

دراسة سماكة طبقة الأوزون لعدد من المدن الواقعة على خط عرض 35°N

الدكتور حمود العرابي¹

الملخص:

أظهرت قياسات سماكة طبقة الأوزون في المدن المدروسة (طوكيو، طهران، السليمانية، اللاذقية، جزيرة كريت، جزيرة مالطا) والواقعة على خط العرض 35° شمالاً، خلال عام 2020 قيماً متقاربة، حيث بلغ المتوسط العام لسماكة طبقة الأوزون (307.3 DU) وذلك باستخدام أجهزة قياس الأوزون الكلي (OMI)، (GOME-2) المحمولة على الأقمار الصناعية (MetOp، AURA)، ولم تسجل أي تأثيرات ملحوظة لمجمل الإجراءات المتخذة خلال جائحة كوفيد-19 على طبقة الأوزون في هذه المدن، والمتمثلة في الملاحه الجوية والنشاط الصناعي بشكل عام، كما لم تتأثر طبقة الأوزون فوق خط العرض المدروس باتساع مساحة ثقب الأوزون فوق القطب الجنوبي التي سجلت في السنة نفسها.

الكلمات المفتاحية: خط عرض 35°N - الدورة الشمسية - الستراتوسفير - طبقة الأوزون - الأوزون الكلي.

1) أستاذ مساعد في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة دمشق - سورية.

Study of the Ozone Layer Thickness for a Number of Cities Located at 35° North Latitude

Hammoud AL-OURABI¹

Abstract:

Measurements of ozone layer thickness in the studied cities (Tokyo, Tehran, Sulaymaniyah, Latakia, Crete Island, and Malta Island), located at 35°N latitude during the year 2020, showed closely aligned values, with an annual average ozone layer thickness of (307.3 DU). These measurements were obtained using the Ozone Monitoring Instrument (OMI) and the Global Ozone Monitoring Experiment (GOME-2) carried aboard satellites (AURA, MetOp). No noticeable effects were recorded from the overall measures implemented during the COVID-19 pandemic on the ozone layer in these cities, particularly those related to transportation and industrial activity. Additionally, the ozone layer over the studied latitude was unaffected by the expansion of the ozone hole over the South Pole, which was recorded in the same year.

Kay words: Latitude 35°N, Sunspot cycle, Stratosphere, Ozone layer, Total ozone.

1) Assist. Prof. at the department of physics, faculty of sciences, Damascus University.

مقدمة:

يُمثل الأوزون الكلي (Total Column Ozone) أحد المكونات الأساسية للغلاف الجوي، حيث يلعب دوراً هاماً في امتصاص الأشعة فوق البنفسجية الضارة (UV-B) وحماية النظم البيئية والصحة البشرية. تعرّف سماكة طبقة الأوزون بالكمية الكلية في عمود رأسي من الهواء بدءاً من سطح البحر، وتقدر هذه السماكة بوحدة الدوبسون (DU)، وهي تختلف من خط عرض إلى آخر لأسباب كثيرة حيث تكون أقل عند خط الاستواء وأكبر كلما اتجهنا نحو القطبين. وهي تختلف أيضاً حسب المواسم إذ تكون أكثر سماكة في فصل الربيع وأقل في فصل الخريف [1]. ويُمثل توزيع الأوزون الكلي نظاماً ديناميكياً يعكس التفاعل المعقد بين العمليات الكيميائية والفيزيائية والمناخية [14]، أظهرت العديد من الدراسات الحديثة تباينات مكانية وزمانية حتى عند خط العرض الواحد، فعند خط العرض 35° شمالاً وصل التباين في تراكيز الأوزون إلى 35DU ما بين المدن التي قيست كمية الأوزون فيها، ويعزى ذلك إلى العوامل المناخية والظروف الخاصة بكل منطقة [29]. وتبرز هنا أربع آليات رئيسية:

1. التأثيرات المناخية الكبرى: تؤثر أنماط التذبذب المناخي مثل التذبذب القطبي (Arctic Oscillation -AO) والتذبذب الأطلسي الشمالي (North Atlantic Oscillation -NAO)، على نقل الأوزون الستراتوسفيري عبر تعديل شدة التيار النفاث القطبي [11].
2. الظواهر الجوية المتطرفة: أظهرت دراسة حديثة أن العواصف الرعدية الشديدة ترفع الأوزون السطحي 20-30% عبر النقل العمودي والموجات الحارة مما يزيد من تكوين الأوزون الضار بمعدل 3-5 ppb/°C، والعواصف الرملية تقلل الأوزون الكلي 10-15 DU عبر حجب الإشعاع الشمسي [5].
3. التفاعلات المحلية: يلاحظ أن الجزر الحرارية الحضرية (Urban Heat Islands -UHIs) كما في مدينة طوكيو تزيد من تفاعلات NO_x-VOC، وأن الرياح البحرية في مالطا تخفف التلوث لكنها تنقل رطوبة تؤثر على غيوم الستراتوسفير، التضاريس الجبلية حول طهران تعدل أنماط الرياح الرأسية والأفقية.
4. التغير المناخي طويل الأمد: إن ارتفاع 1°C في درجة الحرارة يقلل الأوزون الستراتوسفيري بنحو 1-2 DU، وتغير أنماط الرياح يعدل مسارات نقل الأوزون بنسبة 5-10% لكل عقد [12].

على الرغم من وقوع عدة مدن على خط العرض نفسه (35° شمالاً)، إلا أن البيانات تظهر اختلافاً ملحوظاً في تراكيز الأوزون، وهو ما يعكس التفاعل المعقد بين العوامل الطبيعية والبشرية [28].

شهد ثقب الأوزون فوق القارة القطبية الجنوبية في عام 2020 اتساعاً استثنائياً، حيث بلغت مساحته القصوى 24.8 مليون كم² في 20 أيلول [18]، ليصبح أحد أكبر الثقوب المسجلة وأطولها عمراً (من آب إلى كانون الأول) [4]. ويعزى هذا الاتساع غير المألوف إلى تفاعل عوامل جوية وكيميائية، أهمها وجود دوامة قطبية قوية ومستقرة سجلت درجات حرارة قياسية في الستراتوسفير (-78°C) كما وثقتها وكالة ناسا [19]، واستمرار وجود مركبات الكلور والبروم المستنفدة للأوزون رغم تقليصهما بموجب بروتوكول مونتريال [23]، بالإضافة إلى تأثيرات غير مباشرة لتغير المناخ عززت استقرار الدوامة القطبية [21].

تشير هذه الملاحظات إلى الحساسية الشديدة لنظام الأوزون للتباينات المناخية، رغم الاتجاه العام نحو التعافي على المدى الطويل كما أكدته منظمة الأرصاد العالمية في تقييمها العلمي لعام 2020 [24]. وتؤكد هذه النتائج الحاجة إلى استمرار الرصد الدقيق لنظام الأوزون في ظل تغير المناخ العالمي.

أهمية البحث وأهدافه:

ان مراقبة سماكة طبقة الأوزون ومعرفة تأثير أطنان من الملوثات الغازية والتي حققت بها خلال العقود السابقة يتطلب جهود جميع الدول والمراكز البحثية حول العالم. وتركز هذه الدراسة على إيجاد الوسطي العام لكمية الأوزون وإلى تحليل التباين في الأوزون الكلي بين ست مدن تقع على خط العرض 35°N (طوكيو، طهران، السليمانية، اللاذقية، جزيرة كريت، جزيرة مالطا)، مع الإشارة على تأثير التلوث الحضري (NO_x، VOCs)، والخصائص الجغرافية (الارتفاع، القرب من المسطحات المائية) والأنماط الجوية الموسمية. ويهدف هذا البحث إلى:

1. دراسة سماكة طبقة الأوزون فوق عدة مدن واقعة على خط العرض 35° شمالاً.
2. دراسة تأثير بعض العوامل الفلكية والطبيعية والبشرية على طبقة الأوزون على خط العرض المدروس.

طريقة البحث:

تم أخذ البيانات اليومية لكمية الأوزون الجوي الكلية فوق المدن المدروسة والواقعة على خط العرض 35° شمالاً ذات الإحداثيات الفلكية الموضحة في الجدول (1). بواسطة أجهزة قياس كمية الأوزون (Ozone Monitoring Instrument OMI و Global Ozone (GOME-2) و Ozone Monitoring Experiment-2) والمحمولة على الأقمار الصناعية (MetOp، AURA) ودقة القياس لهما على الترتيب 1-2%، 1-3% وتعتبر قياسات عالية الدقة ومستقرة وهي مناسبة تماماً لاتجاهات طويلة المدى والمراقبة العالمية، حيث أن درجة تمثيل البيانات على سطح الأرض هي 1° خط عرض $\times 1.25^\circ$ خط طول، وتم تسجيل كمية الأوزون الكلية بانتظام كسماكة لطبقة الأوزون [1]. وتعتمد طريقة البحث على أخذ البيانات لكمية الأوزون الكلية اليومية فوق هذه المدن المذكورة بعد إدخال الإحداثيات الفلكية على الموقع المراد حساب كمية الأوزون الكلية له.
جدول(1): الموقع الفلكي للمدن المدروسة.

الارتفاع عن سطح البحر (m)	خط الطول	خط العرض	المدينة
16	$14.51^\circ E$	$35.89^\circ N$	جزيرة مالطا
60	$25.14^\circ E$	$35.34^\circ N$	جزيرة كريت
11	$35.79^\circ E$	$35.52^\circ N$	اللاذقية (سورية)
882	$45.43^\circ E$	$35.55^\circ N$	السليمانية (العراق)
1700-1200	$51.38^\circ E$	$35.68^\circ N$	طهران (إيران)
40	$139.65^\circ E$	$35.67^\circ N$	طوكيو (اليابان)

يظهر الجدول (1) المدن المدروسة والواقعة على خط العرض نفسه تقريباً وعلى خطوط الطول المختلفة حيث تمتد من خط الطول $14.51^\circ E$ (مالطا) إلى خط الطول $139.65^\circ E$ (طوكيو) وهي مناطق تشمل مناخات وبيئات مختلفة، فنجد أن مدينة مالطا(مالطا) تتصف بمناخ متوسطي مع رياح بحرية قوية، وبسبب موقعها المعزول تكون مستويات الأوزون متأثرة بالانبعاثات القادمة من أوروبا وشمال أفريقيا عبر الرياح، وتتصف مدينة كريت (اليونان) بمناخ متوسطي نموذجي (صيف جاف حار وشتاء معتدل ممطر)، مدينة اللاذقية (سورية) ذات مناخ متوسطي

معتدل (صيف حار ورطب وشتاء معتدل وممطر، وتتصف مدينة السليمانية (العراق) بمناخ متوسطي مع صيف حار وشتاء بارد وممطر، بينما مدينة طهران (إيران) لها مناخ شبه جاف، مع صيف حار وجاف وشتاء بارد، وتعد من أكثر المدن تلوثاً في العالم، مع مستويات عالية من الجسيمات الدقيقة وأكاسيد النتروجين التي تتفاعل مع الأوزون [10]، وفي أقصى الشرق لهذه المدن مدينة طوكيو والتي تتصف بمناخ شبه استوائي رطب، مع صيف حار ورطب وشتاء معتدل، وتعاني من تلوث هواء مرتفع (تلوث حضري وضباب دخاني) بسبب الكثافة الصناعية والمرورية [22]. ان خط العرض 35°N يقع في قلب مناطق خطوط العرض الوسطى للكرة الأرضية، حيث تعمل خطوط العرض الوسطى كمختبر طبيعي لمراقبة كيفية اختلاط الهواء الاستوائي الغني بالأوزون والهواء القطبي المستنفد للأوزون، ويمثل خط العرض هذا منطقة انتقالية حيوية بين المناطق الاستوائية ذات الأشعة الشمسية العالية والمناطق المعتدلة ذات التقلبات الجوية الموسمية، مما يجعله موقعاً مثاليًا لرصد التفاعلات الديناميكية بين النقل الجوي الستراتوسفيري، وتغيرات سماكة الأوزون، والتعرض للأشعة فوق البنفسجية (UV) في مناطق مأهولة كثيفة. كما أن وقوعه ضمن النطاق شبه المداري (Subtropical Jet Stream) يُعزز عمليات تبادل الهواء بين خطوط العرض العليا والمناطق المدارية، مما يؤثر على توزيع الأوزون ومستوياته. لذا، تُعد دراسة الأوزون عند هذا الخط أساسية لتقييم الاتجاهات طويلة الأمد، وفعالية بروتوكول مونتريال، وتأثيرات التغير المناخي على الطبقة الواقية للأرض [16] [26] [27].

النتائج والمناقشة:

تؤثر التباينات الطبوغرافية، مثل الارتفاع عن سطح البحر، بشكل مباشر على تعرض المناطق للطبقة الستراتوسفيرية الغنية بالأوزون، فعلى سبيل المثال، تُظهر مدينة طهران والتي تقع على ارتفاع (1200-1700m) عن مستوى سطح البحر مستويات أوزون أقل من مدينة مالطا (منخفضة الارتفاع) بسبب التلوث المحلي الناجم عن انبعاثات أكاسيد النيتروجين [17]. كما تلعب الديناميكية الجوية دوراً جوهرياً، حيث يُسهم النقل الستراتوسفيري في الربيع في رفع مستويات الأوزون في المناطق الساحلية مثل مالطا، بينما تقلل العواصف الترابية في المناطق الداخلية (السليمانية، طهران) من كفاءة تكوينه [15].

تُظهر تغيرات كمية الأوزون الكلية خلال العام الواحد عدة مناخي، منها تغيرات يومية، وقصيرة الأمد وفصلية، وكذلك توجد عوامل أخرى تؤدي إلى تغيرات طويلة الأمد في كمية الأوزون، كفعالية البقع الشمسية، ودورة الهواء العلوي، وهي تستمر لأكثر من سنة، ثم تعود طبقة الأوزون إلى مستواها الطبيعي حالما تزول الأسباب المؤثرة في ذلك. كما تتفاعل دورة البقع الشمسية (SC) مع الذبذبة الثنائية (QBO) عبر ثلاث عمليات رئيسية:

- تعديل رياح الستراتوسفير الاستوائية: من خلال الطور الغربي لـ (QBO-W)، حيث تزداد كفاءة نقل الأوزون نحو خطوط العرض الوسطى ($35^{\circ}N$) بنسبة 15-20% في سنوات الذروة الشمسية [9]، ويعزز هذا التأثير تركيز الأوزون بشكل خاص في الطبقة (20-25 km).

- تضخيم الإشارة الشمسية: عندما يتزامن QBO-E (الشرقي) مع الحد الأدنى للدورة الشمسية، يُلاحظ انخفاض إضافي 3-5 DU في الأوزون الكلي [13]، وهذه التأثيرات تكون أكثر وضوحاً في شهري شباط-آذار.

- تفاعل غير خطي مع التيار النفاث: تُظهر النمذجة العددية أن QBO+SC يعدلان سرعة التيار النفاث القطبي بـ $10 \text{ m/s} \pm$ (متوسط $35^{\circ}N$)، وهذا يغير أنماط نقل الأوزون عبر تعديل موضع الدوامة القطبية (Front Polar Vortex).

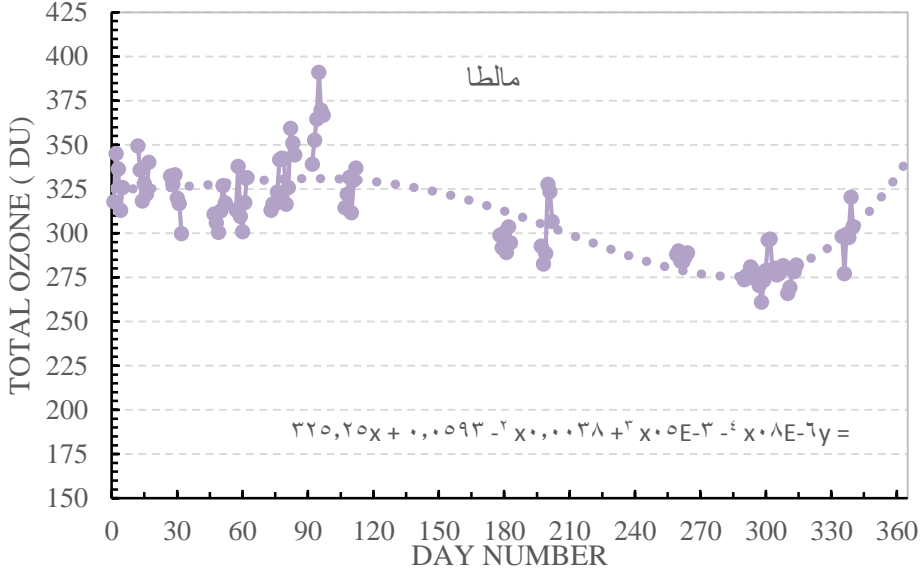
يُلاحظ من الجدول (2) أن المتوسطات السنوية x لكمية الأوزون الكلية متقاربة وكذلك الانحراف المعياري خلال العام نفسه والذي يظهر التأثير الموسمي الواضح وكذلك يري المدى المحسوب بين القيم الصغرى والعظمى، وقد سُجلت قيمة كمية الأوزون الوسطية للمدن المدروسة الواقعة على خط العرض $35^{\circ}N$ قيمة تقارب وسطياً $307.3 \pm 2.5 \text{ DU}$ وهذه القيمة تماثل سماكة طبقة الأوزون لخط العرض المدروس.

جدول(2): المتوسطات السنوية، القيم العظمى، القيم الصغرى، والانحراف المعياري SD والمدى R، وحيث x المتوسط الشهري لكمية الأوزون الجوي الكلية بوحدة الدوبسون (DU).

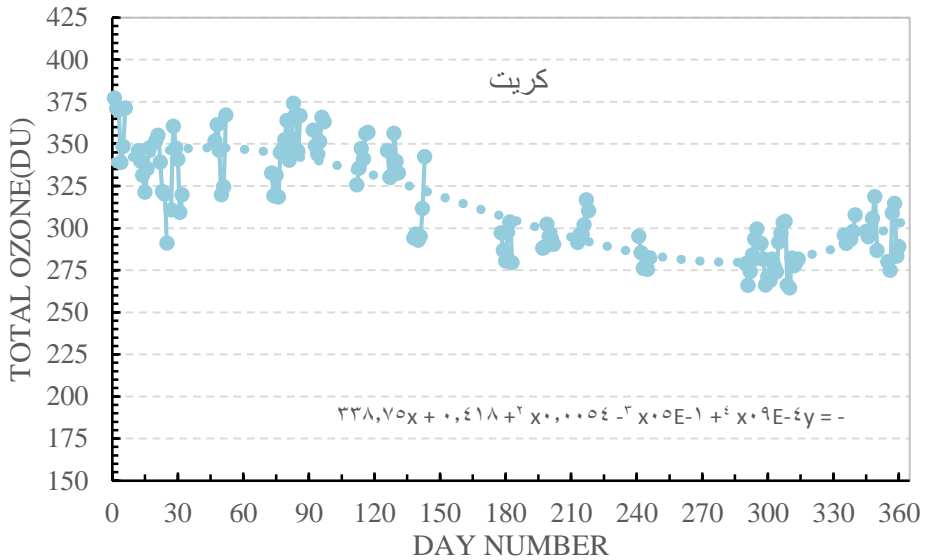
دراسة سماكة طبقة الأوزون لعدد من المدن الواقعة على خط عرض 35°N

المدينة	مالطا	كريت	اللاذقية	السليمانية	طهران	طوكيو
x(MEN)	309.8	315.4	309.8	302.8	300.4	305.4
MAX	391.1	377.2	409.6	395.1	382.9	409.0
MIN	261.1	264.6	240.6	239.3	235.0	243.3
SD	27.1	31.1	38.4	34.6	33.3	36.5
R	130.0	112.6	169.0	155.8	147.9	165.7

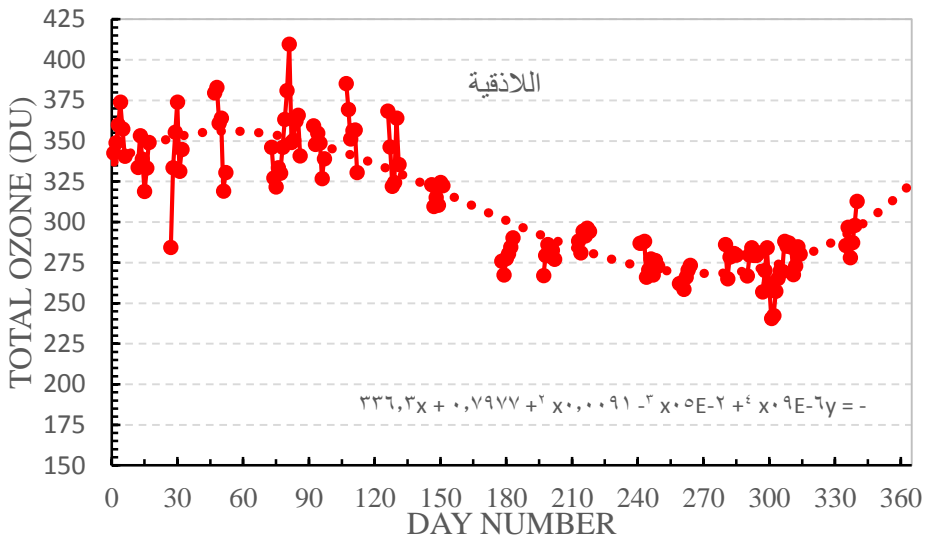
تُظهر الأشكال من (1) إلى (6) تغيرات كمية الأوزون للمدن المدروسة خلال عام 2020 حيث نلاحظ أن القيم العظمى تظهر في أشهر الربيع والقيم الصغرى في أشهر أيلول وتشرين أول وتشرين الثاني والتباينات اليومية قريبة من بعضها البعض ضمن الموسم نفسه.



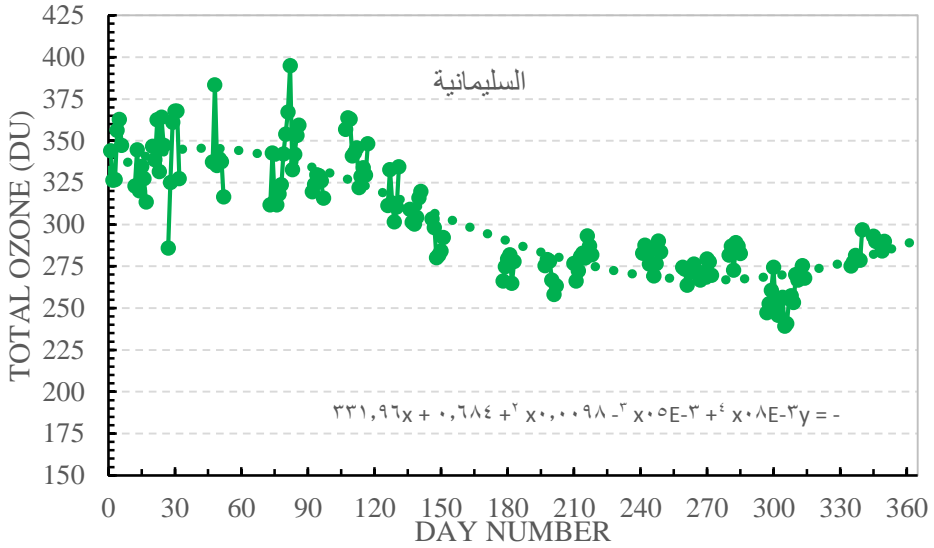
الشكل(1): التغيرات اليومية لكمية الأوزون الكلية فوق مدينة مالطا خلال عام 2020.



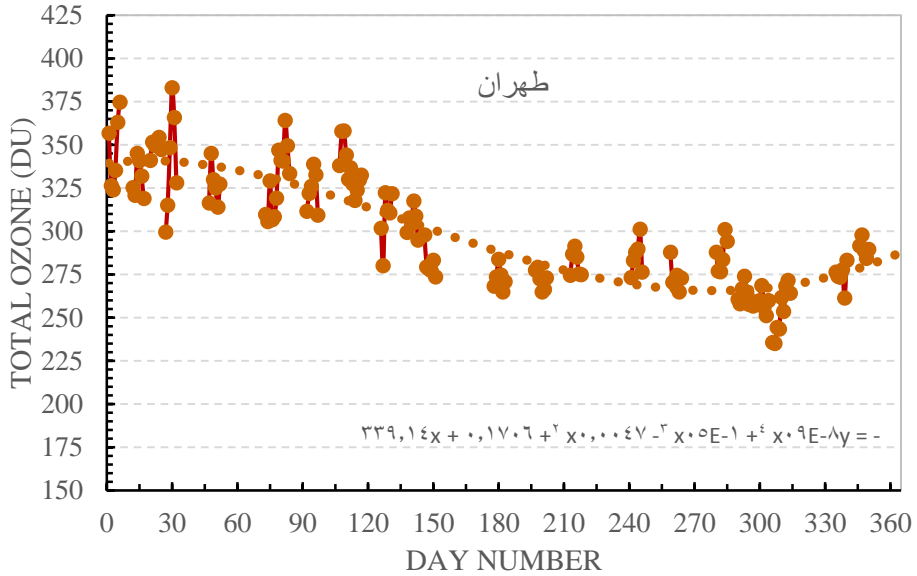
الشكل(2): التغيرات اليومية لكمية الأوزون الكلية فوق مدينة كريت خلال عام 2020.



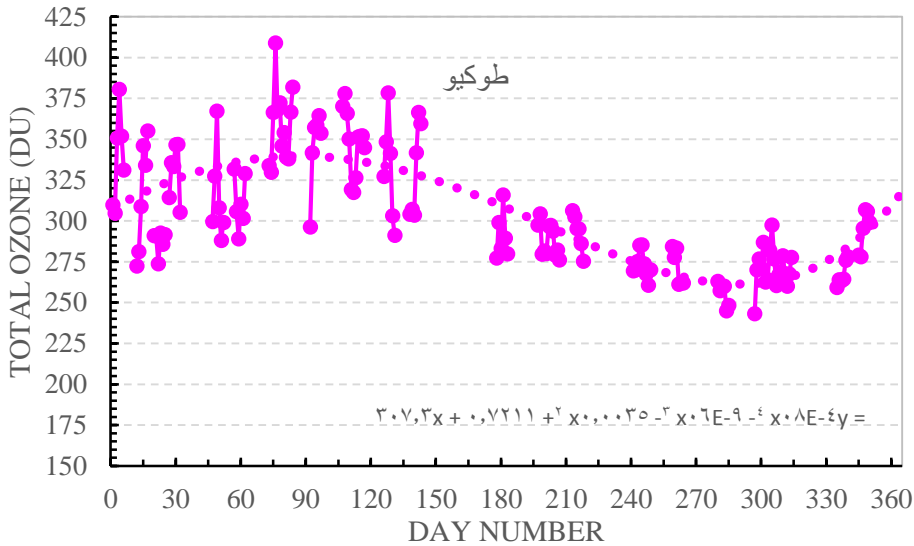
الشكل(3): التغيرات اليومية لكمية الأوزون الكلية فوق مدينة اللاذقية خلال عام 2020.



الشكل(4): التغيرات اليومية لكمية الأوزون الكلية فوق مدينة السليمانية خلال عام 2020.



الشكل(5): التغيرات اليومية لكمية الأوزون الكلية فوق مدينة طهران خلال عام 2020.



الشكل(6): التغيرات اليومية لكمية الأوزون الكلية فوق مدينة طوكيو خلال عام 2020.

لقد تأثرت كمية الأوزون الكلية في عام 2020 بعدة عوامل مناخية وفلكية بارزة، بعضها طبيعي والآخر ناتج عن نشاط بشري ومنها جائحة كوفيد-19: حيث أظهرت بيانات من وكالة ناسا (NASA) ووكالة الفضاء الأوروبية (ESA) أن انبعاثات أكاسيد النيتروجين (NO_x) انخفضت بنسبة 20-30% خلال النصف الأول من 2020 مقارنة بالسنوات السابقة، بسبب تقليل النشاط الصناعي والنقل الجوي والبرّي [2]. حيث أن انخفاض NO_x قد يُحفز تكوين الأوزون في طبقة التروبوسفير، لكنه في طبقة الستراتوسفير يُقلل من التفاعلات التي تدمر الأوزون عند وجود مركبات الكلور [3]، وبالتالي لوحظ تحسن طفيف في تكوين الأوزون الستراتوسفيري بسبب انخفاض العوامل المساعدة على تفككه.

وثقب الأوزون فوق القطب الجنوبي: حيث وصل ثقب الأوزون فوق القطب الجنوبي إلى حوالي 24.8 مليون كم² (من أكبر المساحات المسجلة في السنوات الأخيرة) [24]، وذلك بسبب البرودة الشديدة: حيث قامت بتعزيز تكوين سحب الستراتوسفير القطبية (PSCs) التي تنشط مركبات الكلور والبروم المدمرة للأوزون، كما أوضحت بيانات من قمر AURA التابع لناسا [18] [19]،

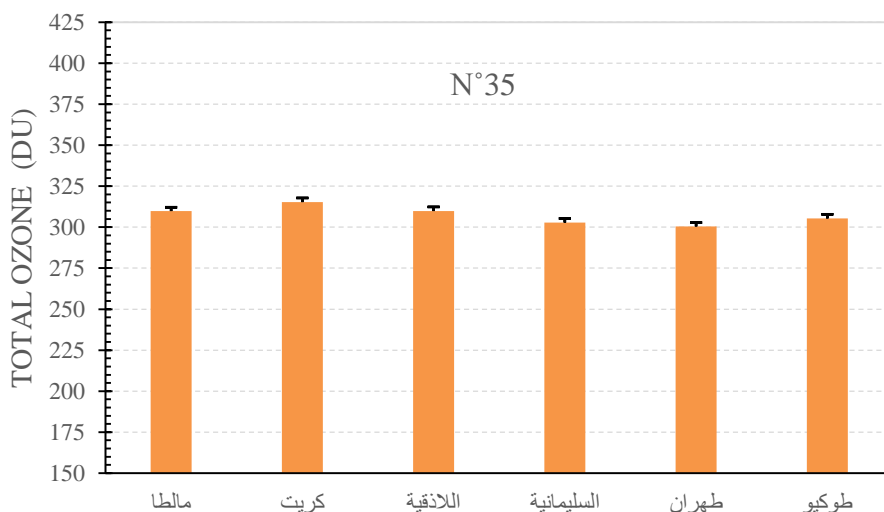
وتأخر انهيار الدوامة القطبية: حيث أدى ذلك إلى استمرار تدمير الأوزون حتى كانون الأول 2020 [20].

ورغم حظر المركبات الكلوروفلوروكربون (CFCs) وفق اتفاقية مونتريال إلا أنها لا تزال موجودة في الغلاف الجوي وتتفاعل مع البرودة الشديدة [1] [25]، حيث أن هذه المركبات لا تتفاعل مع جذر الهيدروكسيل OH^- ولا تتفكك ضوئياً وكذلك لا تزال بالمطر ضمن طبقة التروبوسفير، مما أدى إلى انخفاض حاد في الأوزون فوق القطب الجنوبي بنسبة تصل إلى 60% مقارنة بالمعدل الطبيعي، يضاف إلى ذلك النشاط الشمسي، حيث كانت الشمس في أضعف نشاط لها منذ 100 عام، مرحلة الحد الأدنى للدورة الشمسية في عام 2020 (قرب نهاية دورة الكلف الشمسي 24 وبداية دورة الكلف الشمسي 25) [6] [14]. حيث كان له تأثير محدود نسبياً على طبقة الأوزون في عام 2020، لكنه ساهم في تقلبات طفيفة لها. كذلك التغير في أنماط الرياح (تغير في دوران الغلاف الجوي (QBO - التذبذب الربع سنوي) حيث مرت الرياح الستراتوسفيرية الاستوائية بمرحلة شرقية، مما أثر على نقل الأوزون من المناطق الاستوائية إلى القطبين، ويضاف إلى العوامل السابقة أيضاً، أحداث طبيعية استثنائية كحرائق أستراليا 2019-2020 (حرائق الغابات الضخمة) حيث أطلقت كميات هائلة من الدخان والهباء الجوي إلى الستراتوسفير، بما في ذلك مركبات الكلور والبروم غير المباشرة، والتي تسرع التفاعلات الكيميائية التي تدمر الأوزون [25] [7] [8].

من خلال الأشكال (1,2,3,4,5,6) التي تم فيها تمثيل المنحنيات المعبرة عن التغيرات اليومية لكمية الأوزون الجوي الكلية فوق المدن الواقعة على خط العرض 35° شمالاً خلال العام 2020، تبين ما يأتي:

1. ترتفع كمية الأوزون الجوي الكلية بداية أشهر الشتاء، وتكون القيم عالية في أواخر فصل الشتاء وخلال فصل الربيع بشكل خاص، حيث تقوم الدورة العامة للرياح بنقل الهواء الغني بالأوزون من المناطق المدارية باتجاه مناطق العروض المتوسطة والعليا.
2. يلاحظ أن قيمة كمية الأوزون الجوي الكلية تكون منخفضة خلال فصل الخريف، وتميل كمية الأوزون الكلية خلال فصل الصيف إلى التناقص، حيث يترافق ذلك مع زيادة شدة

الإشعاع الشمسي الكلي، وبالتالي زيادة شدة الإشعاعات فوق البنفسجية الواردة من الشمس، وبسبب تناقص كمية الأوزون يزداد خطر الأشعة فوق البنفسجية الواصلة إلى سطح الأرض. 3. كما يمكن الإشارة إلى التأثيرات المكانية المميزة للمواقع المدروسة حيث يلاحظ أكبر استجابة لـ QBO-W + Solar Max في مدينة طوكيو عند (+10DU)، وتأثير ضعيف للعواصف الرملية في مدينتي طهران والسليمانية واستقرار ديناميكي في جزيرتي مالطا وكريت.



الشكل (7): كمية الأوزون الكلية المتوسطة فوق المدن المدروسة لعام 2020.

من خلال الشكل (7) الذي يُظهر متوسط كمية الأوزون الجوي الكلية فوق المدن المدروسة الواقعة على خط العرض 35° شمالاً خلال العام 2020، يلاحظ أن كمية الأوزون الوسطية لعام 2020 لمدينة طوكيو قد بلغت 305.4 DU، ولمدينة طهران 300.4 DU، ولمدينة السليمانية 302.8DU، ولمدينة اللاذقية 309.8 DU، وجزيرة كريت 315.4 DU، وبلغت فوق جزيرة مالطا 309.8 DU.

الاستنتاجات:

1- بلغت القيمة الوسطية لكمية الأوزون الكلية المسجلة فوق المدن الستة المدروسة والواقعة على خط عرض 35° شمالاً 307.3 ± 2.5 DU وتعتبر هذه السماكة حامية من الإشعاعات فوق البنفسجية الضارة.

- 2- تراوحت قيم الانحرافات المعيارية لكمية الأوزون الكلية للمدن المدروسة قيمها من 27.1 DU إلى 36.5 DU ومما تدل على التأثير والتباين الموسمي حيث تكون قيمة الأوزون الكلية في أشهر الربيع عظمى، وفي أشهر الخريف صغرى.
- 3- اتساع مساحة ثقب الأوزون في القطب الجنوبي لم يؤثر على سماكة طبقة الأوزون فوق المدن المدروسة والواقعة على خط العرض 35° شمالاً، كما لم يؤثر توقف النشاط الصناعي والنقل لفترة قصيرة عليها.
- 4- وُجدت أكبر قيمة للمدى خلال 2020 في مدينة طوكيو حيث بلغت 169 DU وأصغر قيمة له بلغت 112.6 DU في جزيرة كريت، ويؤكد هذا على التأثير الموسمي مرة أخرى.

المقترحات والتوصيات:

- 1- انشاء شبكة رصد أرضية لقياسات الأوزون السطحي والأوزون الستراتوسفري.
- 2- متابعة مراقبة طبقة الأوزون لفترات طويلة ودراسة تأثير المركبات الكيميائية المؤثرة عليها والتي مازالت موجودة في الغلاف الجوي.
- 3- دراسة سماكة طبقة الأوزون لمواقع على خطي العرض 20° و 40° شمالاً.

المراجع:

1. العرابي حمود، 2017. تحديد كمية الأوزون الكلية ومعامل الأشعة فوق البنفسجية فوق مدينة دمشق لعام 2013، مجلة بحوث جامعة دمشق، العلوم الأساسية، المجلد 33، العدد الثاني، 61-86.
2. Bauwens, M., Compernelle, S., Stavrakou, T. et al. (2020). **Impact of coronavirus outbreak on NO₂ pollution assessed using TROPOMI and OMI observations.** Nature Climate Change, 10, 914–918.
3. Chipperfield, M. P., et al. (2020). **On the cause of recent variations in lower stratospheric ozone.** Geophysical Research Letters, 47(12).
4. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). (2020). **Unusually persistent and large Antarctic ozone hole in 2020.** (Technical Report). European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
5. Duncan, B.N., et al. (2022). **Thunderstorm Effects on Atmospheric Composition.** Science Advances, 8(24).

6. Ermolli, I., et al. (2023). **TSIS-1 Observations of Solar Cycle 25 Onset**. Solar Physics, 298(4), 78.
7. Farman j.c., and Gardiner B.G., and Shanklin j.d., (1985). **Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction**, Nature, 315, 207-210.
8. Hood, L.L., et al. (2023). **Stratospheric Ozone Response to Solar Forcing**. Nature Geoscience, 16(1), 45-52 .
9. Hood, L.L., Soukharev (2023). **Stratospheric Ozone Response to Combined Solar and QBO Forcing**. J. Atmos. Sci., 80(3), 45-62 . DOI:10.1175/JAS-D-22-0152.1.
10. Hosseinibalam, F et al. (2020). **Temporal and spatial evaluation of criteria air pollutants in Tehran, Iran**. Environmental Engineering Science, 37(5), 339-352. <https://doi.org/10.1089/ees.2019.0345>.
11. Hurrell, J.W., et al. (2013). **The North Atlantic Oscillation and Stratospheric Ozone Transport**. Journal of Climate, 26(12), 4083-4096.
12. IPCC (2023). **AR6 Climate Change 2023: The Physical Science Basis**.
13. Kodera, Kuroda (2022). **QBO-Solar Cycle Interaction in Middle Atmosphere**. Geophys. Res. Lett., 49(12), e2022GL098745.
14. Lean, J., et al. (2022). **Solar Ultraviolet Variability over Cycle 24** . Journal of Geophysical Research: Space Physics, 127(8).
15. Liu, X., et al. (2020). **Stratosphere-Troposphere Exchange of Ozone at Mid-Latitudes** .Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(12).
16. McKenzie, R. L., et al. (2021). **Health risks from ozone layer depletion at mid-latitudes**. Science of the Total Environment, 755(Part 2), 142652.
17. Monks, P. S., et al. (2015). **Tropospheric Ozone and Its Precursors from Urban to Global Scales** .Atmospheric Chemistry and Physics, 15(15).
18. NASA (2020). Antarctic Ozone Hole Reaches Annual Peak. (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>).
19. NASA GSFC (2023). **Aura MLS Data Product Validation for Ozone-QBO Studies** .

20. Peter, T., et al. (2021). **COVID-19 lockdowns highlight the complexity of ozone production and its sensitivity to environmental drivers**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(5), 4163–4185.
21. Smith et al. (2021). **Nature Climate Change**, 11(3), 202-208.
22. Watanabe, M., Nansai, K. (2018). **The Economic Structure of Air Pollution in Tokyo: A Multi-Regional Input-Output Analysis**. *Sustainability*, 10(7), 2250. <https://doi.org/10.3390/su10072250>.
23. World Meteorological Organization (WMO) & United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2020** (Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 66). Geneva.
24. WMO (2021). **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2020** . (<https://ozone.unep.org>).
25. World Meteorological Organization (WMO). (2022). **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022** https://ozone.unep.org/sites/default/files/2022-02/WMO_UNEP_2022_Ozone_Assessment.pdf.
26. World Meteorological Organization (2022). **Ozone and Climate Interactions**. WMO Report No. 1295 .
27. Zanis, P., et al. (2020). **Ozone depletion over the Mediterranean in a changing climate**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(12), 7483–7497.
28. Zhang, Y., et al. (2019) .**Topographic Impacts on Stratospheric Ozone Variability**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(12).
29. Zhang, Y., et al. (2023). **Extreme Weather Impacts on Ozone Variability**. *Nature Climate Change*, 13, 456-470.