التصاعدية

• شكل (٤) الأشكال المحتملة للطاقة الشمسية الإشعاعية الحرارية عند وصولها سطح الأرض .

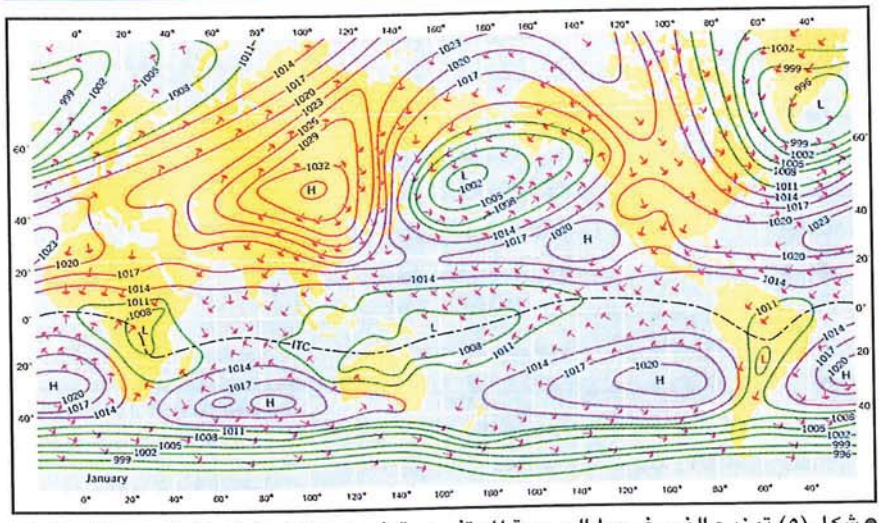
الاستوائية طبقة التربوسفير واصلة إلى حد التروبوبوز ، متجهة شمالاً وجنوباً إلي القطبين حاملة معها - عبر الأجواء المدارية - مقداراً عظيماً من الطاقة على شكل طاقة كامنة (mgz) وطاقة حرارية محسوسة (CpT) إلى أجواء العروض الوسطى والعليا . وأثناء ذلك تحدث عمليات تبادل حراري بينها وبين هواء طبقات الجو التي تعبرها . فيتحول جزء من طاقتها الحرارية المحسوسة إلى أشعة تحت الحمراء تعمل على تسخين الجو، ومن ثم تضيع في الفضاء الخارجي ، شكل (٤).

وكلما ابتعدت هذه التيارات الهوائية عن الأجواء الاستوائية تزداد سرعتها بسبب محافظتها على عزمها الزاوي . وتأخذ في الانحراف - بسبب تسارع كوريوليس - نحو يمينها في النصف الشمالي من الأرض وإلى يسارها في النصف الجنوبي مشكلةً رياحاً غربية عالية السرعة (الغربيات) ، وما أن تصل إلى دائرة العرض ٣٠ْ شمالاً وجنوباً وسطياً (بين دائرتي العرض ٢٨ْ و ٤٥ْ شمالاً وجنوباً) حتى تصبح سرعتها وانحرافها على أشدهما . ويساعد في ذلك أيضاً التباين الحراري الشديد بين أجواء العروض الدنيا والعروض الوسطى ، حيث تتناقص درجة الحرارة بشدة باتجاه القطبين . ونتيجة لذلك ، يتشكل فوق هذه العروض - في كل من نصفي الكرة الأرضية - تيار هوائي نطاقي متلوي ينطلق من الغرب إلى الشرق بسرعة هائلة تتراوح بين حوالي ١٦٠ - ٢٤٠كلم/ساعة - تزيد أحياناً عن ٤٢٠كلم/ساعة في فصل الشتاء - وتظهر نواة كل منهما (التيار الرئيسي) بين ارتفاع ١٠-١٥كلم بين درجتي العرض ٢٨ْ و ٣٠ْ شمالاً وجنوباً . ويعرف كل من هذين التيارين بالتيار النفاث الغربي شبه المداري (Subtropical Westerly Jet Stream) .

ويمكن تشبيه هذين التيارين بنهر عظيم من الهواء سريع الجريان بين ضفتين من الهواء الهادىء نسبياً . وتتكفل هذه التيارات النفاثة بمعظم عمليات نقل الطاقة إلى العروض العليا والقطبية.

يصبح الهواء الاستوائي المتجه في طبقات الجو العالية نحو القطبين بارداً وكثيفاً ويأخذ بالاحتشاد كلما أتجه شمالاً . ويبلغ هذا الاحتشاد ذروته عند درجتي العرض ٣٠° شمالاً وجنوباً في التيار النفاث الغربي شبه المداري الشمالي والجنوبي . ونتيجة لذلك يأخذ الهواء بالهبوط ببطء من قاعدة التيار النفاث إلى سطح الأرض مشكلاً حزامين من الضغوط المرتفعة شبه المدارية (Subtropical Highs) العميقة حول درجتي العرض ٣٠° شمالاً وجنوباً.

يستغرق الهواء حوالي ٣ أسابيع ليهبط من ارتفاع ١٢كم إلى ارتفاع ٣كلم فتتحول طاقته الكامنة (mgz) تدريجاً إلى طاقة حرارية محسوسة (CpT) تسخن الهواء تظمياً(ذاتياً) فيصبح جافاً ومجففاً - بمتص الرطوبة الجوية - فتنعدم الغيوم، تظل السماء صافية دائماً مما يساعد على زدياد درجة حرارة سطح الأرض . وتسود سوق العروض شبه المدارية حالات من لاستقرار الجوي والانقلاب الحراري جهض حركات الهواء السطحية الصاعدة الرغم من ارتفاع درجة حرارته ، وتمنع ضغوط المرتفعة دخول الهواء إلى هذه عروض ، لذلك تتمركز حول درجتي عرض ٣٠° شمالاً وجنوباً الصحارى رئيسة في العالم وأشدها جفافاً وتطرفاً



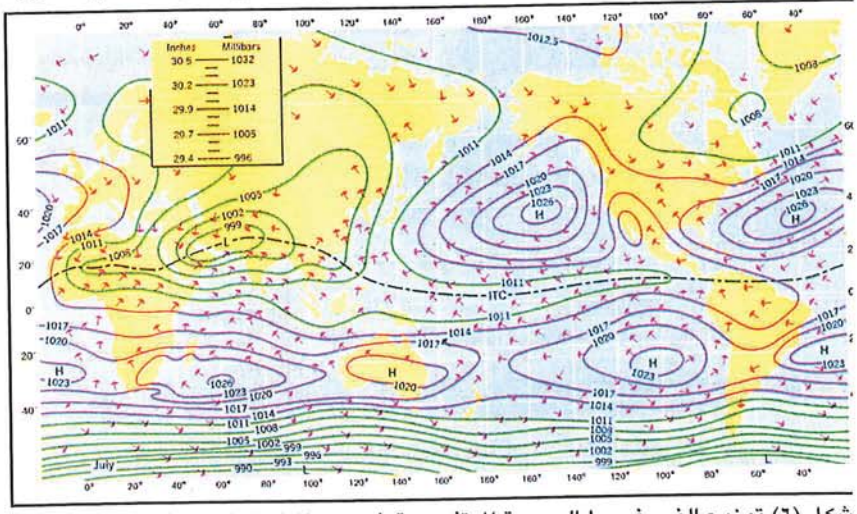
● شكل (٥) توزيع الضغوط الجوية المرتفعة شبه المدارية خلال فصل الشتاء .

واتساعاً مثل الصحراء الكبرى وصحاري شبه الجزيرة العربية وصحاري أمريكا الشمالية والجنوبية (أتاكاما) وصحراء ناميبيا في جنوب أفريقيا والصحاري الاسترالية وصحراء ثار في آسيا.

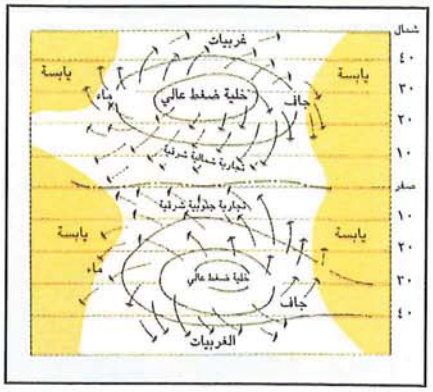
من جانب آخر تسود فوق سطح المحيطات شبه المدارية رياح هادئة بسبب ضعف تدرج الضغط في مساحات الضغوط المرتفعة . وفي الماضي - زمن استخدام السفن الشراعية - كانت هذه المناطق من المحيطات سبباً في حبس السفن الشراعية عدة اسابيع فيها ، فتنفذ مؤنها مما يضطر البحارة إلى إلقاء بعض حمولتهم وقتل أحصنتهم من أجل الطعام ، أو إلقائها في مياه المحيط لتخفيف حمولة السفن ، لذلك عرفت هذه العروض شبه المدارية بعروض الخيل (Horse Latitude).

وتتميز الضغوط المرتفعة شبه المدارية بعمقها ، إذ تظهر فعاليتها على سطح الأرض وفي طبقات الجوّ العالية حتى ارتفاع يزيد عن ١٢كلم . وتشكل في كل من نصفي الكرة الأرضية حزاماً متصلاً فوق اليابسة والمحيطات، شكل (٥)، لكنها تتجزأ وتتقلص مساحاتها ويختفي بعضها خلال فصل الصيف ، شكل (٦) ، خاصة في مناطق جنوب آسيا الموسمية ، حيث تسود عليها ضغوط منخفضة حرارية ديناميكية عميقة ، وكذلك في جنوب غرب أمريكا الشمالية وشبه الجزيرة العربية وشمال أفريقيا حيث يسود على السطح ضغوط منخفضة حرارية ضحلة ، لكن مع ذلك يظل الضغط المرتفع مهيمناً فوقها على ارتفاع ٣كلم ، ويكبت فعاليتها . ويسهل تجزؤ حزام الضغوط المرتفعة عمليات جريان الرياح ومبادلتها بين العروض الجغرافية إذ تدور الرياح الخارجة منها باتجاه عقارب الساعة في النصف الشمالي وعكسها في النصف الجنوبي مشكلة جبهات مؤقته بينها ، شكل (٧).

عند سطح الأرض تشكل الضغوط المرتفعة شبه المدارية مراكز فيض هوائي يندفع منها الهواء الهابط خارج المناطق شبه المدارية، فيتجه قسم منه إلى العروض الوسطى والقسم الآخر إلى العروض الدنيا عائداً إلى الضغط المنخفض الاستوائي منحرفاً - بتأثير تسارع كوريوليس - نحو اليمين في النصف الشمالي من الأرض مشكلاً الرياح التجارية (Trade Winds) الشمالية الشرقية ، ونحو اليسار في النصف الجنوبي مشكلاً الرياح التجارية



شكل (٦) توزيع الضغوط الجوية المرتفعة شبه المدارية خلال فصل الصيف .



● شكل (٧) هبوب الرياح حول مركزين للضغط المرتفع في كل من نصفي الكرة الأرضية .

الجنوبية الشرقية . أو ما يعرف بالشرقيات المدارية ليتم دورة **هادلي**.

تتكون الرياح التجارية من طبقتين تجريان فوق بعضهما ، تتشكل الطبقة العليا من الهواء المسخن كظمياً والهابط من الأجواء العليا ، وتتشكل الطبقة السطحية من الهواء السطحي الحار الجاف أيضاً . ويفصل بينهما مستوى الانقلاب الحراري الحاصل من هبوط الهواء فوق مناطق الضغط المرتفع شبه المداري . ويعرف هذا الانقلاب الحراري بانقلاب الرياح التجارية.

تبدأ الرياح التجارية حارة جافة محملة بطاقة حرارية محسوسة (CpT) عظيمة ، تجعل ضغط بخار الماء الكامن فيها شديداً ورطوبتها النسبية منخفضة جداً ، فتعمل على تجفيف المناطق التي تهب عليها ، وما أن تصل إلى نطاق الضغط المنخفض الاستوائي حتى تصبح رطبة جداً نتيجة لما حملته من رطوبة أثناء جريانها.

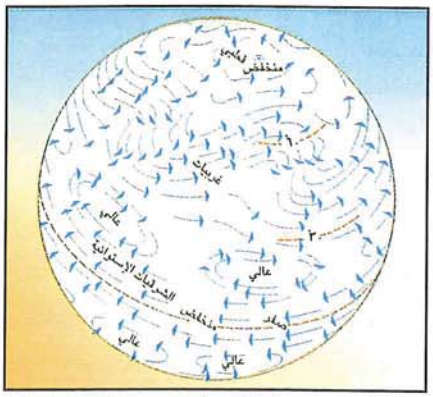
تتلاقى الرياح التجارية الشمالية الشرقية والتجارية الجنوبية الشرقية في نطاق الضغط المنخفض الاستوائي مشكلة جبهة عريضة على طوله تعرف بجبهة تلاقي ما بين المدارين (Inter Tropical Convergence Zone- (ITCZ) ، شكل(٢)، وما أن تدخل الرياح التجارية الشمالية والجنوبية نطاق الضغط المنخفض الاستوائي حتى تبدأ بالارتفاع عند جبهة (ITCTZ) مشكلة تيارات حمل تصاعدية قوية تضاف إلى حركات الهواء الاستوائي الحار التصاعدية وتقويها . وهكذا تكتمل دورة الهواء في خلية هادلي الشمالية الجنوبية في العروض الدنيا.

● الخلية القطبية

تقع هذه الخلية في كل من نصفي الكرة الأرضية في العروض العليا والقطبية بين درجتي العرض ٦٠° و ٩٠° شمالاً وجنوباً وسطياً وتشبه دورة هادلي ، لكنها تجري على مقياس أصغر ، شكل (٢).

يسود فوق كل من القطبين ـ في طبقات الجو العالية ـ ضغط منخفض ، شكل (٨) تتحلق حوله التيارات الهوائية الغربية العلوية ، التي ما تلبث أن تهبط خلاله إلى سطح الأرض ، فتتحول طاقتها الكامنة (mgz) إلى طاقة حرارية محسوسة (CpT) تحافظ على التوازن الحراري للعروض القطبية ، وتتشكل فوقها ـ على ارتفاعات قريبة من سطح الأرض ـ طبقة انقلاب حراري تعزل العروض القطبية عن التغيرات التي تحصل في الغلاف الجوي الحر فوقها . وتتضافر البرودة الشديدة مع الحركات الهوائية الهابطة مشكلة ضغطاً مرتفعاً على السطح ـ يعرف بالضغط المرتفع القطبي (Polar High) ـ تنطلق منه رياح سطحية قطبية باردة نحو العروض الوسطى والدنيا . وبسبب قوة كوريوليس تنحرف نحو يمينها في النصف الشمالي من الكرة الأرضية مشكلة رياحاً شمالية شرقية ، ونحو يسارها في النصف الجنوبي مشكلة رياحاً جنوبية شرقية تعرف عادة بالشرقيات القطبية (Polar easterlies).

تدفع هذه الرياح في مقدمتها جبهة باردة تعرف بالجبهة القطبية (Polar Front) تفصل بينها وبين الرياح المدارية الدافئة المتجهة عبر العروض الوسطى إلى العروض العليا والقطبية . ويتشكل على طول هذه الجبهة نطاق من الضغط المنخفض يعرف بالضغط المنخفض شبه القطبي (Subpolar low) عند دائرة ٦٠ شمالاً وجنوباً وسطياً ، تتجمع عنده الرياح السطحية وترتفع فوق الجبهة القطبية عائدة من الرياح الغربية العالية إلى القطب حيث تهبط ببطء إلى سطح الأرض مكملة الخلية القطبية .



● شكل (٨) هبوب الرياح الغربية (الغربيات) العلوية متحلقة حول الضغط المنخفض القطبي العلوي في نصف الكرة الشمالي.

تتجلى هذه الدورة بوضوح أكثر في العروض القطبية الجنوبية ـ خاصة فيما يتعلق بالرياح الشرقية ـ ويعود ذلك لأن القارة القطبية عبارة عن قطعة من اليابسة يساعد غطاؤها الجليدي العظيم الدائم على تكوين الضغط المرتفع القطبي واستمراره ، ويؤدي التباين الحراري الكبير بينها وبين البحار المحيطة بها من كل الجهات على ظهور نطاق الضغط المنخفض شبه القطبي حولها متماسكاً قوياً يجذب الرياح القطبية إليه باستمرار.

من جانب آخر تقع القبعة القطبية الشمالية فوق البحار المتجمدة محاطة باليابسة من كل الجهات . وبسبب التبدلات الفيزيائية لمياه البحار خلال فصول السنة تتغير قيم الضغط فيها ، ولايشكل الضغط المرتفع القطبي هنا مظهراً دائماً في الدورة القطبية . ولذلك تكون الشرقيات القطبية الشمالية غير ثابتة بشكل رئيسي على أطراف المنخفضات الجوية المتشكلة فوق البحار المواجهة للقطب ، كما هو الحال في الضغط المنخفض الأيسلندي (Icelandic Low) في شمال المحيط الاطلسي ، والضغط المنخفض الألتياني (Aleutian Low) في شمال المحيط الهادي . ومع ذلك تظل الشرقيات الشمالية القطبية سائدة إلى حد ما في بقية الأصقاع القطبية.

● خلية فيريل

يطلق على هذه الخلية كذلك خلية العروض الوسطى ، وتعود تسميتها إلى عالم الأرصاد الجوي الأمريكي **فيريل** الذي اقترح وجودها بين خلية **هادلي** والخلية القطبية في كل من نصفي الكرة الأرضية . وفي هذه الخلية تهب الرياح عبر العروض الوسطى من أطراف حزامي

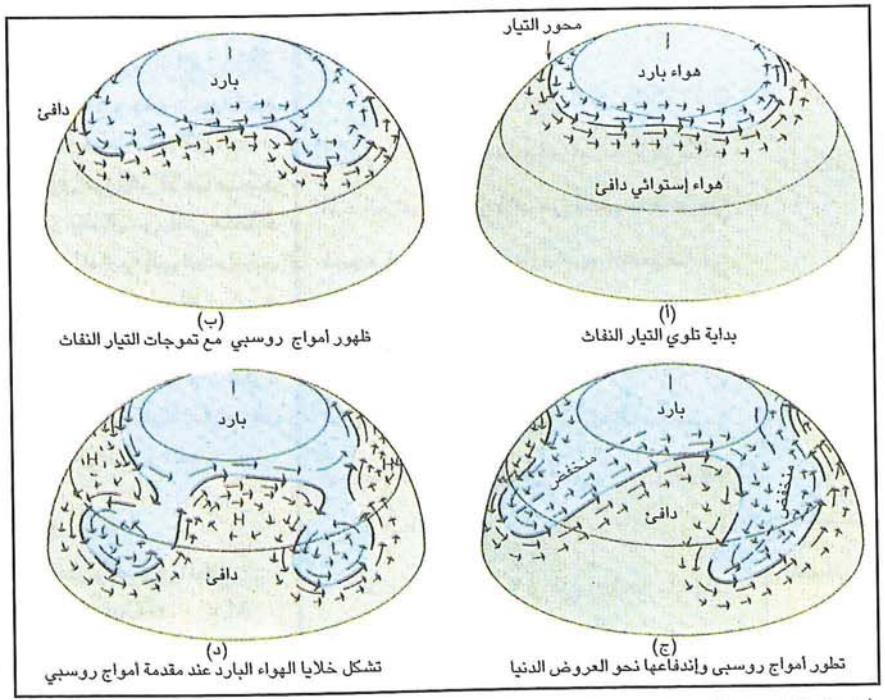
الضغوط المرتفعة شبه المدارية متجمعة إلى العروض العليا والقطبية على كافة المستويات السطحية والعالية متجهة بعزمها الزاوي ، فتزداد سرعتها عندما تعبر دوائر العرض التي تصغر باتجاه القطبين . وما أن تتحرك هذه الرياح مسافة قصيرة ، حتى تحرفها قوة كوريوليس نحو يمينها في النصف الشمالي من الكرة الأرضية ،ونحو يسارها في النصف الجنوبي . وبسبب انعدام قوة الاحتكاك في طبقات الجو العالية ، تهب الرياح العلوية مشكلة رياحاً نطاقية تتجه من الغرب إلى الشرق تعرف بالغربيات العلوية (Upper Westerlies) متحلقة حول الضغط المنخفض القطبي العلوي شكل (٨)، أما على السطح ـ ولوجود قوة الاحتكاك ـ تهب الرياح في النصف الشمالي من الكرة الأرضية من الجنوب الغربي نحو الشمال الشرقي ومن الشمال الغربي نحو الجنوب الشرقي في نصف الكرة الجنوبي ، مشكلة ما يعرف بالغربيات السطحية (Surface Westerlies) أو العكسيات لأن إتجاهها معاكساً لإتجاه الشرقيات المدارية ، شكل (٢) وتعرف أحياناً بالغربيات السائدة (Prevailing Westerlies).

تلتقي هذه الرياح مع الرياح القطبية الشمالية الشرقية في النصف الشمالي من الكرة الأرضية ، ومع الرياح القطبية الجنوبية الشرقية في نصفها الجنوبي حيث تتشكل بينها الجبهة القطبية والضغط المنخفض شبه القطبي (Subpolar Low) . وأثناء ارتفاع الهواء تتحول طاقته الحرارية المحسوسة (CpT) إلى طاقة كامنة (mgz) ، وعندما يصل إلى مستوى التكثيف الرفعي ، تتحول طاقته الحرارية الكامنة (Lq) إلى طاقة حرارية محسوسة تسخن الهواء ، وتزيد من التباين الحراري على جانبي الجبهة القطبية ، أي بين الهواء المداري الدافىء والهواء القطبي البارد . وغالباً ما تؤدي حركات الهواء الصاعدة هذه إلى هطول الأمطار الغزيرة ، كما حلت الجبهة القطبية . وعندما يصل الهواء السطحي إلى طبقات الجو العالية تمتزج مع الغربيات العلوية المتحلقة حول الضغط المنخفض القطبي العلوي ، شكل (٢) ٣) وأخيراً تهبط الغربيات العلوية فوق القطبين وتتحول طاقتها الكامنة إلى طاقة حرارية محسوسة تسخن الأجواء القطبية.

أما في طبقات الجو العليا فيؤدي تجاور الهواء المداري الدافىء مع الهواء القطبي البارد إلى وجود تدرج حراري أفقي شديد على طول الجبهة القطبية ينتج عنه تدرج حاد في الضغط الجوي ، يجعل الرياح الغربية تنطلق على شكل حزام يتراوح عرضه بين ٢٠٠ و ٥٠٠كلم بسرعة هائلة تتراوح بين ١٦٠ و ٢٤٠كلم وسطياً ـ أحياناً تصل إلى ٥٤٠كلم ـ مشكلة فوق كل من الجبهة القطبية الشمالية والجنوبية تياراً نفاثاً ملتوي على ارتفاع ٩كلم يعرف كل منهما بتيار الجبهة القطبية النفاث (Polar Jetstream) . يعتري تيار الجبهة القطبية النفاث دائماً تموجات كبيرة على شكل جيوب واسعة تتراوح أطوالها بين ٤٠٠٠ و ٨٠٠٠كلم ، تعرف بأمواج روسبي (Rossby Waves) تتقدم باتجاه العروض المدارية حاملة إليها الهواء القطبي البارد . وبالمقابل يندفع بين هذه التموجات ألسنة من الهواء المداري الدافىء باتجاه القطب، شكل (٩) . وأحياناً تتوغل التموجات القطبية بعيداً في الأجواء شبه المدارية فتنقطع مقدمتها وتبقى محصورة ضمن الهواء المداري الدافىء مشكلة ما يعرف بالضغط المنخفض المعزول (Cut-off low) ، ويحدث الأمر نفسه للألسنة الهوائية المدارية فتشكل ما يعرف بالضغط المرتفع المعزول (Cut-off high).

وتعد هذه الضغوط المعزولة بؤراً فعّالة في نقل الهواء البارد القطبي إلى العروض الدنيا ونقل الهواء الدافىء المداري إلى العروض العليا أفقياً ورأسياً . وفي بعض الأوقات تندمج بعض جيوب تيار الجبهة القطبية النفاث المتقدمة باتجاه العروض المدارية مع التيار شبه المداري النفاث فيتشكل تيار عظيم عن الرياح الغربية السريعة يبلغ إتساعه آلاف الكيلومترات يتلوى بإتجاه الجنوب والشمال شاغلاً كل أجواء العروض الوسطي ، ناقلاً معه الطاقة الحرارية الزائدة من العروض المدارية إلى العروض العليا والقطبية ، ومعيداً الهواء القطبي البارد إلى العروض المدارية حيث يهبط إلى سطح الأرض مشاركاً في حركات الهبوط الهوائية في العروض شبه المدارية . وهكذا تكتمل دورة خلية فيرل بعودة الغربيات العلوية إلى العروض الدنيا بواسطة عمليات النقل الأفقية الواسعة التي تقوم بها الغربيات العلوية.

بسبب قلة المساحات القارية وقوة حزام الضغط المنخفض شبه القطبي الجنوبي وتماسكه تهب الغربيات السطحية في كل



● شكل (٩) تطور أمواج روسبي في الغربيات العلوية خلال التيار القطبي النفاث .