الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
المعهد العالي للتخطيط الإقليمي

برنامج الدراسات العليا في
تخطيط المدن مع جامعة
باريس الشرقية مارن لافالييه

منهجية جيومكانية متعددة المعايير لتقييم وجدولة أولويات إعادة تأهيل الأراضي الحضرية المتروكة كبنية تحتية خضراء

(دراسة حالة مدينة دمشق)

"دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في قسم هندسة المدن والتنمية الحضرية المستدامة"

إعداد الباحث المهندس: محمد لبيب صالح

إشراف:

الأستاذة الدكتورة
نتاليا عطفة

الأستاذ الدكتور
محمد حيان سفّور

جامعة دمشق - 2025

الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
المعهد العالي للتخطيط الإقليمي

برنامج الدراسات العليا في
تخطيط المدن مع جامعة
باريس الشرقية مارن لافالييه

منهجية جيومكانية متعددة المعايير لتقييم وجدولة أولويات إعادة تأهيل الأراضي الحضرية المتروكة كبنية تحتية خضراء

A Multi-Criteria Geospatial Methodology for Assessing and Prioritizing the Rehabilitation of Derelict Urban Land as Green Infrastructure.

"دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في قسم هندسة المدن والتنمية الحضرية المستدامة"

إعداد الباحث المهندس: محمد لبيب صالح

تمت مناقشة البحث في المعهد العالي للتخطيط الإقليمي في دمشق 19/11/2026
وقد أجيز من قبل لجنة المناقشة بعد إجراء التعديلات المطلوبة

لجنة المناقشة	
أ.د حيان سفور	
أ.د نتاليا عطفة	
د. ميسون عيد	
د. عبد اللطيف محيسن	

فهرس المحتوى

ملخص البحث..... 18

Abstract 208

Résumé /Abstract 212

الكلمات المفتاحية:..... 20

مخطط البحث (الإطار النظري)..... 23

مخطط البحث (الإطار العملي التطبيقي)..... 24

الجزء التمهيدي: الإطار المنهجي للبحث..... 25

المقدمة 25

2. إشكالية البحث..... 25

3. تساؤلات البحث 26

4. أهداف البحث..... 26

5. أهمية البحث..... 27

6. تحديات البحث..... 27

7. منهجية البحث..... 27

8. أدوات البحث 28

9. أسباب ومبررات اختيار موضوع البحث..... 28

الباب الأول: الإطار النظري 29

تمهيد 29

الفصل الأول: الاستشعار عن بعد والبيانات مفتوحة المصدر: الأساس التكنولوجي للتحليل الحضري..... 30

1.1 مدخل إلى الفصل..... 30

1.1.1العلاقة بين التكنولوجيا وصنع القرار الحضري 30

1.1.2هيكلية الفصل..... 31

1.2 الاستشعار عن بُعد: المفاهيم الأساسية 32

1.2.1تعريف ومبادئ الاستشعار عن بُعد 32

1.2.2الطيف الكهرومغناطيسي والتوقيع الطيفي 32

1.2.3أنواع الاستشعار: الفعّال والسلبي..... 32

1.2.4المنصات: أقمار صناعية، طائرات مسيرة، نظم هجينة..... 33

1.2.5خصائص الصور الفضائية.....33
1.2.6المعالجة الأولية للصور الفضائية 33
1.3 نظم دعم القرار (Decision Support Systems – DSS) 34
1.3.1مفهوم نظم دعم القرار: الجذور والتطور 34
1.3.2نظم دعم القرار المكاني :(SDSS) الدمج بين البعد المكاني والتحليل الكمي.....34
1.3.3مكوناتSDSS 35
1.3.4تطبيقات SDSS في التخطيط الحضري وإدارة الموارد.....35
1.4 الأطر المبنية على الأدلة(Evidence-Based Frameworks) 36
1.4.1مفهوم التخطيط الحضري المبني على الأدلة.....36
1.4.2العلاقة بين البيانات، النماذج، وصنع القرار.....36
1.4.3دور مؤشرات الاستشعار عن بعد و GISفي توفير قاعدة معرفية موضوعية.....36
1.4.4التحديات في السياقات العربية: نقص البيانات مقابل وفرة الصور الفضائية 37
1.5الخرائط المكانية الصريحة (Spatially Explicit Maps) 37
1.5.1تعريف الخرائط الصريحة ودورها في التحليل الحضري.....37
1.5.2تحويل البيانات الرقمية إلى خرائط مفهومة لصناع القرار 38
1.5.3أمثلة على الخرائط المكانية الصريحة 38
1.5.4القيمة الاتصالية للخرائط.....39
1.6 منصات التحليل السحابية.....40
1.6.1Google Earth Engineكنموذج 40
1.6.2إمكانيات المعالجة واسعة النطاق للبيانات المكانية.....40
1.6.3أمثلة على التطبيقات الحضرية.....41
1.7 مستقبل الأنظمة المكانية في التخطيط الحضري.....42
1.7.1التكامل بين DSS و SDSSوتقنياتBig Data 42
1.8 الخلاصة النقدية للفصل.....43
الفصل الثاني: البنية التحتية الخضراء 45
تمهيد 45
2.1 مفهوم البنية التحتية الخضراء 45
2.1.1 التعريفات الأساسية.....45
2.1.2 تطور المفهوم في الأدبيات الأكاديمية.....46
2.1.3 الأبعاد المتعددة للبنية التحتية الخضراء.....47

2.1.4 العلاقة مع البنية التحتية الرمادية.....47
2.1.5 أهمية إدراج المفهوم في البحوث الأكاديمية.....48
2.2 أهداف البنية التحتية الخضراء.....48
2.3 مكوّنات البنية التحتية الخضراء.....49
2.3.1 المكونات الطبيعية الأساسية.....49
المسطحات المائية.....49
الغابات والأحزمة الشجرية.....50
الأراضي الزراعية.....50
المراعي والأراضي المفتوحة.....50
2.3.2 المكونات الحضرية المُدمجة.....50
الحد من التلوث الصوتي.....51
2.3.3 التكامل بين المكونات.....52
2.3.4 الأبعاد التخطيطية للمكونات.....52
2.3.5 ملاحظات ختامية.....53
2.4 مؤشرات تقييم البنية التحتية الخضراء.....53
2.4.1 التصنيف العام للمؤشرات.....53
2.4.2 الفوائد المتعددة للبنية التحتية الخضراء.....54
2.5 مؤشر الغطاء النباتي المعياري– (NDVI).....55
2.5.1 النشأة والتطور التاريخي للمؤشر.....55
2.5.2 الأساس الفيزيائي والمعادلة الرياضية.....56
2.5.3 الخصائص التقنية لمؤشرNDVI.....56
2.5.4 التطبيقات الموسعة للبيئة الحضرية.....57
2.5.5 التحديات في الاستخدام الحضري.....57
2.5.6 التحليل التكميلي مع مؤشرات أخرى.....57
2.5.7 التطورات الحديثة.....58
2.5.8 المقارنة بين NDVI ومؤشرات الغطاء النباتي الأخرى.....58
2.5.9 التحليل الزمني للمؤشرNDVI.....58
ملاحظات تحليلية للتحليل الزمني.....59
2.5.10 مؤشرات جودة الغطاء النباتي المستمدة منNDVI.....59
2.5.11 توزيع NDVI في الحيز الحضري.....60

2.6 مؤشر البناء المعياري(NDBI) 61
2.6.1 النشأة والتطور التاريخي..... 61
2.6.2 الأساس النظري والمعادلة الرياضية..... 61
2.6.3 التطبيقات في البيئة الحضرية..... 62
2.6.4 التحديات في استخدام NDBI..... 62
2.6.5 التحليل التكميلي مع مؤشرات أخرى 63
2.6.7 الجداول التحليلية لتوزيعNDBI 63
2.7 مؤشر الغطاء النباتي المعدل للتربة(SAVI) 64
2.7.1 النشأة والتطور التاريخي..... 64
2.7.2 الأساس النظري والمعادلة الرياضية 64
2.7.3 الخصائص التقنية 65
2.7.4 التطبيقات في البيئة الحضرية..... 65
2.7.5 التحديات في الاستخدام..... 65
2.7.6 التحليل التكميلي مع مؤشرات أخرى 66
2.7.7 الجداول التحليلية لتوزيعSAVI 66
2.8 مؤشر الجزر الحرارية الحضرية– (UHI – Urban Heat Island) 67
2.8.1 الخلفية النظرية العميقة..... 67
2.8.2 الاشتقاق من بيانات الاستشعار عن بعد – التفاصيل الموسعة 68
2.8.3 تحليل العوامل المؤثرة على شدةUHI 69
2.8.4 التطبيقات التفصيلية في البيئة الحضرية..... 70
2.8.5 التحليل التكميلي والعلاقات المؤشرية..... 70
2.9 المقارنة التكاملية بين المؤشرات الأربعة(NDVI, NDBI, SAVI, UHI) 71
2.9.1 التحليل المنهجي لكل مؤشر وفق لخصائصه..... 71
2.9.2 العلاقة التفاعلية بين المؤشرات..... 72
2.9.3 الجداول التحليلية لتوزيع المؤشرات 72
2.9.4 التكامل المؤشري لدعم القرار التخطيطي..... 73
2.10 التحديات الأكاديمية والمنهجية في استخدام المؤشرات 73
2.10.1 التأثير الزماني(Temporal Influence) 73
2.10.2 تأثير الدقة المكانية والطيفية..... 74
2.10.3 تحديات التكامل المؤشري 75

2.10.4 التحديات التقنية والمنهجية.....75
2.11 مستقبل المؤشرات المكانية في التحليل الحضري 75
2.11.1المؤشرات الهجينة(Hybrid Indices) 75
2.11.2 دور الذكاء الاصطناعي في تطوير مؤشرات جديدة 76
2.11.3 دمج المؤشرات المكانية مع البيانات الاجتماعية والاقتصادية 77
2.12 المؤشرات ودعم القرار المكاني 78
2.12.1 المقدمة: من البيانات الخام إلى القرارات المدعومة بالخرائط.....79
2.12.2 الأساس النظري لدمج المؤشرات داخلSDSS 79
2.12.3 البنية التقنية لتكامل المؤشرات معSDSS 79
2.12.4 التكامل مع :GIS من المؤشر إلى الخريطة 80
2.12.5 تطبيقات عملية: من الحدائق إلى التخطيط المناخي.....80
2.12.6 المؤشرات في نماذج التنبؤ العمراني 81
2.12.7 دور الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي 82
2.12.8 التحديات والقيود الموسعة 83
2.12.9 الخلاصة التحليلية.....83
2.13 المؤشرات والأبعاد الاجتماعية.....83
2.13.1 المقدمة: من الجغرافيا المادية إلى العدالة الاجتماعية 83
2.13.2 الأساس النظري: العدالة المكانية والحق في المدينة.....83
2.13.3 المؤشرات الاجتماعية المرتبطة بالمؤشرات المكانية 84
2.13.4 أدوات الدمج بين المؤشرات البيئية والاجتماعية.....84
2.13.5 التطبيقات العملية: دراسات حالة حضرية.....85
2.13.6 مشاركة المجتمع المحلي في صياغة المؤشرات.....85
2.13.7 التحديات المنهجية والمؤسسية 85
2.13.8 الاتجاهات المستقبلية: نحو مؤشرات اجتماعية-مكانية ذكية 86
2.13.9 الخلاصة التحليلية.....86
جدول ملخّص: علاقة المؤشرات البيئية بالآثار الاجتماعية.....86
2.14 المؤشرات والأبعاد الاقتصادية 87
2.14.1 مدخل: البُعد الاقتصادي في المؤشرات المكانية 87
2.14.2 ربط المؤشرات البيئية بقيمة العقارات.....87
2.14.3 تقدير الفوائد الاقتصادية للخدمات البيئية 88

2.14.4 دعم الزراعة الحضرية والاقتصاد الدائري.....88
2.14.5 قياس التكلفة والفائدة للمشاريع الخضراء.....89
2.14.6 التحديات في دمج المؤشرات الاقتصادية.....89
جدول ملخّص: العلاقة بين المؤشرات المكانية والأبعاد الاقتصادية.....90
2.14.7 خلاصة 90
2.15 التحديات الأكاديمية والمنهجية في استخدام المؤشرات 90
2.15.1 مدخل عام 90
2.15.2 التحديات النظرية 91
2.15.3 التحديات المنهجية.....91
2.15.4 التحديات التفسيرية.....92
2.15.5 التحديات التقنية والعملية.....92
2.15.6 حلول مقترحة للتغلب على التحديات.....93
جدول ملخص للتحديات والمنهجيات المقترحة.....93
Error! Bookmark not defined. 2.15.7 خلاصة .....
2.16 التقنيات الحديثة لتحسين المؤشرات 94
2.16.1 مدخل عام 94
2.16.2 استخدام الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي.....94
2.16.3 الاستشعار متعدد الأطياف والفائق الدقة.....94
2.16.4 دمج البيانات الفضائية والطائرات المسيّرة(UAVs) 95
2.16.5 أدوات المعالجة السحابية(Cloud Processing) 95
.2.16.6 التكامل بين التقنيات الحديثة والمؤشرات.....96
جدول: مقارنة بين التقنيات الحديثة في تحسين المؤشرات 96
Error! Bookmark not defined. 2.16.7 خلاصة .....
2.18 المؤشرات الاستدامة البيئية والتخطيط الحضري.....96
2.18.1 المؤشرات البيئية 97
2.18.2 المؤشرات الاجتماعية.....97
2.18.3 المؤشرات الاقتصادية.....97
2.18.4 الربط بين المؤشرات لتقييم شامل 98
2.19 المؤشرات التكاملية لدعم التنمية الحضرية المستدامة 98
2.19.1 تعريف المؤشرات التكاملية 98

2.19.2 مكونات المؤشرات التكاملية 99
2.19.3 منهجية إنشاء المؤشرات التكاملية.....99
2.19.4 تطبيقات المؤشرات التكاملية.....99
2.19.5مزايا المؤشرات التكاملية.....100
2.19.6 التحديات المرتبطة بالمؤشرات التكاملية 100
2.19.7 الخلاصة.....**Error! Bookmark not defined.**
2.20 الدراسات المقارنة والتكاملية 100
2.20.1 أهمية الدراسات المقارنة.....100
2.20.2 مقارنة المدن النامية والمتقدمة.....101
2.20.3 تقييم المؤشرات في السياقات العربية.....101
2.20.4 مؤشرات الرصد المستدام(Long-term Monitoring Indicators) 102
2.20.5 الخلاصة.....**Error! Bookmark not defined.**
2.21 مستقبل المؤشرات المكانية 103
2.21.1المؤشرات الهجينة(Hybrid Indices) 103
2.21.2 دور الذكاء الاصطناعي في تطوير المؤشرات.....103
2.21.3 دمج المؤشرات مع البيانات الاجتماعية والاقتصادية 103
2.21.4 مؤشرات ذكية للتخطيط الحضري(Smart City Indicators) 104
2.21.5 التحديات المستقبلية للمؤشرات المكانية 104
2.22الخلاصة النقدية للفصل.....105
2.22.1 من المؤشرات الطيفية إلى أدوات التخطيط الحضري المستدام.....105
2.22.2 التحديات والقيود الحالية 105
2.22.3 الإمكانيات المستقبلية 106
2.22.4 التوصيات لتطوير المؤشرات المستقبلية 107
2.22.5 الخلاصة النهائية 107
الفصل الثالث: دراسات الحالة.....108
3.1 التمهيد حول اختيار مدينة مشهد (Mashhad) الإيرانية كحالة عالمية للمقارنة مع دمشق.....108
3.1.1 أهمية دراسات الحالات العالمية في بحوث التخطيط الحضري 108
3.1.2 دوافع اختيار مشهد كمرجع لمقارنة دمشق 108
3.1.3 القيمة العلمية والمنهجية لدراسة مشهد بالنسبة لبحث دمشق 109
3.1.5 كيف يُثري إدراج مشهد فصل دراسات الحالة 110

3.2 منطقة الدراسة 111
3.3 المنهجية 111
3.3.1 .بيانات الاستشعار عن بعد، المعالجة المسبقة للصور وحساب درجة حرارة سطح الأرض(LST) 111
3.3.2 تصنيف الغطاء الأرضي..... 112
3.3.3 مؤشر NDVI ومؤشر:NDBI 113
3.4 النتائج والمناقشة 113
3.4.1 خرائط الغطاء الأرضي..... 113
3.4.2 التوزيع المكاني والزماني لدرجة حرارة سطح الأرض(LST) 115
3.4.3 العلاقة بين درجة حرارة سطح الأرض (LST) وأنواع الغطاء الأرضي(LC) 116
3.4.4 الآثار المترتبة على النتائج 122
3.5 الاستنتاجات 123
3.6 الدروس المستفادة وقابلية التطبيق على دمشق 124
3.7 المنهجية المقترحة لدراسة الجزيرة الحرارية الحضرية في دمشق..... 125
3.8 استراتيجيات التخفيف المحتملة لدمشق 125
3.9 مقدّمة الدراسة العالمية الثانية (إيطاليا) واختيارها كحالة مقارنة..... 126
3.10 دراسة الحالة العالمية: تطبيقات نظم دعم القرار المكاني متعدد المعايير في التنمية الإقليمية (إيطاليا نموذجاً) ..127
3.10.1مسوّغات اختيار دراسة الحالة الإيطالية وأهميتها البحثية..... 127
3.10.2الإطار النظري والتطبيقي لنظم دعم القرار المكاني متعدد المعايير ومنهجية(ANP) 128
3.10.3 استعراض وتحليل تطبيقات البحث الإيطالي(Ferretti & Lombardi) 129
3.11 تحليل أوجه التشابه والاختلاف بين الإطار المنهجي الإيطالي والسياق التخطيطي السوري 130
3.11.1 أوجه التشابه المنهجية: توظيف تحليل الصور الزمانية في رصد التغيرات..... 131
3.11.2 أوجه الاختلاف الرئيسية والتحديات البنيوية في نقل التجربة..... 132
3.12 التوصيات لتكييف نموذج SDSS في التخطيط الإقليمي السوري 133
3.12.1 منظور مقترح لنموذج (ANP-SDSS) يتناسب مع متطلبات التعافي في المدن السورية..... 133
3.13 دمج نظم المعلومات الجغرافية وعملية الشبكة التحليلية(ANP) 134
3.13.1الابتكار في استخدام عملية الشبكة التحليلية(ANP) 134
3.13.2آلية التكامل المكاني بين ANP وGIS 134
3.14دراسة الحالة A: تحليل ملاءمة الأراضي للممرات الإيكولوجية في بييمونتي 135
3.14.1تفاصيل الأهداف والإجراءات المنجزة..... 135
3.14.2النتائج والدروس المستفادة..... 138

3.14.3تعزيز الرسالة: التكييف مع تحديد المواقع المثلى لإعادة التوطين.....138
3.15دراسة الحالة B: استكشاف الفرص ونقاط الضعف في الأنظمة الإقليمية المعقدة(Ormea) 139
.3.15.1تفاصيل الأهداف والإجراءات المنجزة.....139
3.15.2الإعداد(Setting) 139
3.15.3المنهجية(Methods) 140
3.15.4النتائج والدروس المستفادة(Results and Lessons Learned) 141
3.15.5تعزيز الرسالة: التكييف مع التخطيط الاستراتيجي ما بعد النزاع 142
3.16 الخاتمة.....142
3.16.1الإسقاط على الحالة السورية.....143
خاتمة .....Error! Bookmark not defined.
التحليل المقارن للتجارب العالمية وتطبيقاتها على حالة دمشق.....144
تمهيد 144
مقارنة في المنهجية والمداخل النظرية 144
أوجه التشابه 145
أوجه الاختلاف.....145
الملخّص المقارن 145
الدروس المستفادة من التجربتين.....146
إمكانيات التطبيق على الحالة السورية.....147
الباب الثاني: الإطار التطبيقي 147
الفصل الرابع : أداة التحليل الزماني المكاني التمهيد: من الإطار النظري إلى التطبيق العملي.....147
4.1 المقدمة العامة للفصل 148
4.2 الأسس النظرية لبناء نظام التحليل الزمكاني 149
4.2.1الخلفية المفاهيمية للنظام 149
4.2.2التأصيل العلمي لتصميمDURIS 149
4.3 الإطار المنهجي للنظام.....150
4.3.1 مصادر البيانات الفضائية.....151
معايير اختيار الصور.....151
4.4 المنهجية التحليلية للمنصة المكانية ونظام دعم القرار 152
(Spatial Dashboard & SDSS) 152
4.4.1 المقدمة 152

4.4.2 المرحلة الأولى: مدخلات البيانات الفضائية 152
4.4.3 المرحلة الثانية: التحليل الزمني والمكاني 153
4.4.4 المرحلة الثالثة: بناء المؤشرات المركبة والترشيح 153
تطبيع القيم وتحويلها إلى مقياس موحد(Normalization) 153
4.4.5 المرحلة الرابعة: تحديد الأولويات واتخاذ القرار 153
4.4.6 القيمة الأكاديمية والمنهجية للنموذج 154
5. الفصل الخامس: 155
تطوير مؤشر أولوية إعادة التأهيل (RPI) ضمن بيئة اتخاذ القرار المكاني المتكامل 155
مقدمة: 155
5.1 أهمية الفصل ضمن الأطروحة 155
5.2 مكونات مؤشر أولوية إعادة التأهيل(RPI) 156
5.2.1 المعايير المستخدمة 157
5.2.2 الدرجات الموحدة للمعايير 157
5.2.3 الأوزان المخصصة لكل معيار 158
5.2.4 حساب درجة الأولوية النهائية 159
5.3 أهمية مؤشرRPI 159
5.4 سيناريوهات استخدام مؤشر أولوية إعادة التأهيل(RPI) 159
5.4.1 السيناريو الأول: البنية التحتية الخضراء(Green Infrastructure Priority) 160
5.4.2 السيناريو الثاني: الراحة الحرارية(Thermal Comfort) 160
5.4.3 السيناريو الثالث: النهج المتوازن(Balanced Approach) 161
5.4.4 مخرجات السيناريوهات 161
5.5 التحقق الميداني ومصداقية النتائج 161
5.5.1 أهمية المؤشر في السياق السوري 162
5.5.2 منهجية تعزيز مصداقية النتائج 162
5.5.3 الفوائد الاستراتيجية للنهج المعتمد 162
5.6 إمكانيات التوسع والتطوير المستقبلي 163
5.6.1 إضافة مؤشرات اجتماعية 163
5.6.2 إضافة مؤشرات اقتصادية 163
5.6.3 استخدام تقنيات متقدمة لتحديد الأوزان 163
5.6.4 دمج البيانات الحديثة 163

5.6.5الفوائد الاستراتيجية لتوسيع المؤشر 164
5.7 التطبيق العملي في بيئة نظم المعلومات الجغرافية(GIS) 164
5.7.1 تحضير البيانات المكانية 164
5.7.2 توحيد قيم المعايير(Normalization) 165
5.7.3 إدخال الأوزان لكل معيار 165
5.7.4 التراكب الموزون وحساب RPI النهائي 165
5.7.5 تصنيف النتائج وعرض الخرائط 166
5.7.6 خطوات العملية العملية باختصار 166
5.8 التوصيات والتكامل مع التخطيط الحضري 166
5.8.1 أهمية استخدام الخرائط الناتجة في التخطيط الحضري 166
5.8.2 الربط بين RPI والمؤشرات البيئية الأخرى 167
5.8.3 استخدام المؤشر لتحديد أولويات إعادة التأهيل 167
5.8.4 دمج RPI في أدوات التخطيط الحضري 167
5.8.5 توصيات عملية لصناع القرار في السياق السوري 168
5.8.6 خلاصة التوصيات 168
الفصل السادس: مدينة دمشق كحالة إسقاطية 169
نظرة تمهيدية 169
6.1 النطاق الزماني 169
6.1.1 الفترة الأولى: 15 آب/أغسطس 2011 169
6.2 النطاق المكاني (مدينة دمشق) 170
6.3 النشأة والتطور المبكّر للمدينة 171
6.3.1 المخططات التنظيمية في أوائل القرن العشرين: إيكوشار ودانجيه 171
6.4 السياق الحضري والبيئي لمدينة دمشق 172
6.4.1 التطور التاريخي والتخطيط الحديث 172
6.4.2 مخطط ايكوشار 1968: 173
التنظيم الحديث للمدينة (وتدهور بعض المناطق الحضرية): 173
6.4.3 التوسع العمراني وتدهور الغوطة 174
6.4.3.1 التحولات البيئية بين 2011 و2025 175
6.5 الخصوصية البيئية والحضرية للحالة الدمشقية 175
6.6 المنهجية المعتمدة في الدراسة 176

6.6.1استخراج المؤشرات البيئية(NDVI – LST – NDBI) 177
أولاً : نتائج مؤشرNDVI 178
الملاحظات العامة:..... 178
ثانياً : نتائج مؤشرUHI..... 179
ثالثاً: نتائج مؤشرNDBI..... 180
الملاحظات العامة:..... 180
6.2.2إنتاج الخرائط وطبقات التمايز الزمني(Differentiation Layers) 181
ثانياً: نتائج خرائط الاختلاف والملاحظات الأولية..... 182
المناطق المرجحة,وعوامل التصفية..... 182
منهجية بناء عوامل التصفية..... 183
عامل الاستبعاد(Exclusion Factor) 184
عامل الإضافة(Inclusion Factor) 185
القيمة العلمية لعوامل التصفية..... 186
تحديد القيم التحليلية لكل منطقة لعام 2025 186
النتائج التفصيلية للمناطق المرجحة 187
تطبيع القيم وتحويلها إلى مقياس موحد(Normalization) 187
معادلة الأرقام وتوحيد عملية القياس..... 187
تحليل النتائج وتفسيرها : 188
1. تحليل مؤشر NDVI الغطاء النباتي 188
.2 تحليل مؤشرUHI الجزيرة الحرارية الحضرية 189
3. تحليل مؤشر NDBI مؤشر البناء الحضري 190
4. الاستنتاج العام..... 191
التحليل النهائي وتحديد الأولويات (Final RPI Calculation & Prioritization)..... 192
نتائج مؤشر RPI للمناطق المرجحة لعام 2025 وفقاً للسيناريوهات: 192
السيناريو الثاني: الراحة الحرارية(Thermal Comfort) 194
السيناريو الثالث: النهج المتوازن(Balanced Approach) 195
ملخص مقارن نهائي للنتائج وترتيب الأولويات 196
الاستنتاج العام للتحليل 196
الفصل السابع: تحليل النتائج والتوصيات..... 197
7.1 تحليل النتائج العامة..... 197

7.2 الأثر الكمي لتحويل مطار المزة إلى رئة خضراء.....197
أولاً: المعطيات الحسابية الأساسية 197
ثانياً: معادلة التغيير في NDVI العام للمدينة 197
ثالثاً: النتائج العددية 198
تحليل النتائج 198
7.3 التفسير البيئي والمكاني للنتائج 199
7.4 التحليل المقارن لخيارات التدخل.....199
7.5 التوصيات النهائية 200
7.6 الخلاصة التحليلية.....200
الخاتمة 201
المراجع 203
أولاً: المراجع العربية 203
ثانياً: المراجع الأجنبية:.....204
ثالثاً: مراجع إلكترونية ومصادر بيانات 207

فهرس الجداول:

جدول1 المقارنة بين NDVI ومؤشرات الغطاء النباتي الأخرى 58
جدول 2 التحليل الزمني للمؤشر NDVI – قياس الباحث 59
جدول 3: وصف الغطاء النباتي والوظائف البيئية ضمن بيئة NDVI – Landsat Archives 60
جدول 4 توزيع NDVI في الحيز الحضري – Landsat Archives 60
جدول 5 على جدول ربط NDVI مع قيمة العقارات.....60
جدول 6 التحليل التكميلي ل NDBI مع مؤشرات أخرى 63
جدول 7 متوسط NDBI حسب نوع المنطقة 63
جدول 8 جدول مقارنة SAVI مع NDVI وNDBI 66
جدول 9: الجداول التحليلية لتوزيع SAVI 66
جدول 10: تحليل العوامل المؤثرة على شدة UHI.....69
جدول 11المؤشرات وعلاقتها بـ UHI.....70
جدول 12 : توزيع NDVI وSAVI – عمل الباحث.....72
جدول 13: توزيع NDBI وUHI – عمل الباحث بالعودة ل Landsat Manual 73
جدول 14: التأثير الزماني لكل مؤشر.....74
جدول 15: جدول تأثير الدقة للمؤشرات الأساسية 75
جدول 16: جدول ملخّص: علاقة المؤشرات البيئية بالآثار الاجتماعية.....87
جدول 17: العلاقة بين المؤشرات المكانية والأبعاد الاقتصادية.....90

جدول 18: ملخص للتحديات والمنهجيات المقترحة.....93
جدول 19: مقارنة بين التقنيات الحديثة في تحسين المؤشرات.....96
جدول 20: تصنيف المؤشرات وفق أبعاد الاستدامة في التخطيط الحضري 98
جدول 21: مثال لمؤشر استدامة حضرية مركب (Composite Sustainability Index).....100
جدول 22: مقارنة بين المؤشرات في المدن النامية والمتقدمة.....102
جدول 23: مقارنة بين المؤشرات التقليدية والذكية 104
جدول 24: مراجعة الأدبيات العالمية حول ظاهرة الجزيرة الحرارية الحضرية (UHI) 110
جدول 25: تفاصيل حساب LST و NDVI و NDBI في الأعوام 1988 و 2001 و 2017.....117
جدول 26: تفاصيل نموذج الانحدار الخطي المتعدد. 119
جدول 27: ارتباط علاقات NDVI-LST و NDBI-LST في دراسات حالة سابقة ضمن فئات مناخية مختلفة.....121
جدول 28: وصف رموز نظام تصنيف كوبن المناخي.....122
جدول 29: الأولويات النهائية للعوامل الناتجة عن التقييم باستخدام عملية الشبكات التحليلية (ANP).....138
جدول 30: القنوات الطيفية المولدة لبيانات المؤشرات المدروسة 151
جدول 31: مثال توضيحي للسيناريو الخاص بالبنية التحتية الخضراء 159
جدول 32: الأوزان المخصصة للمعايير ضمن السيناريو الأول.....160
جدول 33: الأوزان المخصصة للمعايير ضمن السيناريو الثاني.....160
جدول 34: الأوزان المخصصة للمعايير ضمن السيناريو الثالث.....161
جدول 35: النتائج التفصيلية للمناطق المرجحة 187
جدول 36: قيم مؤشر NDVI شاملة القيم بعد عملية المعادلة والعكس 188
جدول 37: : قيم مؤشر LST شاملة القيم بعد عملية المعادلة.....190
جدول 38: قيم مؤشر NDBI شاملة القيم بعد عملية المعادلة.....191
جدول 39: نتائج مؤشر RPI للمناطق المرجحة لعام 2025 وفقاً للسيناريو الأول.....193
جدول 40: : نتائج مؤشر RPI للمناطق المرجحة لعام 2025 وفقاً للسيناريو الثاني 194
جدول 41: : نتائج مؤشر RPI للمناطق المرجحة لعام 2025 وفقاً للسيناريو الثالث 195
جدول 42: نتائج مؤشر RPI والترتيب النهائي لكل منطقة عبر السيناريوهات الثلاثة 196

فهرس الأشكال:

رسم توضيحي 1: مثال يوضح خريطة المخاطر 39
رسم توضيحي 2: مثال يوضح خريطة الأولويات للمواقع الأكثر ملائمة.....39
رسم توضيحي 4: صورة قمر صناعية لجمهورية إيران عمل الباحث 108
رسم توضيحي 5: موقع مدينة مشهد 111
رسم توضيحي 6: الدقة الإجمالية ومعامل كابا لتصنيف الغطاء الأرضي.....112
رسم توضيحي 7: التوزيع المكاني للمناطق المشيدة والغطاء النباتي خلال فترة الدراسة 114
رسم توضيحي 8: الأراضي الحضرية والغطاء النباتي في الأعوام 1988 و 2001 و 2017 114
رسم توضيحي 9:. تغيرات الأراضي الحضرية والغطاء النباتي في منطقة الدراسة.....115
رسم توضيحي 10: درجة حرارة سطح الأرض (LST) 116
رسم توضيحي 11:مخططات الانتشار ثنائية وثلاثية الأبعاد لعلاقات NDBI-LST و NDVI-LST. 118
رسم توضيحي 12:. التصنيف الكمي للأعمال السابقة التي تدرس علاقات NDVI-LST و NDBI-LST. 119
رسم توضيحي 13: صورة قمر صناعي توضح خارطة إيطاليا - عمل الباحث.....127
رسم توضيحي 14: عناقيد الهيكل الشبكي.....129

رسم توضيحي 15: خارطة عناصر نموذج ANP.....135
رسم توضيحي 16: الخرائط الموحّدة لجميع المعايير المعتمدة في النموذج 137
رسم توضيحي 17: نموذج القرار وفق ANP، مع التركيز على الشبكة الفرعية الخاصة بالفرص.....140
رسم توضيحي 18: التوزيع العام للفرص (أ) والمخاطر / نقاط الضعف (ب) في المنطقة قيد التحليل.....142
رسم توضيحي 19: الحدود الإدارية لمدينة دمشق - عمل الباحث 169
رسم توضيحي 20: جوار وتخوم مدينة دمشق - عمل الباحث.....170
رسم توضيحي 21مخطط مدينة دمشق للمخطط الفرنسي دانجيه 1936.....172
رسم توضيحي 22: مقترح مخطط دمشق لشركة خطيب وعلمي 2010.....174
رسم توضيحي 23: مخطط المناطق الخضراء في دمشق – المصور العام لدمشق ومحيطها الحيوي.....176
رسم توضيحي 24: خطوات ومراحل عمل الأداة التحليلية المقترحة - عمل الباحث 177
رسم توضيحي 25: المخططات التحليلية لمؤشر NDVI ضمن العامين المرجعيين مع خريطة الفوارق 178
رسم توضيحي 26: : النتيجة الكمية لمؤشر NDVI لمدينة دمشق ورصد تغيراته.....178
رسم توضيحي 27: النتيجة الكمية لمؤشر UHI لمدينة دمشق- عمل الباحث.....179
رسم توضيحي 28: المخططات التحليلية لمؤشر UHI-LST ضمن العامين المرجعيين مع خريطة الفوارق 179
رسم توضيحي 29: النتيجة الكمية لمؤشر NDBI لمدينة دمشق وازديادها 180
رسم توضيحي 30: : المخططات التحليلية لمؤشر NDBI ضمن العامين المرجعيين مع خريطة الفوارق- عمل الباحث.180
رسم توضيحي 31: طبقات التمايز الزمني ضمن الفترتين المرجعيتين في جميع المؤشرات- عمل الباحث 181
رسم توضيحي 32:خريطة نتائج الملاحظات الأولية لنتائج التحليل التفاضلي- عمل الباحث.....182
رسم توضيحي 33: الملاحظات الأولية لنتائج التحليل التفاضلي مع عوامل التصفية- عمل الباحث.....183
رسم توضيحي 34: الشرائح الرياضية المعنية ضمن تراجع مؤشر NDVI - عمل الباحث 185
رسم توضيحي 35: حدود مطار المزة العسكري - عمل الباحث.....185
رسم توضيحي 36: خريطة المناطق الأكثر تأثرا ضمن حدود مدينة دمشقْ - عمل الباحث.....186
رسم توضيحي 37: مخطط قيم NDVI قبل وبعد المعادلة مع القيم النهائية للمناطق المدروسة 188
رسم توضيحي 38: قيم مؤشر LST شاملة القيم بعد عملية المعادلة.....190
رسم توضيحي 39: قيم مؤشر NDBI بعد عملية المعادلة.....191
رسم توضيحي 40: توضيح قيم الشرائح المدروسة النهائية وفقاً لكل سيناريو.....192
رسم توضيحي 41: خريطة ترتيب نتائج السيناريو الأول وفقاً لموقع كل شريحة.....193
رسم توضيحي 42: خريطة ترتيب نتائج السيناريو الثاني وفقاً لموقع كل شريحة 194
رسم توضيحي43 : خريطة ترتيب نتائج السيناريو الثالث وفقاً لموقع كل شريحة 195
رسم توضيحي 44: حدود مطار المزة العسكري - عمل الباحث.....196
رسم توضيحي 45: تصور محاكاة تحويل مطار المزة العسكري لرئة خضراء لمدينة دمشق -عمل الباحث 198
رسم توضيحي 46: : تصور محاكاة تحويل مطار المزة العسكري لرئة خضراء لمدينة دمشق ضمن السياق.....199

ملخص البحث

تسعى هذه الأطروحة إلى تطوير **منهجية جيومكانية متعددة المعايير** لتقييم وجدولة أولويات **إعادة تأهيل الأراضي الحضرية المتروكة** في مدينة دمشق، بوصفها أحد أهم الموارد المكانية المهملة القادرة على إعادة بناء النسيج البيئي والاجتماعي للمدينة في سياق ما بعد الأزمات.

ينطلق البحث من التحوّل البنيوي الذي يشهده الفكر التخطيطي المعاصر نحو **التخطيط القائم على الأدلة والتحليل المكاني الديناميكي**، متجاوزًا المقاربات التقليدية التي تعاملت مع الأراضي المتروكة كفراغات هامشية أو مشكلات بصرية. وبدلاً من ذلك، يقترح إطارًا علميًا يرى في هذه الأراضي **»جروحاً حضرية» قابلة للشفاء**، يمكن أن تتحول إلى عناصر وظيفية في منظومة **البنية التحتية الخضراء** تسهم في تعزيز مرونة المدينة واستدامتها البيئية والاجتماعية.

تعتمد الأطروحة على دمج أدوات **الاستشعار عن بعد (Remote Sensing) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)** في إطار **نظم دعم القرار المكاني (SDSS)** لتشييد قاعدة معرفية كمية وموضوعية، تسمح برصد التحولات الزمنية والبيئية للنسيج العمراني.

تم توظيف بيانات الأقمار الصناعية مفتوحة المصدر Landsat) و (Sentinelعبر منصة **Google Earth Engine** لمعالجة وتحليل مؤشرات بيئية رئيسية هي :**مؤشر الغطاء النباتي المعياري(NDVI) ، ومؤشر البناء المعياري(NDBI) ، ومؤشر الجزر الحرارية الحضرية(UHI)** ، وذلك لرصد ديناميكيات التدهور البيئي في المدينة بين عامي **2011و2025**.

ومن خلال عمليات **التطبيع والتحليل الزمني المكاني**، جرى دمج هذه المؤشرات في نموذج **التقييم متعدد المعايير (MCE)** لتطوير **مؤشر أولوية إعادة التأهيل(RPI)** ، الذي يُعدّ ابتكارًا منهجيًا جديدًا في مجال التخطيط البيئي الحضري في السياق السوري.

يُنتج المؤشر المقترح خريطة مكانية صريحة (**Spatially Explicit Map**) تحدد المواقع الأكثر حاجة وأعلى أولوية لإعادة التأهيل، عبر ثلاثة سيناريوهات تخطيطية لتبتت نتائج التحليل فعالية المنهجية في تجاوز قيود **البيئات محدودة البيانات-Data) (Scarce Environments**التي تميز السياق السوري، حيث تمكّن النموذج من الكشف عن أنماط تدهور دقيقة ومناطق ارتفعت فيها درجة الحرارة السطحية أو تراجع فيها الغطاء النباتي، وهو ما لم يكن ممكنًا عبر الأدوات التقليدية.

وأظهرت النتائج أنّ تحويل بعض المناطق ذات الأولوية – وعلى رأسها **مطار المزة العسكري** –إلى **رئة خضراء حضرية** يمكن أن يرفع المتوسط العام لمؤشر الغطاء النباتي (NDVI) للمدينة من قيمة منخفضة عام 2011 إلى مستويات أعلى في عام 2025، بما يعادل تحسّنًا كمّيًا مؤثرًا يترافق مع انخفاض في متوسط درجات الحرارة السطحية الحضرية(LST) ، مما يؤكد الأثر الإيجابي المتوقع لمشروعات البنية التحتية الخضراء على المناخ المحلي وجودة الحياة.

تنبع أهمية هذه الأطروحة من قيمتها **العلمية والمنهجية المزدوجة؛** فهي من جهةٍ تقدّم نموذجًا علميًا متكاملاً للتقييم المكاني يمكن تطبيقه في مدن نامية أو متأثرة بالأزمات، ومن جهة أخرى تُسهم في إثراء الفكر التخطيطي السوري من خلال إدخال مفهوم **»التحليل الجيومكاني للتعافي الحضري** «كأداة لتوجيه قرارات التخطيط والإعمار نحو مشاريع ذات عائد بيئي واجتماعي مثبت

كمياً.

كما تمثّل المنهجية المقترحة خطوة تأسيسية نحو بناء **أنظمة دعم قرار وطنية** قادرة على توظيف البيانات مفتوحة المصدر في تقييم العدالة المكانية وتوزيع الفرص البيئية، بما يربط بين العلم، والسياسة، والتخطيط في إطار مستدام وعادل.

إن القيمة المضافة الجوهرية لهذه الدراسة تكمن في قدرتها على تحويل **البيانات الفضائية إلى معرفة تخطيطية قابلة للتطبيق،** وإعادة تعريف الأراضي المتروكة كعناصر فاعلة في عملية التعافي الحضري. وبهذا، لا تكتفي الأطروحة بتقديم نموذج تحليلي فحسب، بل تطرح رؤية استراتيجية لدمشق المستقبل: مدينة تتعافى بيئياً واجتماعياً عبر أدوات العلم، وتحوّل ندوبها المكانية إلى **شبكة خضراء نابضة بالحياة،** تُجسّد العدالة المكانية في أبهى صورها، وتُرسي أسس تخطيط مستدام قائم على الأدلة والإنصاف.

الكلمات المفتاحية:

1. **المنهجية الجيومكانية متعددة المعايير:(Geo-spatial Multi-Criteria Methodology)**
منهجية تحليلية متقدمة تقوم على دمج البيانات المكانية المستخلصة من تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية مع أدوات اتخاذ القرار متعدد المعايير(MCE) ، بهدف تقييم الأراضي الحضرية وتحليل أولويات إعادة تأهيلها وفق معايير كمية وبيئية متداخلة.

2. **الأراضي الحضرية المتروكة:(Derelict Urban Lands)**
مساحات داخل النسيج العمراني فقدت دورها الوظيفي والاجتماعي نتيجة التدهور أو النزاع أو التحول الاقتصادي. تعتبرها الأطروحة فرصًا لإعادة إنتاج التوازن البيئي والاجتماعي من خلال دمجها ضمن منظومة البنية التحتية الخضراء.

3. **الاستشعار عن بعد:(Remote Sensing)**
تقنية علمية لجمع وتحليل بيانات سطح الأرض باستخدام الأقمار الصناعية دون تلامس مباشر. مكّنت الدراسة من رصد التغيرات الزمنية في الغطاء النباتي والبناء الحضري ودرجات الحرارة السطحية ضمن فترة زمنية محددة.(2011–2025)

4. **نظم المعلومات الجغرافية:(Geographic Information Systems - GIS)**
نظام متكامل لتحليل وإدارة البيانات المكانية وربطها بالبيانات الوصفية لإنتاج خرائط كمية تحليلية. استُخدم لتطبيق نموذج التقييم متعدد المعايير وإنتاج خرائط أولويات إعادة التأهيل.

5. **نظم دعم القرار المكاني:(Spatial Decision Support Systems - SDSS)**
أطر تحليلية تجمع بين نظم المعلومات الجغرافية ونماذج اتخاذ القرار، لتقديم دعم علمي وموضوعي لصنّاع القرار في التخطيط العمراني والبيئي. اعتمدتها الدراسة كأساس لبناء مؤشرات كمية تستند إلى الأدلة.

6. **البيانات مفتوحة المصدر:(Open-Source Data)**
بيانات جغرافية أو بيئية متاحة مجانًا من مصادر دولية مثلGoogle Earth Engine ، Landsat، و .Sentinelتمثل ركيزة أساسية للبحث، إذ مكّنت من تجاوز مشكلة ندرة البيانات الميدانية، وساهمت في

بناء نموذج تحليلي قابل للتكرار في بيئات مشابهة.

7. **الإطار القائم على الأدلة:(Evidence-Based Framework)**
نهج علمي يربط بين التحليل الكمي والقرارات التخطيطية عبر بيانات قابلة للقياس والتحقق. يُستخدم هذا الإطار في الأطروحة لتوجيه قرارات إعادة التأهيل البيئي والعمراني استنادًا إلى نتائج منهجية وموضوعية، وليس إلى التقديرات أو الممارسات الحدسية.

8. **البيئات محدودة البيانات:(Data-Scarce Environments)**
سياقات مكانية تعاني من ضعف أو غياب البيانات الموثوقة اللازمة لاتخاذ القرار التخطيطي. تمثل الحالة السورية نموذجًا لهذا النوع من البيئات، وقد نجحت الأطروحة في تجاوز هذا القيد عبر الاعتماد على بيانات مفتوحة المصدر وتقنيات التحليل الجيومكاني.

9. **التحليل الزماني المكاني:(Spatiotemporal Analysis)**
منهجية تحليلية تدرس التغيرات المكانية عبر الزمن، وتُستخدم في تقييم التحولات البيئية والحرارية والعمرانية. مكّن هذا التحليل من بناء رؤية ديناميكية لتطور النسيج الحضري في دمشق بين عامي 2011 و2025.

10. **الشفاء الحضري:(Urban Healing)**
مفهوم نظري جديد يعيد النظر في العلاقة بين العمران والبيئة، حيث يُنظر إلى الأراضي المتدهورة كـ«جروح حضرية» قابلة للشفاء عبر تدخلات تخطيطية خضراء تسهم في استعادة التوازن البيئي والاجتماعي للمدينة. يشكّل هذا المفهوم الإطار الرمزي والفلسفي الذي تقوم عليه رؤية الأطروحة لدمشق المستقبل.

11. **مؤشر الغطاء النباتي المعياري:(Normalized Difference Vegetation Index - NDVI)**
مؤشر يقيس كثافة الغطاء النباتي وصحته اعتمادًا على الانعكاسات الطيفية للأشعة الحمراء وتحت الحمراء القريبة. يُستخدم في تقييم جودة البيئة النباتية وتحديد المناطق القابلة للتحسين البيئي.

12. **مؤشر البناء المعياري:(Normalized Difference Built-up Index - NDBI)**
مؤشر يُستخدم لقياس درجة الكثافة العمرانية في المدن ورصد التمدد البنائي على حساب الغطاء النباتي.

يساعد في تحليل التغيرات العمرانية المرتبطة بالتحضر والتوسع غير المنضبط.

13. **مؤشر الجزر الحرارية الحضرية:(Urban Heat Island - UHI)**

مؤشر يقيس الفارق الحراري بين المناطق الحضرية والمناطق المحيطة بها، ويُعدّ أداة رئيسية في فهم العلاقة بين الأنشطة البشرية وتغيّر المناخ المحلي.

14. **مؤشر أولوية إعادة التأهيل:(Rehabilitation Priority Index - RPI)**

مؤشر مركّب طورته الأطروحة لقياس درجة الأولوية في تأهيل الأراضي المتروكة استنادًا إلى القيم المعيارية للمؤشرات البيئيةNDVI) ، NDBI، .(UHIيُعد ابتكارًا منهجيًا لدمج البيانات المكانية في عمليات اتخاذ القرار.

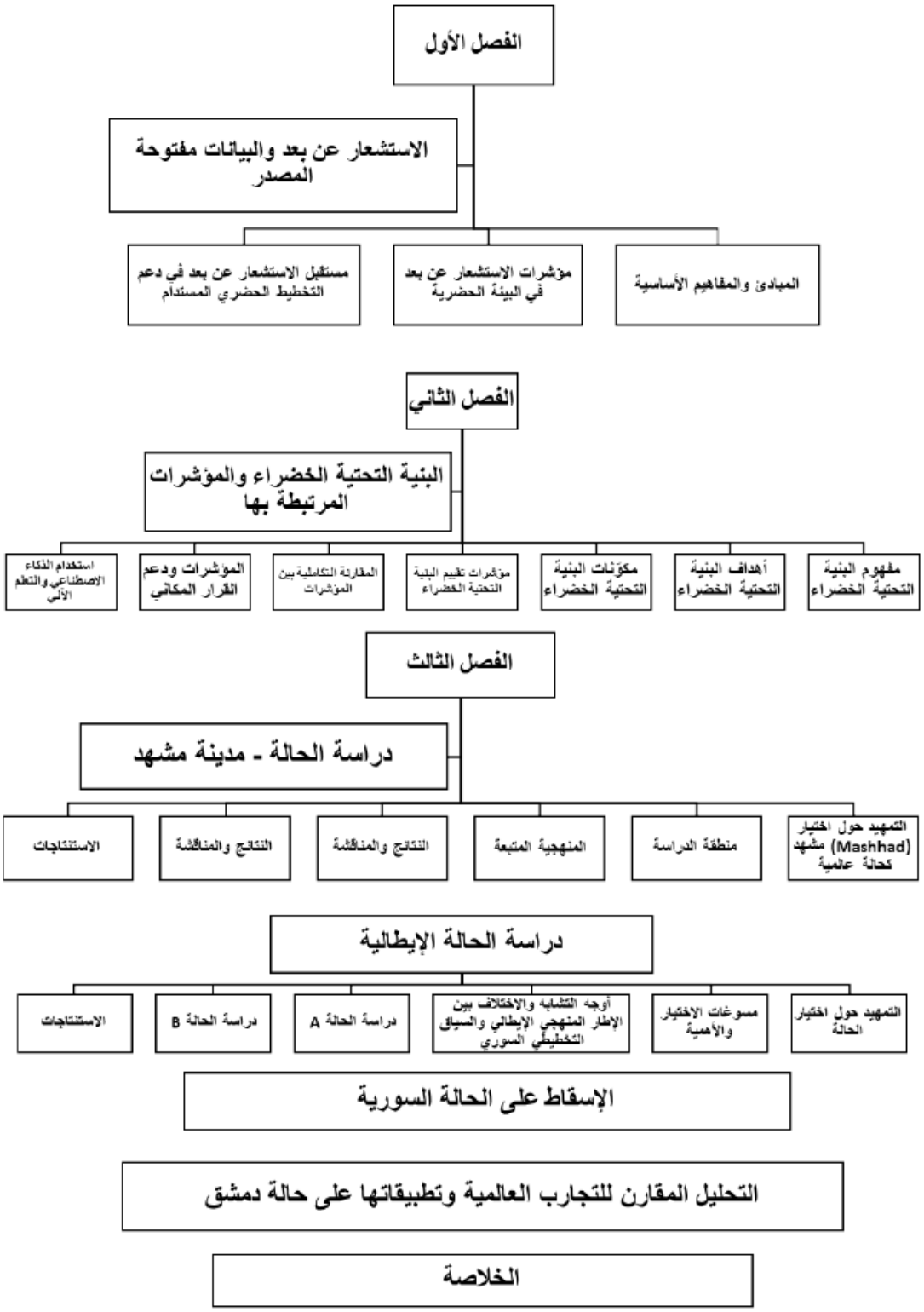
15. **البنية التحتية الخضراء:(Green Infrastructure)**

شبكة من المساحات الخضراء والمناطق المفتوحة والممرات البيئية التي تؤدي وظائف بيئية واقتصادية واجتماعية متكاملة. تُعدّ الإطار التنفيذي لترجمة مخرجات التحليل الجيومكاني إلى تدخلات عمرانية مستدامة.

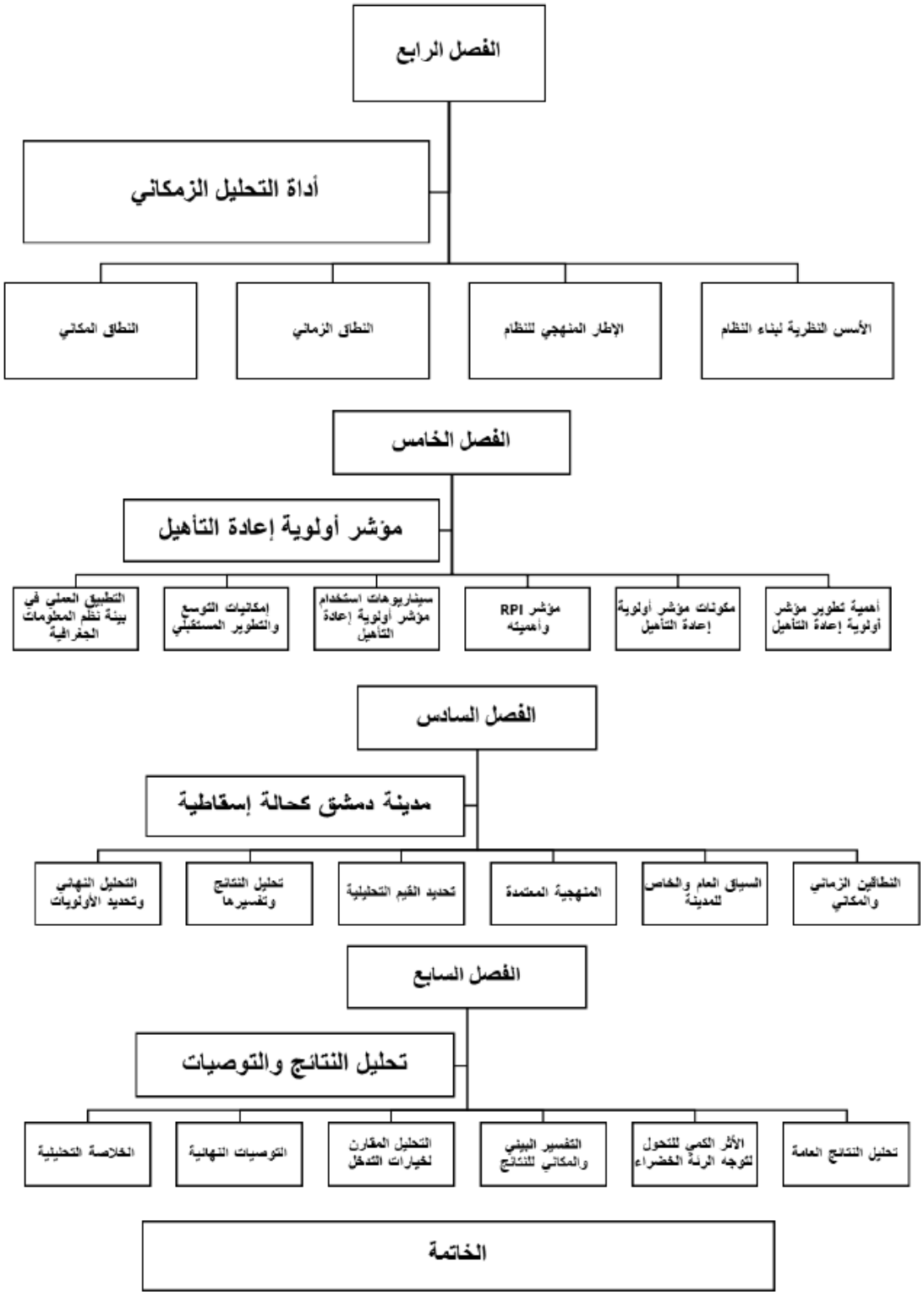
16. **العدالة المكانية:(Spatial Justice)**

مبدأ يضمن التوزيع المتكافئ للموارد والخدمات البيئية عبر المدينة. تُعدّ العدالة المكانية الركيزة القيمية التي يستند إليها الإطار التحليلي للأطروحة في توجيه إعادة الإعمار نحو تحقيق التوازن بين التنمية والبيئة.

مخطط البحث (الإطار النظري)



مخطط البحث (الإطار العملي التطبيقي)



الجزء التمهيدي: الإطار المنهجي للبحث

المقدمة

يشهد الفكر التخطيطي المعاصر تحولاً نموذجياً (**Paradigm Shift**) جوهرياً، حيث ينتقل التركيز من مجرد إدارة النمو الحضري إلى بناء مدن قادرة على الصمود والمرونة في مواجهة التحديات البيئية والاجتماعية المعقدة. في هذا السياق، لم تعد البنية التحتية الخضراء (**Green Infrastructure**) مجرد عنصر تجميلي يُضاف إلى النسيج العمراني، بل أصبحت تُعتبر إطاراً استراتيجياً حيوياً لتحقيق الاستدامة، وتعزيز الصحة العامة، وبناء رأس المال الاجتماعي، وخصوصاً في سياقات ما بعد الأزمات حيث تكون الحاجة إلى "الشفاء الحضري (**Urban Healing**) "في أوجها.

في قلب هذا التحول، تبرز ظاهرة "الأراضي المتروكة — (**Derelict Lands**) "وهي تلك الفراغات الحضرية التي نتجت عن تحولات اقتصادية، أو تغيرات ديموغرافية، أو كإرث للأزمات — كأحد أبرز التحديات والفرص في آن واحد. فهذه الأراضي، التي غالباً ما تكون مصدراً للتدهور البيئي وتفاقم العزل الاجتماعي، تشكل في الوقت ذاته المخزون المكاني الأكثر قيمة لتنفيذ تدخلات خضراء مؤثرة قادرة على بث حياة جديدة في شرايين المدينة

تقف مدينة دمشق، بتاريخها العريق ونسيجها العمراني الكثيف، عند مفترق طرق حاسم. فالمدينة تواجه ضغوطاً متزايدة تتطلب رؤية مستقبلية توازن بين متطلبات التنمية والحفاظ على جودة الحياة. تأتي هذه الأطروحة لتستجيب لهذه الحاجة، مقدمةً مقاربة علمية مبتكرة تتجاوز التخطيط التقليدي. فبدلاً من التعامل مع الأراضي المتروكة ككيانات منفصلة، يقدم هذا البحث إطار عمل جيومكاني متكامل لتشخيص هذه "الجروح" الحضرية، وتحديد أولويات علاجها، وتبرير الاستثمار في إعادة تأهيلها. بالاعتماد الكلي على البيانات مفتوحة المصدر (**Open-Source Data**) وتقنيات الاستشعار عن بعد المتقدمة، تسعى هذه الدراسة إلى تطوير أداة لدعم القرار تمكّن المخططين من تحويل هذه الأراضي من عبء حضري إلى أصول استراتيجية تساهم في بناء مستقبل أكثر استدامة وعدالة.

2. إشكالية البحث

تتجسد الإشكالية الرئيسية التي يعالجها هذا البحث في **غياب منهجية علمية منظمة وموضوعية (A Systematic and Objective Methodology) تمكّن المخططين وصناع القرار في مدينة دمشق من تحديد وجدولة أولويات إعادة تأهيل الأراضي المتروكة. في ظل محدودية الموارد المالية وندرة الأراضي الشاغرة، تصبح عملية اختيار المواقع للتدخلات الخضراء بالغة الأهمية. إن غياب إطار عمل قائم على الأدلة (Evidence-Based Framework) يجعل القرارات الحالية عرضة لأن تكون عشوائية أو مبنية على عوامل غير متكاملة، مما قد يؤدي إلى استثمار الموارد المحدودة في مشاريع لا تحقق الأثر البيئي والاجتماعي الأقصى، أو قد تفشل في معالجة المناطق الأكثر حاجة وتدهوراً، بل وقد تعمق من حالة الظلم البيئي القائمة** .[3]

تتفاقم هذه الإشكالية بسبب ندرة البيانات الاجتماعية والاقتصادية الدقيقة والمحدثة على المستوى المحلي في السياق السوري، وهو ما يُعرف في الأدبيات العلمية بـ "البيئات محدودة البيانات .(**Data-Scarce Environments**) "هذا القصور في البيانات يجعل من شبه المستحيل تطبيق نماذج التقييم التقليدية التي تعتمد على متغيرات ديموغرافية واقتصادية مفصلة.

---

3) Rydin, Y. (2010). The Purpose of Planning: Creating Sustainable Towns and Cities. Policy Press, p. 112.

وبالتالي، فإن المخططين يفتقرون إلى أداة قادرة على تجاوز هذا القيد عبر الاعتماد على مؤشرات بديلة (**Proxies**) مشتقة من بيانات الاستشعار عن بعد مفتوحة المصدر، ودمج التحليل التاريخي لتدهور الموقع مع إمكاناته المستقبلية في إطار قرار واحد متكامل.

3. تساؤلات البحث

بناءً على الإشكالية المطروحة، تسعى هذه الأطروحة للإجابة على التساؤلات التالية:

- **السؤال الرئيسي :**كيف يمكن تطوير وتطبيق إطار عمل جيومكاني، يعتمد على تحليل التغير الزمني للبيانات مفتوحة المصدر، لتصنيف وجدولة أولويات الأراضي المتروكة في دمشق من أجل إعادة تأهيلها كبنية تحتية خضراء ذات أثر بيئي واجتماعي مُثبت؟
- **الأسئلة الفرعية:**

1. كيف يمكن **لتحليل التغير الزمني (Spatiotemporal Analysis)** لمؤشرات الاستشعار عن بعد أن يحدد ويقيس كمياً ديناميكيات التدهور البيئي في النسيج الحضري لدمشق؟
2. ما هي المعايير الحاسمة التي يجب دمجها في نموذج **تقييم متعدد المعايير (MCE)** مصمم خصيصاً لتحديد أولويات إعادة تأهيل الأراضي المتروكة في سياق ما بعد الحقبة السورية الجديدة؟
3. كيف يمكن نمذجة الأثر المحتمل لسيناريوهات إعادة التأهيل بشكل كمي، لتوفير قاعدة أدلة قوية تدعم عملية اتخاذ القرار التخطيطي؟

4. أهداف البحث

يهدف هذا البحث بشكل أساسي إلى تصميم، وتطبيق، وتقييم أداة دعم قرار علمية قادرة على تحويل البيانات الخام إلى قرارات تخطيطية ذكية. وتتفرع من هذا الهدف الرئيسي الأهداف التالية:

1. تطوير **"محرك للتحليل البيئي الزماني-المكاني** :"استخدام الأداة البرمجية المطورة لقياس التغير الكمي في المؤشرات البيئية الرئيسية (الغطاء النباتي، الحرارة الحضرية، البيئة المبنية) عبر فترتين زمنيتين لإنتاج "خرائط تدهور" موضوعية.
2. بناء **"مؤشر أولوية إعادة التأهيل :(RPI)** "تصميم وتطبيق مؤشر متعدد المعايير يقوم بدمج خرائط التدهور المختلفة في درجة أولوية واحدة، مع الأخذ بعين الاعتبار سيناريوهات مختلفة للأوزان تعكس أولويات تخطيطية متنوعة.
3. **تحديد وجدولة المواقع ذات الأولوية** :تطبيق المؤشر (RPI) على مدينة دمشق لإنتاج قائمة مرتبة وخريطة مكانية صريحة (Spatially Explicit) بالمواقع الأكثر جدارة بالتدخل.
4. **تقييم الأثر المحتمل** :تطبيق "وحدة تقييم الأثر" على المواقع ذات الأولوية القصوى لتقدير الفوائد الكمية المتوقعة من إعادة تأهيلها.

5. أهمية البحث

تكمن أهمية هذا البحث في قيمته المزدوجة:

- **الأهمية العلمية :**يقدم البحث مساهمة منهجية في مجال التخطيط الحضري ودراسات الاستشعار عن بعد، من خلال تطوير إطار عمل متكامل يدمج بين تحليل التغير الزمني والتقييم متعدد المعايير. يمكن تكييف هذا الإطار وتطبيقه في مدن أخرى تواجه تحديات مشابهة، خاصة تلك التي تفتقر إلى البيانات التفصيلية، مما يفتح آفاقاً جديدة للأبحاث في مجال التخطيط الحضري القائم على البيانات مفتوحة المصدر[4]
- **الأهمية العملية :**يوفر البحث أداة عملية وملموسة لصناع القرار والمخططين في مدينة دمشق وسياق إعادة الإعمار الأوسع. تمكّنهم هذه الأداة من تبرير قراراتهم بناءً على أدلة علمية، وتوجيه الاستثمارات المحدودة نحو المشاريع التي تحقق أكبر عائد بيئي واجتماعي، والمساهمة في بناء مدينة أكثر مرونة وعدالة.

6. تحديات البحث

يواجه البحث مجموعة من التحديات المتوقعة التي سيتم التعامل معها ضمن إطار المنهجية:

- تجانس البيانات :(Data Heterogeneity) قد تختلف الدقة المكانية والإشعاعية لصور الأقمار الصناعية المتاحة عبر الفترات الزمنية المختلفة، مما قد يؤثر على دقة تحليل التغير. سيتم معالجة ذلك من خلال تطبيق إجراءات تصحيح إشعاعي ومعايرة دقيقة لضمان قابلية المقارنة بين الصور.
- التحقق الميداني :(Ground Truth Validation) إن الصعوبة المتوقعة في الحصول على بيانات مسح ميداني شاملة للتحقق من صحة نتائج النموذج (Validation) تشكل تحدياً. سيتم التغلب على ذلك جزئياً باستخدام صور الأقمار الصناعية التجارية عالية الدقة) مثل (Maxar, Planet كبديل للتحقق البصري (Visual Verification) من تصنيف الأراضي ونتائج النموذج.
- ذاتية الترجيح :(Weighting Subjectivity) إن عملية تحديد الأوزان في أي نموذج تقييم متعدد المعايير (MCE)تنطوي على درجة من الذاتية. ستعالج الأطروحة هذا التحدي من خلال إجراء "تحليل الحساسية " (Sensitivity Analysis)، حيث سيتم اختبار سيناريوهات متعددة للأوزان لإظهار كيف يؤثر تغيير الأولويات التخطيطية على النتائج النهائية، مما يزيد من شفافية وموضوعية النموذج.

7. منهجية البحث

يتبنى البحث منهجاً كمياً تطبيقياً يدمج بين عدة أساليب. سيتم استخدام منهج تحليل التغير الزمني (Change Detection) لتشخيص التدهور البيئي. بعد ذلك، سيتم تطبيق منهج التقييم متعدد المعايير (Multi-Criteria Evaluation) لبناء مؤشر الأولويات. وأخيراً، سيتم استخدام منهج النمذجة والسيناريوهات (Modeling and Scenario Analysis) لتقييم الأثر المستقبلي للتدخلات. سيتم شرح هذه المنهجية بالتفصيل في الباب الثاني من هذه الأطروحة.

(4) Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science, 20(7), p. 703.

8. أدوات البحث

- **المنصـــات البرمجية Google Earth Engine (GEE) :**للمعالجة الســـحابية واســـعة النطاق للبيانات النقطية والتحليل الزماني) QGIS .كمثال على برمجيات GIS مفتوحة المصدر (لإدارة البيانات المتجهة، والتحليل الشبكي، وبناء نموذج**MCE** ، والإنتاج الخرائطي النهائي.
- **مصادر البيانات :**بيانات الأقمار الصناعية مفتوحة المصدر من هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (**USGS**) ووكالة الفضاء الأوروبية(ESA) ، وتشمل (Landsat (Collections 1 & 2 :و .(Sentinel-2 (Level-2A بالإضافة إلى قاعدة بيانات OpenStreetMap للحصول على شبكة الطرق الحضرية.

9. أسباب ومبررات اختيار موضوع البحث

يعود اختيار هذا الموضوع إلى تقاطع ثلاث مبررات رئيسية:

1. **الإلحاح السياقي :(Contextual Urgency)** تمثل مرحلة إعادة الإعمار المحتملة في سوريا نافذة فرصة تاريخية لا تتكرر لدمج مبادئ الاستدامة والعدالة في النسيج الحضري. إن توفير أدوات علمية الآن هو أمر حاسم لضمان أن تكون عملية التجديد موجهة نحو المستقبل.
2. **الفرصة التكنولوجية :(Technological Opportunity)** إن نضج أرشيفات البيانات مفتوحة المصدر ومنصات الحوسـبة السـحابية قد أتاح إمكانيات غير مسـبوقة لإجراء تحليلات حضـرية متطورة في المناطق التي كانت تعتبر "صناديق سوداء" بسبب ندرة البيانات.
3. **الفجوة العلمية :(Scientific Gap)** بينما توجد دراسـات عديدة تسـتخدم GIS لاختيار المواقع، إلا أن هناك فجوة في الأدبيات العلمية المتعلقة بالنماذج المتكاملة التي تجمع بين تحليل التدهور التاريخي والتقييم متعدد المعايير لتحديد أولويات الأراضـي المتروكة خصـيصـاً في سـياق ما بعد الحقبة السـورية الجديدة. هذا البحث يهدف إلى معالجة هذه الفجوة بشكل مباشر.

الباب الأول: الإطار النظري

تمهيد

يهدف هذا الباب إلى بناء القاعدة النظرية والمنهجية التي تُؤسّس عليها الأطروحة في مراحلها التحليلية والتطبيقية اللاحقة، من خلال دمج البعدين التكنولوجي والبيئي في مقاربة واحدة تُعيد تعريف التخطيط الحضري بوصفه علماً قائماً على الأدلة المكانية والبيئية.
فالتحليل الحضري المعاصر، ولا سيّما في المدن المتأثرة بالأزمات، لم يعد ممكنًا دون الاعتماد على تقنيات الرصد والتحليل المكاني، ولا دون فهمٍ عميقٍ للمفاهيم البيئية التي تشكّل الإطار المعرفي لأي مشروع لإعادة التأهيل والتنمية المستدامة.

يُقسَّم هذا الباب إلى فصلين متكاملين يشكّلان معًا بنية معرفية مترابطة تجمع بين **الجانب التقني التحليلي** و**الجانب البيئي–التخطيطي المفاهيمي**.

يتناول **الفصل الأول** الاستشعار عن بعد والبيانات مفتوحة المصدر بوصفها **أداة معرفية** تمكّن الباحث من رصد وتحليل الظواهر المكانية والبيئية بدقة زمنية ومكانية عالية. لا يقتصر الفصل على استعراض التقنيات المستخدمة في جمع البيانات، بل يقدّم قراءة تحليلية في تطور مفهوم الاستشعار عن بعد كمنظومة علمية ساهمت في إعادة تعريف علاقة الإنسان بالمكان من منظور جغرافي تحليلي، مع التركيز على توظيف هذه التقنيات في فهم التحولات العمرانية والبيئية لمدينة دمشق خلال العقدين الأخيرين.

أما **الفصل الثاني** فينتقل إلى المستوى المفاهيمي، من خلال تناول **البنية التحتية الخضراء** كإطار متكامل يربط بين البيانات البيئية والتخطيط المكاني. يقدّم هذا الفصل مقاربة تحليلية موسعة لمفهوم البنية التحتية الخضراء، تطوره في الأدبيات العالمية، مكوناته وأهدافه، والمؤشرات التي تُستخدم في تقييم أدائه ضمن المدن، مع إبراز دوره كمفهوم تنظيمي يسعى لتحقيق التكامل بين البيئة والعمران والاقتصاد والمجتمع. كما يمهّد هذا الفصل لتطبيقات الباب اللاحق، إذ يوفّر الأساس النظري لبناء **نظام دعم القرار المكاني (SDSS)** الذي يستند إلى مؤشرات بيئية كمية لاستخدامها في تحديد أولويات إعادة التأهيل.

بهذا، يشكّل هذا الباب جسرًا معرفيًا يربط بين **التقنيات الرقمية ومنهجيات التحليل المكاني** من جهة، و**المفاهيم البيئية والتخطيطية للبنية التحتية الخضراء** من جهة أخرى، بحيث ينتقل البحث تدريجيًا من التحليل النظري إلى التطبيق العملي في الفصل الثالث، حيث يتم عرض هذه المفاهيم ضمن تجارب في السياق العالمي.

الفصل الأول: الاستشعار عن بعد والبيانات مفتوحة المصدر: الأساس التكنولوجي للتحليل الحضري

1.1 مدخل إلى الفصل

يشـــهد العالم المعاصـــر تحولات جذرية في أســـلوب إدارة المدن والتخطيط الحضـــري نتيجة لتســـارع معدلات النمو السكاني، وتغير أنماط استخدام الأراضـي، وتصـاعد التحديات البيئية والمناخية. وقد أصـبحت المدن اليوم أكثر تعقيدًا من أي وقت مضى، حيث تتشابك فيها العوامل الاجتماعية، الاقتصادية، والبيئية ضمن شبكة من العلاقات التي يصعب فهمها عبر الأســـاليب التقليدية وحدها. من هنا، تزايدت الحاجة إلى أدوات تحليلية حديثة قادرة على إنتاج بيانات موضـــوعية، دقيقة، ومتعددة الأبعاد تســـاعد على **بناء قرارات حضـــرية مســـتندة إلى الأدلة-(Evidence Based Urban Decisions)**[3].

في هذا السياق، برزت **التقنيات المكانية (Geo-Spatial Technologies)** ممثلة بالاستشعار عن بُعد (Remote Sensing)ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) كأدوات محورية في إعادة صـــياغة طريقة جمع المعلومات وتحليلها وتوظيفها. ومع تطور قدرات الحوسبة، ظهر جيل جديد من **نظم دعم القرار – (Decision Support Systems (DSS**التي تعمل على دمج البيانات والتحليلات المكانية مع أطر منهجية لصـــنع القرار، بما يعزز قدرة المخططين وصناع القرار على التعامل مع التحديات الحضرية المركبة [2].

1.1.1العلاقة بين التكنولوجيا وصنع القرار الحضري

إنّ القيمة الحقيقية للتكنولوجيا لا تكمن فقط في توفير البيانات، بل في **إعادة صـياغة العملية التخطيطية نفسـها** .فبينما كانت القرارات الحضرية في الماضي تعتمد على بيانات إحصائية محدودة أو دراسات ميدانية متقطعة، أصبحت اليوم مدعومة بقدرة هائلة على المراقبة اللحظية (Near Real-Time Monitoring) ورصـــد التغيرات الزمنية طويلة المدى عبر التحليل متعدد الأزمنة.[3] (Multi-Temporal Analysis)

فعلى سبيل المثال، يمكن لصور الأقمار الصناعية أن تكشف عن نمو المناطق العشوائية، أو تقلص الغطاء النباتي، أو ارتفاع مؤشـــرات الحرارة الســـطحية في المدينة. وعند دمج هذه البيانات في بيئةGIS ، يمكن تحليل الأنماط المكانية واســـتكشـــاف العلاقات بين الظواهر. غير أنّ القرار لا يُبنى فقط على هذه التحليلات، بل يحتاج إلى **أطر داعمة** تنقل

[3] Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726.
[2] Power, D. J. (2002). *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*. Greenwood Publishing.
[3] Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press.
[4] Keeney, R. L. (1992). *Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decisionmaking*. Harvard University Press.

البيانات من المستوى التحليلي إلى المستوى التطبيقي عبرDSS ، بحيث يتمكن صانع القرار من مقارنة البدائل، تقييم الآثار، واختيار المسار الأمثل [4].

1.1.1.1 حالة الدول النامية وسوريا كنموذج

في الدول المتقدمة، تشكّل الإحصاءات الوطنية والمسوح الدورية مصدرًا رئيسيًا لدعم السياسات. أما في الدول النامية، مثل سوريا، فإن هذه الإحصاءات غالبًا ما تكون متقطعة أو مفقودة، خصوصًا في فترات الأزمات. هذا الفراغ المعرفي يعقّد من قدرة المخططين على بناء استراتيجيات حضرية دقيقة [5].

في هذا السياق، تكتسب تقنيات الاستشعار عن بُعد و GISدورًا محوريًا لتعويض غياب البيانات الميدانية. إذ تسمح الأقمار الصناعية من برامج مثل **Landsat**و **Copernicus Sentinel**بتوفير أرشيف تاريخي متكامل يمكن العودة إليه لرصد التحولات الزمنية، فضلاً عن تحديث البيانات بشكل دوري دون الحاجة إلى فرق ميدانية مكلفة أو معرضة للمخاطر [6].

بالإضافة إلى ذلك، فإن الاعتماد على **منصات التحليل السحابية** مثل **Google Earth Engine**يُتيح للباحثين السوريين، حتى في ظل محدودية الإمكانيات المحلية، معالجة كميات ضخمة من الصور الفضائية بكفاءة عالية، وتحويلها إلى خرائط صريحة (Spatially Explicit Maps) تُبرز التوزيعات المكانية للظواهر الحضرية كالتمدّد العمراني أو الجزر الحرارية. هذه الخرائط تصبح وثائق علمية يمكن الاستناد إليها في دعم القرارات الحضرية، وهو ما يفتح مجالاً لتعويض النقص الهيكلي في قواعد البيانات التقليدية [47].

1.1.2 هيكلية الفصل

بناءً على ما سبق، يهدف هذا الفصل إلى تقديم الأساس التكنولوجي والمنهجي الذي يقوم عليه البحث. ينقسم الفصل إلى عدة محاور رئيسية:

1. استعراض **المفاهيم الأساسية للاستشعار عن بُعد**.
2. توضيح **خصائص الصور الفضائية** وأهميتها في فهم المشهد الحضري.
3. مناقشة **ثورة البيانات مفتوحة المصدر** وأثرها على البحث العلمي.
4. تقديم لمحة عن **المعالجة الأولية للصور الفضائية** كأساس لأي تحليل لاحق.
5. التوسع في **التطبيقات الحضرية**، مثل تحليل الأراضي المهملة، رصد البيئة، والجزر الحرارية.
6. تناول **التكامل مع GIS** وأدوات التحليل المكاني.
7. إدخال **نظم دعم القرار** و**الأطر المستندة إلى الأدلة**.

---

[5] United Nations. (2022). World Urbanization Prospects. UN DESA.
[6] Wulder, M. A., et al. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. Remote Sensing of Environment, 225, 127–147.
[7] Gorelick, N., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27

8. التركيز على **الخرائط المكانية الصريحة (Spatially Explicit Maps)** كمنتج رئيسي.
9. تقديم **نظرة مستقبلية** على دور الذكاء الاصطناعي والحوسبة السحابية.

1.2 الاستشعار عن بُعد: المفاهيم الأساسية

1.2.1 تعريف ومبادئ الاستشعار عن بُعد

يتم تعريف الاستشعار عن بُعد بأنه علم وفن وتقنية جمع المعلومات عن سطح الأرض والظواهر الطبيعية والبشرية دون اتصال مباشر معها، وذلك عبر تسجيل وتحليل الموجات الكهرومغناطيسية المنعكسة أو المنبعثة من الأجسام المستهدفة ([1]، [5]يقوم هذا العلم على مبدأ أساسي يتمثل في أنّ كل مادة أو ظاهرة على سطح الأرض لها خصائص إشعاعية فريدة تحدّد كيفية امتصاصها أو انعكاسها أو إصدارها للإشعاع الكهرومغناطيسي، الأمر الذي يسمحبتمييزها عن غيرها من الظواهر. و تكمن أهمية الاستشعار عن بُعد في قدرته على توفير بيانات مكانية وزمانية متكررة وواسعة النطاق، مما يجعله أداة جوهرية لدعم التخطيط الحضري، الدراسات البيئية، وإدارة الموارد الطبيعية.([2])

1.2.2الطيف الكهرومغناطيسي والتوقيع الطيفي

يمثّل **الطيف الكهرومغناطيسي** الإطار النظري لفهم آلية عمل الاستشعار عن بُعد، حيث يغطي نطاقاً واسعاً من الأطوال الموجية، ابتداءً من أشعة غاما وحتى الموجات الراديوية. إلا أنّ النطاق الأكثر استخداماً في الدراسات الحضرية والبيئية هو الجزء المرئي وتحت الأحمر القريب والحراري.([3])
أما **التوقيع الطيفي(Spectral Signature)** ، فهو بمثابة "البصمة الفريدة" لكل مادة، إذ يعبّر عن نمط الانعكاس أو الامتصاص الطيفي عبر نطاقات محددة. على سبيل المثال، تُظهر النباتات انعكاساً عالياً في نطاق تحت الأحمر القريب بسبب تركيبها الخلوي، بينما يمتص الماء معظم الأطوال الموجية ويظهر بلون داكن في الصور الفضائية.([4])

1.2.3أنواع الاستشعار: الفعّال والسلبي

يقسّم الاستشعار عن بُعد إلى نوعين رئيسيين:

- **الاستشعار السلبي :(Passive Sensing)** يعتمد على الطاقة الشمسية كمصدر رئيسي، حيث تسجل المستشعرات الإشعاع المنعكس أو المنبعث من سطح الأرض. صور **Landsat**و **Sentinel-2**أمثلة بارزة لهذا النوع.([5])

---

[1] Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley, 2015.
[2] Jensen, J. R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Pearson, 2015.
[3] Campbell, J. B., & Wynne, R. H. *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press, 2011.
[4] Richards, J. A. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer, 2013.
[5] Wulder, M. A., et al. “Landsat continuity: Contributions of the Landsat program to Earth observations.” *Remote Sensing of Environment*, 2019.
[6] Moreira, A., et al. "A tutorial on synthetic aperture radar." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013.

- **الاستشعار الفعّال :(Active Sensing)** يعتمد على إرسال إشارة من المستشعر نحو الهدف ثم تسجيل الإشارة المرتدة. أنظمة الرادار (SAR) والليدار (LiDAR) هي أبرز تطبيقاته، وتتميز بقدرتها على العمل ليلاً ونهاراً وفي ظروف الطقس المختلفة.([6])

1.2.4المنصات: أقمار صناعية، طائرات مسيرة، نظم هجينة

تتنوع المنصات الحاملة للمستشعرات وفقاً للهدف:

- **الأقمار الصناعية :**مثل أقمار Landsat وSentinel، وهي الأكثر استخداماً على الصعيد العالمي بفضل أرشيفها الضخم وإمكانية الوصول المجاني إليها.
- **الطائرات المسيّرة :(Drones)** توفّر صوراً عالية الدقة تصل إلى السنتيمترات، ما يجعلها أداة مثالية لدراسة الظواهر على المستوى المحل [7]
- **النظم الهجينة :**وهي حلول تكاملية تجمع بين صور الأقمار الصناعية وبيانات الطائرات المسيّرة للحصول على تحليلات متعددة المستويات المكانية والزمانية.

1.2.5خصائص الصور الفضائية

تُحدّد جودة وملاءمة الصور الفضائية للتحليل الحضري عبر أربع خصائص رئيسية:([8])

- **الدقة المكانية :(Spatial Resolution)** تمثل حجم البكسل الأرضي، وهي العامل الأساسي لتمييز التفاصيل) مثل الفرق بين صور 30م في Landsat وصور 10م في.(Sentinel
- **الدقة الطيفية :(Spectral Resolution)** عدد ونطاق الحزم الطيفية المتاحة للمستشعر.
- **الدقة الإشعاعية :(Radiometric Resolution)** قدرة المستشعر على التمييز بين درجات مختلفة من الشدة الطيفية.
- **الدقة الزمنية :(Temporal Resolution)** الفترة الزمنية بين عمليات إعادة التصوير لنفس الموقع.

1.2.6المعالجة الأولية للصور الفضائية

قبل الشروع في أي تحليل، يجب إخضاع الصور الفضائية لمرحلة **المعالجة الأولية(Preprocessing)** ، لضمان دقة النتائج([9])

---

[7] Colomina, I., & Molina, P. "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014.

[8] Chuvieco, E. Fundamentals of Satellite Remote Sensing. CRC Press, 2016.

[9] Lu, D., & Weng, Q. "A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance." International Journal of Remote Sensing, 2007.

123

- **التصحيح الهندسي :(Geometric Correction)** إزالة التشوهات الهندسية وربط الصورة بالإحداثيات الجغرافية الحقيقية.
- **التصـــحيح الإشـــعاعي :(Radiometric Correction)** تعديل القيم الرقمية لتعكس الطاقة الحقيقية المستقبلة.
- **التصـــحيح الجوي :(Atmospheric Correction)** إزالـة تـأثيرات الغلاف الجوي مثـل التشـــتت والامتصاص التي تؤثر على دقة التوقيع الطيفي.

1.3 نظم دعم القرار (Decision Support Systems – DSS)

1.3.1مفهوم نظم دعم القرار: الجذور والتطور

نشـأت نظم دعم القرار في منتصـف القرن العشـرين لتلبية الحاجة إلى أدوات مسـاعدة صـانعي القرار في مواجهة المشـكلات المعقدة وغير الروتينية، حيث لم تكن الطرق التقليدية لجمع البيانات وتحليلها كافية لتقديم توصـيات دقيقة وموثوقة. تعتمد نظم دعم القرار على **دمج البيانات والمعلومات التحليلية مع خبرة المستخدم،** بهدف توفير توصيات مدعومة بالأدلة، وإمكانية تقييم عدة سيناريوهات قبل اتخاذ القرارات النهائية [71] .

مع مرور الوقت، تطورت نظم دعم القرار من أدوات بسيطة لمعالجة الجداول والبيانات إلى أنظمة متكاملة قادرة على التعامل مع معلومات متعددة الأبعاد تشـمل البيانات الزمنية والمكانية والكمية والنوعية، مما مهد الطريق لنشـوء **نظم دعم القرار المكاني (SDSS)** التي تمثل دمج DSS مع نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتمكين التحليل المكاني العميق ودعم التخطيط الحضري المستدام [2].

في المدن كثيفة البناء مثل دمشـق، تصـبح هذه النظم ضـرورة لتوفير قاعدة تحليلية قوية تسـاعد المخططين على فهم البنى التحتية، المناطق المتدهورة، والمساحات الخضراء، خصوصًا في ظل ضعف الإحصاءات الميدانية الرسمية.

1.3.2نظم دعم القرار المكاني :(SDSS) الدمج بين البعد المكاني والتحليل الكمي

نظم دعم القرار المكاني هي امتداد لنظم دعم القرار التقليدية، مع التركيز على **البعد المكاني للظواهر وتحليل العلاقات بين المواقع المختلفة** .توفر هذه النظم القدرة على إنشـــاء **خرائط مكانية صـــريحة** تعرض توزيع الظواهر العمرانية والبيئية، مما يسهل على صناع القرار تقدير النتائج المترتبة على قراراتهم قبل التنفيذ [3].

تمكّن SDSS المخططين من دراسة تأثير السياسات أو المشاريع على البيئة الحضرية بشكل مكاني دقيق، من خلال الجمع بين التحليل الكمي والنمذجة المكانية. على سـبيل المثال، يمكن تقييم تأثير الجزر الحرارية الحضـرية وربطها

---

[1] Turban, E., Sharda, R., & Delen, D. Decision Support and Business Intelligence Systems. Pearson, 2011.
[2] Malczewski, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science, 2006.
[3] Jankowski, P. Integrating Geographic Information Systems and Multiple Criteria Decision Analysis. Wiley, 1995.

بالغطاء النباتي وكثافة المباني، مما يسمح باقتراح حلول مستدامة لتقليل الحرارة السطحية على السكان. كما توفر هذه النظم إمكانية إجراء **تحليل متعدد السيناريوهات** لفهم تداعيات قرارات التنمية العمرانية أو المشاريع البيئية على المدى القصير والطويل.

1.3.3 مكونات SDSS

تتكون نظم دعم القرار المكاني من ثلاث مكونات مترابطة: قاعدة البيانات المكانية، نماذج التحليل، وواجهة المستخدم.

- **قاعدة البيانات المكانية :**تشمل جميع المعلومات الضرورية لتمثيل الظواهر المكانية، مثل صور الأقمار الصناعية، خرائط استخدامات الأراضي، الشبكات الحضرية، والمؤشرات البيئية.
- **نماذج التحليل :**تعمل على معالجة البيانات وتوليد المعرفة من خلال خوارزميات التحليل المكاني والإحصائي أو الذكاء الاصطناعي، وتسمح بتقييم السيناريوهات المختلفة ورصد التحولات الزمنية.
- **واجهة المستخدم :**تمثل نقطة التفاعل بين الباحث والنظام، حيث تسمح باستكشاف البيانات، اختبار السيناريوهات، ومشاهدة النتائج على الخرائط بشكل مرئي، ما يجعل النظام أداة دعم قرار فعّالة [2].

1.3.4 تطبيقات SDSS في التخطيط الحضري وإدارة الموارد

تستخدم نظم SDSS في مجموعة واسعة من التطبيقات الحضرية، من بينها:

- تقييم الأراضي المتروكة والمهملة وتحليل إمكانات إعادة استخدامها بشكل مستدام.
- رصد التوسع العمراني غير المنظم، وتقدير أثر السياسات العمرانية على البيئة.
- رصد الجزر الحرارية وربطها بمؤشرات الغطاء النباتي وكثافة المباني لتقديم حلول بيئية مستدامة.
- دعم اتخاذ القرار الحضري المستند إلى الأدلة وتقليل الاعتماد على الخبرة الفردية أو البيانات الميدانية الناقصة، وهو أمر حيوي في المدن ذات الموارد المحدودة أو البيانات الناقصة.

1.3.4.1 القيمة من الاستفادة في هذا البحث:

يشكّل توظيف نظم دعم القرار (DSS) ضمن هذا البحث إضافةً نوعية إلى حقل التخطيط الحضري البيئي في السياق السوري، إذ لم يقتصر الاستخدام على الجانب النظري لهذه الأنظمة، بل جرى دمجها فعلياً ضمن منظومة تحليل جيومكاني متعددة المعايير تمكّنت من تحويل البيانات الفضائية إلى أدوات دعم قرار تخطيطي. وبذلك، أضاف البحث بُعداً تطبيقياً واضحاً لنظم دعم القرار، من خلال تهيئتها للتعامل مع بيانات مفتوحة المصدر ومع بيئات محدودة البيانات (Data-Scarce Environments). كما ساهم في تطوير نموذج عملي (RPI–SDSS) يُمكّن من اتخاذ قرارات مؤسَّسة على أدلة كمية ومكانية، بما يفتح المجال أمام إعادة استخدام هذا النهج في مشاريع إعادة التأهيل والتخطيط المستدام في المدن السورية والعربية مستقبلاً.

1.4 الأطر المبنية على الأدلة(Evidence-Based Frameworks)

1.4.1مفهوم التخطيط الحضري المبني على الأدلة

يعرف التخطيط الحضري المبني على الأدلة (Evidence-Based Urban Planning) بأنه النهج الذي يعتمد على **البيانات العلمية والتحليل الكمي لتوجيه القرارات التخطيطية**، بدلاً من الاعتماد على الخبرة الشخصية أو السياسات التقليدية غير المبنية على معلومات دقيقة [1].[8] هذا النهج يتيح تقييم التأثيرات المحتملة للمشاريع العمرانية قبل التنفيذ، ومراجعة السياسات الحالية على أساس نتائج موضوعية يمكن قياسها وتحليلها.

في السياقات الحضرية الحديثة، يتيح التخطيط المبني على الأدلة فهم التفاعلات بين العوامل البيئية، الاجتماعية، والاقتصادية بشكل أكثر وضوحًا. على سبيل المثال، يمكن استخدام البيانات المستخرجة من صور الأقمار الصناعية لقياس التوسع العمراني، رصد الغطاء النباتي، وتحليل الجزر الحرارية، وبالتالي توجيه السياسات نحو إدارة مستدامة للموارد الحضرية [2].

1.4.2العلاقة بين البيانات، النماذج، وصنع القرار

تشكل البيانات قاعدة جوهرية لعملية التخطيط المبني على الأدلة، حيث تُستخدم في **بناء النماذج التحليلية والمحاكاة** التي تساعد على فهم الأنماط المكانية واتخاذ القرارات الاستراتيجية. في هذا السياق، تُستخدم نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وأدوات التحليل المكاني لتجميع وتحليل البيانات من مصادر متعددة، بما في ذلك الإحصاءات الرسمية، المسوحات الميدانية، والاستشعار عن بعد [3].

تسمح النماذج المكانية بتحليل سيناريوهات متعددة، مثل تأثير التوسع العمراني على توزيع الخدمات أو على البيئة الحضرية، وبالتالي تقدم **توصيات قائمة على نتائج كمية قابلة للقياس**، بدلاً من افتراضات غير مؤكدة. هذا التكامل بين البيانات، النماذج، وصنع القرار يشكل العمود الفقري لأي إطار تخطيط حضري فعال.

1.4.3دور مؤشرات الاستشعار عن بعد و GISفي توفير قاعدة معرفية موضوعية

توفر مؤشرات الاستشعار عن بعد (Remote Sensing) و GISإمكانية إنشاء **قاعدة معرفية موضوعية** يمكن الاعتماد عليها في صنع القرار الحضري. فمؤشرات مثل NDVI لقياس الغطاء النباتي، NDBIلتمييز المناطق المبنية، و LSTلقياس الحرارة السطحية توفر معلومات كمية دقيقة وموثوقة [4].

هذه المؤشرات تتيح مقارنة البيانات عبر الزمن والمكان، مما يمكّن المخططين من رصد التحولات العمرانية أو البيئية بشكل دوري. في المدن العربية، حيث غالبًا ما تكون الإحصاءات الرسمية ناقصة أو قديمة، تصبح هذه المؤشرات أداة

---

[1] Nutley, S., Walter, I., & Davies, H. Using Evidence: How Research Can Inform Public Services. Policy Press, 2007.
[2] Yin, R. K. Case Study Research: Design and Methods. Sage Publications, 2014

أساسية لتوفير معلومات موضوعية، تساعد في تحديد الأولويات التخطيطية، وتحليل المخاطر، وتقييم الفجوات في الخدمات الحضرية.

1.4.4التحديات في السياقات العربية: نقص البيانات مقابل وفرة الصور الفضائية

رغم توفر أرشيف واسع من صور الأقمار الصناعية مفتوحة المصدر مثل Landsat وSentinel، يواجه التخطيط المبني على الأدلة في السياقات العربية تحديات كبيرة، أبرزها **نقص البيانات الإحصائية الميدانية الدقيقة** أو تأخر تحديثها [59]. هذا النقص يجعل الاعتماد على مؤشرات الاستشعار عن بعد أمرًا ضروريًا، لكنه يفرض أيضًا حذرًا في تفسير النتائج، خصوصًا عند التعامل مع الظواهر الاجتماعية والاقتصادية التي لا يمكن قياسها مباشرة من الصور الفضائية.

إضافةً إلى ذلك، يحتاج استخدام هذه البيانات إلى **خبرة تحليلية عالية** في GIS والاستشعار عن بعد لضمان إنتاج خرائط ومؤشرات دقيقة، مع مراعاة الاختلافات المكانية والزمنية، والتشويش الطيفي الذي قد يحدث في المدن الكثيفة مثل دمشق.

1.5الخرائط المكانية الصريحة (Spatially Explicit Maps)

1.5.1 تعريف الخرائط الصريحة ودورها في التحليل الحضري

الخرائط المكانية الصريحة، أو ما يُعرف بـ **Spatially Explicit Maps**، هي تمثيلات مكانية للبيانات تُظهر العلاقات المكانية بشكل واضح ودقيق على مستوى المدينة أو المنطقة الحضرية [1]. [10]تتيح هذه الخرائط فهم **توزيع الظواهر والعمليات عبر المكان**، مثل كثافة السكان، توزيع الخدمات العامة، أو المناطق المعرضة للمخاطر البيئية.

في السياق الحضري، تلعب هذه الخرائط دورًا مركزيًا في التحليل المكاني لأنها **تربط البيانات الرقمية بالواقع المكاني**، مما يمكّن المخططين من رصد التفاعلات بين مختلف عناصر المدينة وتحديد أولويات التخطيط المستدام. فالخرائط المكانية الصريحة ليست مجرد أدوات تصور، بل هي جزء من **المنهجية التحليلية نفسها**، حيث تساعد على ترجمة الأرقام والمؤشرات إلى رؤى مكانية قابلة للفهم واتخاذ القرار [2].

---

[3] Goodchild, M. F. *Geographical Information Systems and Science*. Wiley, 2018.
[4] Weng, Q. *Remote Sensing and GIS Integration for Urban Environmental Analysis*. CRC Press, 2012.
[5] Salem, F., & Al-Saidi, M. *Challenges in Evidence-Based Urban Planning in Arab Cities*. Habitat International, 2020

[1] Openshaw, S. The Modifiable Areal Unit Problem. GeoBooks, 1984.
[2] Goodchild, M. F. Geographical Information Systems and Science. Wiley, 2018.
[3] Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. Geographical Information Systems and Science. 3rd Edition, Wiley, 2015

1.5.2 تحويل البيانات الرقمية إلى خرائط مفهومة لصناع القرار

تقوم الخرائط المكانية الصريحة على تحويل البيانات الرقمية المعقدة إلى **خرائط قابلة للقراءة والتفسير** من قبل صناع القرار، سواء كانوا من المؤسسات الحكومية أو القطاع الخاص أو المجتمع المدني. وتشمل عملية التحويل هذه عدة خطوات أساسية:

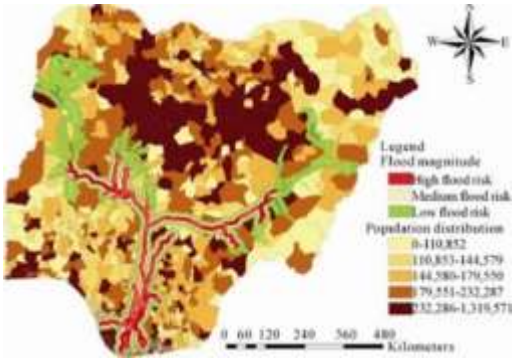
- **تجميع البيانات المكانية** من مصادر متعددة، بما في ذلك الاستشعار عن بعد، GIS، والمسوح الميدانية.
- **تحليل البيانات** باستخدام أدوات التحليل المكاني، مثل Overlay و Bufferو Hotspot Analysis، لاستخلاص الأنماط المكانية المهمة.
- **تصميم الخرائط** بطريقة بصرية واضحة، مع اختيار الألوان والرموز المناسبة لتوضيح الفئات والمستويات المختلفة للظواهر.

النتيجة هي خرائط يمكن أن توضح، على سبيل المثال، المناطق الأكثر احتياجًا للخدمات، أو الأماكن المعرضة للفيضانات، أو نطاقات التوسع العمراني غير المنظم، وبالتالي توفير قاعدة معرفية قوية لاتخاذ قرارات حضرية مستنيرة [3].

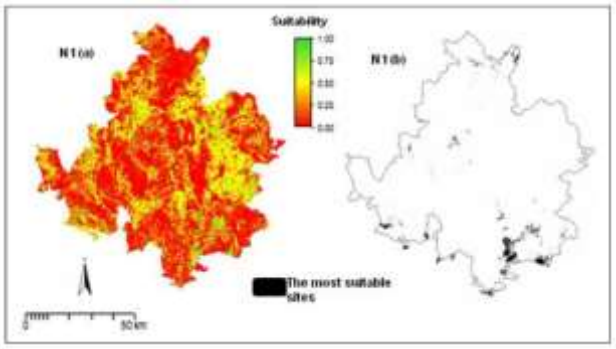
1.5.3 أمثلة على الخرائط المكانية الصريحة

تتنوع أنواع الخرائط المكانية الصريحة بحسب أهداف التحليل، ومن أبرزها:

- **خرائط الأولويات :(Priority Maps)** تحدد المناطق التي تحتاج إلى تدخلات فورية، سواء في البنية التحتية، الخدمات، أو إعادة تأهيل الأراضي.
- **خرائط المخاطر :(Risk Maps)** توضح المناطق المعرضة للكوارث الطبيعية أو التلوث البيئي أو المخاطر الاجتماعية.
- **خرائط الخدمات :(Service Maps)** توضح توزيع المدارس، المستشفيات، المرافق العامة، وتقييم مدى توفرها بالنسبة للسكان.



رسم توضيحي 47: مثال يوضح خريطة المخاطر - المصدر mdpi



رسم توضيحي 48: مثال يوضح خريطة الأولويات للمواقع الأكثر ملائمة - المصدر mdpi

هذه الخرائط لا تساعد فقط في **التخطيط طويل الأمد**، بل تُستخدم أيضًا في **رصد التقدم وتقييم النتائج** بعد تنفيذ المشاريع.

1.5.4 القيمة الاتصالية للخرائط

بالإضافة إلى دورها التحليلي، تتميز الخرائط المكانية الصريحة **بقيمة اتصالية كبيرة** .فهي تتيح:

- **التواصـــل مع المجتمع المحلي :**يمكن عرض نتائج التحليل بصـــريًا بطريقة يفهمها الســـكان، مما يعزز المشاركة المجتمعية في اتخاذ القرار.
- **التواصـــل مع الجهات الرســـمية :**تســـاعد هذه الخرائط صـــناع القرار في الجهات الحكومية على تصـــور الاحتياجات والمخاطر بطريقة دقيقة، مما يسهل **تخصيص الموارد** ووضع السياسات العمرانية.

في السياقات العربية، حيث قد يكون الوصول إلى البيانات الميدانية محدودًا، تصبح الخرائط المكانية الصريحة **جسرًا حيويًا بين البيانات العلمية وصنع القرار الفعلي**، وتزيد من شفافية وموثوقية التخطيط الحضري [4] .

[4] Salem, F., & Al-Saidi, M. *Spatial Planning Challenges in Arab Cities: Data Scarcity and Remote Sensing Applications*. Habitat International, 2020

1.6 منصات التحليل السحابية

1.6.1 Google Earth Engineكنموذج

شـهد العقد الأخير تحولًا نوعيًا في تحليل البيانات المكانية مع ظهور **منصـات التحليل السـحابية**، والتي تمكّن الباحثين والمخططين من معالجة كميات ضـــخمة من البيانات دون الحاجة إلى أجهزة حاســـوب فائقة القوة. ومن أبرز هذه المنصات تأتي **Google Earth Engine (GEE)**، التي تقدم بيئة سحابية متكاملة للوصول إلى أرشيف هائل من صور الأقمار الصناعية والبيانات الجغرافية [1].

تُعد GEE نموذجًا مثاليًا لمنصات التحليل السحابية نظرًا لما توفره من مزايا مثل:

- الوصول إلى بيانات **Landsat**و **Sentinel**على نطاق تاريخي وجغرافي واسع.
- إمكانية تخزين ومعالجة **البيانات المكانية الكبيرة** دون تحميلها محليًا، ما يقلل الحاجة للبنية التحتية المكلفة.
- توفير واجهات برمجية سـهلة الاسـتخدام للتنفيذ التلقائي للعمليات التحليلية، بما في ذلك **المؤشـرات الطيفية، التحليل متعدد الأزمنة، ونماذج التنبؤ**.

1.6.2 إمكانيات المعالجة واسعة النطاق للبيانات المكانية

تتيح منصات التحليل السحابية، وعلى رأسهاGEE ، **تنفيذ عمليات تحليلية واسعة النطاق** تشمل:

- **المعالجة الكمية للصـور الفضـائية** :مثل تصـحيح الإشـعاع والتصـحيح الجوي، وتحويل الصـور الخام إلى بيانات صالحة للتحليل.
- **تحليل التغيرات الزمنية** :مقارنة صـور الأقمار الصـناعية على مدى عقود لرصـد التوسـع العمراني، تدهور الغطاء النباتي، أو التغيرات الحرارية.
- **التصـــنيف الطيفي والتنبؤ المكاني** :اســـتخدام خوارزميات التعلم الآلي لتصـــنيف اســـتخدامات الأرض واستخراج الأنماط الحضرية.
- **دمج مصـــادر بيانات متعددة** :الجمع بين بيانات الاسـتشـعار عن بعد و GISوبيانات ميدانية لإنتاج خرائط دقيقة وموثوقة [2].

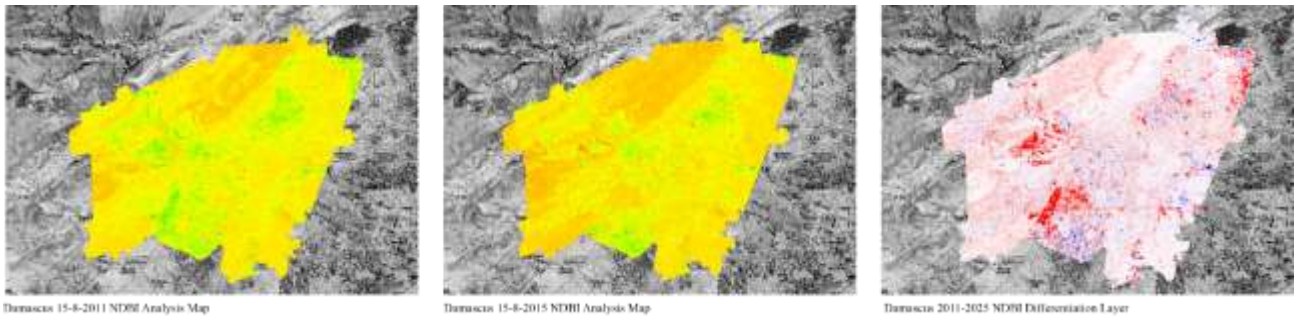
هذه الإمكانيات تجعل التحليل السـحابي أداة قوية للتخطيط الحضـري، خصـوصًـا في **الدول النامية أو المناطق التي تعاني من نقص البيانات الميدانية**، حيث يمكن الاعتماد على الأرشـيف المفتوح لتوليد رؤى اسـتراتيجية مسـتندة إلى الأدلة.

1.6.3 أمثلة على التطبيقات الحضرية

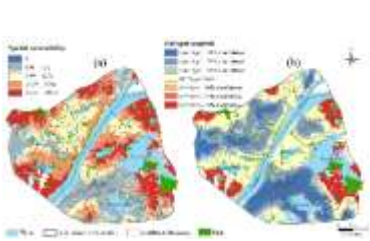
يمكن استخدام منصات التحليل السحابية في مجموعة واسعة من التطبيقات الحضرية، منها:

- **رصد التوسع العمراني العشوائي** :تحليل نمو المدن غير المخطط له، وتحديد المناطق ذات الأولوية للتدخل التخطيطي.
- **تقييم الجزر الحرارية الحضرية** :استخراج بيانات الحرارة السطحية من الصور الحرارية لتحديد مناطق التوتر الحراري وتخطيط المساحات الخضراء.
- **إدارة الغطاء النباتي والخدمات البيئية** :مراقبة حالة الحدائق والمتنزهات الحضرية، والتنبؤ بتأثير التوسع العمراني على البيئة.

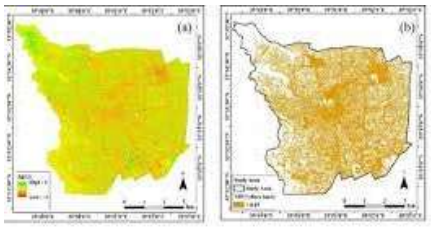
- **تحليل الوصول إلى الخدمات العامة** :باستخدام أدوات التحليل المكاني يمكن تحديد مدى تغطية المستشفيات، المدارس، أو محطات النقل العام [3] .



رسم توضيحي 49: رصد التوسع العمراني العشوائي لمدينة دمشق وازدياده باستخدام تقنيات GEE - عمل الباحث



رسم توضيحي50 لتحليل الوصول للخدمات العامة لمدينة ووهان – الصين mdpi



رسم توضيحي 51: إدارة الغطاء النباتي والخدمات البيئية – مدينة إربد في الأردن mdpi

رسم توضيحي 52 : تحليل درجة حرارة السطح lst ضمن إنديانا بوليس – الولايات المتحدة الأمريكية mdpi

[1] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., et al. *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. Remote Sensing of Environment, 2017.

[2] Foga, S., Scaramuzza, P., et al. *Cloud-based processing of satellite imagery for large-scale environmental monitoring*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017.

يُظهر الواقع أن **منصات التحليل السحابية** مثل GEE لم تعد مجرد أدوات تقنية، بل أصبحت **جزءًا من منهجية البحث الحضـــري المســـتند إلى الأدلـة**، إذ تمكّن المخططين من اتخاذ قرارات قائمة على بيانات دقيقة وموثوقة، وتقليل التحيزات الناجمة عن نقص البيانات الميدانية.

1.7 مستقبل الأنظمة المكانية في التخطيط الحضري

مع تســارع التحولات التكنولوجية، أصــبح مســتقبل الأنظمة المكانية في التخطيط الحضــري مرتبطاً ارتباطاً وثيقاً **بتقنيات الذكاء الاصـطناعي والتعلم الآلي**، والتي تُعيد تعريف طريقة جمع البيانات وتحليلها، فضــلاً عن تمكين اتخاذ القرارات المبنية على الأدلة بسرعة ودقة غير مسبوقة [1].

الاتجاهات الحديثة في التحليل المكاني:

1. **تشمل الاتجاهات الحديثة في هذا المجال:**

- **الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي :(ML)** أصبحت خوارزميات التعلم العميق، مثل الشبكات العصبية الالتفافية (CNNs) والشبكات العصبية التوليدية(GANs) ، أدوات قوية لاستخراج الأنماط الحضرية من البيانات الطيفية متعددة القنوات، وتحسين تصنيف الغطاء الأرضي، والتنبؤ بالتوسع العمراني غير المنظم [2].
- **البيانات فائقة الطيفية :(Hyperspectral Data)** توفر صــور الأقمار الصــناعية عالية الطيف القدرة على رصـد تفاصـيل دقيقة للمواد السـطحية، وهو ما يتيح تحسـين دقة مؤشـرات الغطاء النباتي، الأسـطح المبنية، والتلوث الحضري، ويخلق قاعدة معرفية قوية للتخطيط المستدام [3].

1.7.1التكامل بين DSS و SDSSوتقنياتBig Data

تُظهر التجارب الحديثة أن الدمج بين نظم دعم القرار (DSS) ونظم دعم القرار المكاني (SDSS) مع أدوات **تحليل البيانات الضخمة (Big Data Analytics)** يتيح:

- معالجة كميات هائلة من البيانات المكانية والزمانية.
- إنشــاء نماذج محاكاة دقيقة للمدن المســتقبلية، بما في ذلك التوســع العمراني، الطلب على الخدمات، والجزر الحرارية الحضرية.
- دعم اتخاذ القرارات المبنية على أدلة كمية قابلة للقياس والتكرار، بدل الاعتماد على التقديرات التقليدية أو الخبرة الشخصية فقط [4].

---

[3] Wulder, M. A., White, J. C., et al. *Satellite-based urban monitoring using cloud platforms: Opportunities and challenges*. Urban Forestry & Urban Greening, 2019

دور الخرائط الذكية (Smart Maps) في المدن المستدامة
تتيح الخرائط الذكية، وهي خرائط رقمية تفاعلية مبنية على بيانات حية ومتجددة، لصناع القرار:

- متابعة التغيرات العمرانية والبيئية في الوقت الفعلي.
- التخطيط للخدمات العامة بشكل ديناميكي وفق احتياجات السكان الفعلية.
- تعزيز مشاركة المجتمع المدني عبر منصات تفاعلية تظهر التحديات والفرص في البيئة الحضرية بشكل بصري سهل الفهم.

يمكن القول إن **مستقبل الأنظمة المكانية يرتكز على دمج المعرفة المكانية الدقيقة مع الذكاء الاصطناعي و Big Data** لتوفير أدوات قوية لصنع السياسات الحضرية المستدامة، خصوصاً في المدن ذات البيانات الميدانية المحدودة، مثل دمشق، حيث تمثل هذه الأنظمة أداة محورية لتعويض فجوات المعلومات وضمان التخطيط القائم على الأدلة [5].

1.8 الخلاصة النقدية للفصل

من التكنولوجيا إلى الأطر المنهجية

يمكن النظر إلى الفصل الأول باعتباره مدخلاً أساسياً لفهم **التحولات التكنولوجية والمنهجية في مجال الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات المكانية** .فقد بدأت رحلة الفصل بتوضيح المفاهيم الأساسية للاستشعار عن بعد، من التفاعل بين الطاقة والمادة، الطيف الكهرومغناطيسي، والتوقيعات الطيفية للظواهر الأرضية، مروراً بأنواع الاستشعار (الفعّال والسلبي) والمنصات المستخدمة، وصولاً إلى المعالجة الأولية للصور الفضائية.

لكن الأهمية الأكاديمية لا تكمن فقط في المعرفة التكنولوجية، بل في **كيفية تحويل هذه التكنولوجيا إلى أطر منهجية يمكن الاعتماد عليها في الدراسات الحضرية** .فقد أظهر الفصل أن الأدوات الرقمية الحديثة ليست هدفاً بحد ذاتها، بل وسيلة لتوفير قاعدة بيانات موثوقة وموضوعية تدعم التخطيط المبني على الأدلة، وتعزز قدرة صناع القرار على فهم الأنماط المكانية والزمنية في المدن.

1.8.1 المزايا والقيود

يمكن تلخيص المزايا الأساسية لما تم عرضه في الفصل في النقاط التالية:

دقة البيانات واستمراريتها :توفر الأقمار الصناعية مفتوحة المصدر مثل Landsat و Sentinelبيانات زمنية طويلة المدى، مما يتيح رصد التحولات العمرانية والبيئية بشكل موضوعي [1] .

[1] Wulder, M.A., et al. Landsat continuity: Past, present, and future. Remote Sensing of Environment, 2019.

- **الشمولية المكانية :**القدرة على رصد مناطق واسعة بما في ذلك الأراضي غير الموثقة أو المتروكة، وهو أمر بالغ الأهمية في المدن ذات نقص البيانات الميدانية [2].
- **إمكانية التكامل مع نظم دعم القرار :**الجمع بينDSS ، SDSS، والتحليل المكاني يمكّن الباحثين والمخططين من محاكاة سيناريوهات مستقبلية واتخاذ قرارات مدروسة [3].

لكن هذه المزايا تقابلها قيود مهمة يجب مراعاتها:

- **الدقة المحدودة لبعض الصور الفضائية المجانية :**الصور عالية الدقة التجارية غالباً ما تكون مكلفة، مما قد يحد من استخدامها في السياقات البحثية أو الحكومية [4].
- **التحديات الطيفية والبيئية :**المدن الكثيفة تعاني من اختلاط الأطياف(Spectral Mixing) ، ظلال المباني، وتغيرات موسمية تؤثر على تحليل البيانات [5].
- **البعد السياسي والأمني :**خصوصاً في المدن الحساسة مثل دمشق، حيث استخدام صور الأقمار الصناعية يتطلب مراعاة القيود القانونية والسياساتية [6].

كيف يمهد هذا الفصل للفصول التالية؟

يوفر الفصل الأول **القاعدة التأسيسية لفهم استخدام المؤشرات المكانية والبيئية في الفصول التالية،** بما في ذلك:

- **المؤشـــرات :(Indicators)** مثلNDVI ، NDBI، وLST، التي تعتمد على المعرفة الطيفية والمكانية المكتسبة من الفصل الأول.
- **نظام تقييم المخاطر والتنميط المكاني :(RPI)** الذي يتطلب فهم عميق للتقنيات والمصـــادر البيانية، وكيفية دمجها في نماذج التحليل المكاني.

التطبيقات العملية :حيث تُســـتخدم البيانات المفتوحة المصـــدر، نظم دعم القرار، والتحليل الســـحابي في دراسات حضرية ملموسة، مثل رصد الأراضي المتروكة، الجزر الحرارية الحضرية، أو تخطيط الخدمات العامة.

---

[2] Gong, P., et al. Global land cover mapping using Landsat data: Achievements and challenges. International Journal of Digital Earth, 2013.

[3] Malczewski, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science, 2006.

[4] Guo, Q., et al. Commercial high-resolution satellite imagery: Opportunities and constraints for urban studies. Remote Sensing, 2020.

[5] Lu, D., & Weng, Q. Hyperspectral remote sensing for urban studies: Opportunities and challenges. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019.

[6] Yin, L., & Wang, X. Evidence-based urban planning in data-scarce cities: Integrating RS, GIS, and smart maps. Cities, 2021.

الفصل الثاني: البنية التحتية الخضراء

تمهيد

يأتي هذا الفصل بوصفه امتداداً منهجياً ومنطقياً للفصل الأول، الذي مهّد للإطار التكنولوجي والمنهجي لتحليل الظواهر الحضرية عبر أدوات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية ونظم دعم القرار. فبعد أن استعرض الفصل الأول الأسس النظرية للأدوات الرقمية التي تمكّن من إنتاج المعرفة المكانية، ينتقل هذا الفصل إلى الجانب المفاهيمي التطبيقي الذي يربط تلك الأدوات بهدفها البيئي والاجتماعي ضمن مفهوم "البنية التحتية الخضراء."
يُقدّم هذا الفصل قراءة تحليلية متسلسلة لتطور مفهوم البنية التحتية الخضراء في الأدبيات الأكاديمية العالمية، ويُعيد تفسيرها ضمن الإطار الجيومكاني العربي والسوري، ليشكّل الجسر الذي يصل بين التكنولوجيا البيئية من جهة، ورؤية التخطيط المستدام القائم على المؤشرات المكانية من جهة أخرى. وبذلك، يُعتبر هذا الفصل محوراً انتقالياً يربط بين البنية النظرية للأدوات الرقمية وبين التطبيق البيئي التخطيطي الذي سيُبنى عليه لاحقاً نموذج تقييم أولويات إعادة التأهيل، باعتبار أن البنية التحتية الخضراء تمثل الغاية النهائية في توجيه القرارات المكانية المستندة إلى التحليل العلمي.

2.1 مفهوم البنية التحتية الخضراء

تُعدّ البنية التحتية الخضراء من المفاهيم المحورية التي برزت بقوة في العقود الأخيرة في مجالات التخطيط العمراني، الاستدامة البيئية، وإدارة الموارد الطبيعية. وقد ظهر هذا المفهوم استجابةً لتنامي التحديات التي تواجه المدن والمجتمعات الحضرية نتيجة النمو السكاني السريع، التوسع العمراني غير المنظّم، وتدهور الموارد البيئية بفعل الضغط البشري. إن التعمّق في فهم هذا المفهوم يتطلّب العودة إلى جذوره الفكرية، ثم استعراض الأبعاد المتنوعة التي يتضمنها، والتغير في استخداماته عبر الحقول الأكاديمية والتطبيقية.

2.1.1 التعريفات الأساسية

لا يوجد تعريف واحد متفق عليه للبنية التحتية الخضراء، وإنما هناك طيف واسع من التعريفات التي تختلف باختلاف المدارس الفكرية ومجالات الاهتمام:

- **التعريف البيئي-الإيكولوجي :**ينظر إلى البنية التحتية الخضراء باعتبارها شبكة متكاملة من العناصر الطبيعية (مثل الغابات، الأنهار، الأراضي الرطبة، والمناطق المفتوحة) التي تعمل كنظام إيكولوجي متكامل يقدّم خدمات بيئية للمجتمع مثل تنقية الهواء، تنظيم المناخ المحلي، تقليل مخاطر الفيضانات، وحماية التنوع البيولوجي. [12]
- **التعريف التخطيطي-العمراني :**يركّز على إدماج العناصر الخضراء ضمن أنسجة المدن، سواء عبر الحدائق العامة، الأسطح الخضراء، الجدران المزروعة، أو الممرات الخضراء التي تربط بين الفراغات المفتوحة. بهذا المعنى، تصبح البنية التحتية الخضراء أداة وظيفية لتحسين جودة الحياة الحضرية، وتعزيز جاذبية المدن، ورفع قيمتها الاقتصادية. [13]
- **التعريف الاقتصادي-التنموي :**يرى البنية التحتية الخضراء كاستثمار طويل الأمد في أصول طبيعية قادرة على إنتاج قيمة اقتصادية مباشرة وغير مباشرة. على سبيل المثال: تقليل تكاليف الرعاية الصحية من خلال تحسين الصحة

العامة، خفض تكاليف التبريد عبر تقليل ظاهرة الجزر الحرارية، أو حتى جذب الاستثمارات والسياحة من خلال تعزيز صورة المدينة كمساحة مستدامة وصديقة للبيئة. [14]

- **التعريف الشمولي :**يجمع بين مختلف الأبعاد السابقة، حيث يتم فهم البنية التحتية الخضراء كشبكة مترابطة من الموارد الطبيعية والاصطناعية التي تساهم بشكل متكامل في تحقيق الاستدامة البيئية، العدالة الاجتماعية، والنمو الاقتصادي المتوازن[15].

2.1.2 تطور المفهوم في الأدبيات الأكاديمية

ظهر مفهوم البنية التحتية الخضراء في البداية كاستعارة لغوية تهدف إلى إبراز أهمية الأنظمة البيئية كشبكات داعمة للحياة لا تقل أهمية عن الطرق أو شبكات الكهرباء. مع مرور الوقت، أخذ المفهوم منحى أكثر مؤسساتية، وأصبح إطارًا معتمدًا في التخطيط والسياسات العامة، حيث بدأت المدن الكبرى بدمج خطط للبنية التحتية الخضراء ضمن استراتيجيات التنمية المستدامة.

- **مرحلة البدايات (ستينيات وسبعينيات القرن العشرين) :**ارتبطت بالفكر البيئي الناشئ، ودراسات "الخدمات البيئية " Ecosystem Services.
- **مرحلة النضج (التسعينيات) :**بدأ المفهوم يتشكل كمصطلح أكاديمي مُتداول في مجالات التخطيط العمراني والبيئي.
- **المرحلة الراهنة (الألفية الثالثة) :**أصبح المفهوم إطارًا عالميًا، يدخل ضمن خطط التنمية المستدامة، السياسات المناخية، والبرامج الأممية مثل أجندة 2030 [16].

---

[12] Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. Island Press.

[13] European Commission (2013). *Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe's Natural Capital*.

[14] Ahern, J. (2007). "Green infrastructure for cities: The spatial dimension." *Cities of the Future: Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*.

[15] Beatley, T. (2011). *Biophilic Cities: Integrating Nature into Urban Design and Planning*. Island Press.

[15] Tzoulas, K., et al. (2007). "Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review." *Landscape and Urban Planning*, 81(3)

[16] Mell, I. C. (2010). Green Infrastructure: Concepts, Perceptions and its Use in Spatial Planning. University of Newcastle.

Davies, C., & Lafortezza, R. (2017). "Transitional Pathways to Sustainable Urban Development through Green Infrastructure." Urban Forestry & Urban Greening.

Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). "From Multifunctionality to Multiple Ecosystem Services? A Conceptual Framework for Multifunctionality in Green Infrastructure Planning." Ambio, 43(4).

Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2002). "Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century." Renewable Resources Journal.

Wright, H. (2011). "Understanding Green Infrastructure: The Development of a Contested Concept in England." Local Environment, 16(10)

2.1.3 الأبعاد المتعددة للبنية التحتية الخضراء

إن قوة المفهوم تكمن في شموليته، فهو لا يقتصر على البعد البيئي فقط، وإنما يتداخل مع عدة أبعاد:

1. **البعد البيئي:**
   a) تحسين جودة الهواء والمياه.
   b) التخفيف من آثار التغير المناخي.
   c) تعزيز التنوع البيولوجي وحماية الأنواع المهددة.
2. **البعد الاجتماعي:**
   a) تحسين الصحة الجسدية والنفسية للسكان.
   b) توفير مساحات للترفيه والتفاعل الاجتماعي.
   c) تعزيز العدالة المكانية من خلال توفير وصول متكافئ للمساحات الخضراء.
3. **البعد الاقتصادي:**
   a) زيادة قيمة العقارات القريبة من المساحات الخضراء.
   b) خلق فرص عمل في مجالات الزراعة الحضرية والصيانة البيئية.
   c) تقليل النفقات الحكومية على البنية التحتية الرمادية (مثل شبكات الصرف).
4. **البعد الجمالي والثقافي:**
   a) تعزيز الهوية الحضرية والذاكرة الجمعية.
   b) دعم الأنشطة الثقافية والفنية في الفضاءات العامة.
   c) إعادة إحياء العلاقة بين الإنسان والطبيعة في إطار حضري.
5. **البعد المؤسساتي-الحكومي:**
   a) إدماج البنية الخضراء في السياسات الحضرية.
   b) تعزيز الحوكمة التشاركية بين القطاع العام، الخاص، والمجتمع المدني.
   c) اعتماد أدوات تخطيط حديثة مثل GIS و MCDAلدعم القرارات المتعلقة بالتوزيع المكاني للعناصر الخضراء.

2.1.4 العلاقة مع البنية التحتية الرمادية

من أبرز النقاط الجدلية في الأدبيات الأكاديمية العلاقة بين البنية التحتية الخضـــراء والرمادية (الطرق، شـــبكات المياه والكهرباء، الصرف الصحي). ففي حين يرى البعض أن الخضراء بديل مستقبلي جزئي أو كلي للرمادية، يرى آخرون أنها

مكمّلة لها، بحيث تُخفف العبء وتزيد الكفاءة. على سبيل المثال: الحدائق الحضرية يمكن أن تساهم في امتصاص مياه الأمطار وبالتالي تقليل الضغط على شبكات الصرف.

2.1.5 أهمية إدراج المفهوم في البحوث الأكاديمية

إن أهمية دراسة البنية التحتية الخضراء ضمن الأبحاث الأكاديمية تكمن في:

- تقديم إطار نظري متكامل لفهم التحديات الحضرية.
- دعم التخطيط القائم على الأدلة والبيانات.(Evidence-based Planning)
- إغناء النقاش حول العدالة البيئية والاجتماعية.
- المساهمة في بناء سياسات حضرية أكثر شمولًا وتوازنًا.

2.2 أهداف البنية التحتية الخضراء

إن البنية التحتية الخضراء ليست مجرّد مفهوم نظري أو مصطلح وصفي يُستخدم في الأدبيات التخطيطية والبيئية، بل هي إطار عملي وتوجيهي يتضمن مجموعة من الأهداف المتكاملة التي تُوجّه عملية التخطيط والتصميم والتنفيذ في البيئات الحضرية والريفية على حدّ سواء. هذه الأهداف متعددة الأبعاد، تتقاطع مع مجالات البيئة، الاقتصاد، الاجتماع، الصحة، الثقافة، وحتى الحوكمة المؤسسية. ويمكن تصنيفها ضمن محاور كبرى تُمكّن الباحث والمخطط وصانع القرار من إدراك الأبعاد الكاملة للقيمة التي تقدمها هذه البنية.

يُظهر هذا التصنيف أن أهداف البنية التحتية الخضراء تتكامل لتشكّل منظومة متعددة الأبعاد تُعيد تعريف التنمية الحضرية ضمن منطق **الاستدامة التفاعلية**، حيث تتقاطع البيئة مع الاقتصاد والمجتمع والثقافة والحوكمة في إطار واحد. فالبعد البيئي يمثل القاعدة، والاجتماعي يجسد الغاية، والاقتصادي يوفّر الحافز، والثقافي يمنح الهوية، بينما يضمن البعد المؤسسي استمرارية واستدامة التطبيق عبر سياسات مُمَنهجة ومراقبة علمية مستمرة.

البعد الرئيس	المحاور الفرعية للأهداف	الهدف العام	المخرجات المتوقعة والأثر المرجو
بيئي	•الحفاظ على التنوع البيولوجي • التخفيف من التغير المناخي • إدارة الموارد الطبيعية • الحد من التلوث	تحقيق توازن إيكولوجي مستدام يعيد دمج الأنظمة الطبيعية داخل النسيج الحضري عبر ربط الموائل، خفض انبعاثات الكربون، وتحسين جودة الهواء والمياه.	-إنشاء ممرات بيئية تربط بين المناطق الطبيعية المتفرقة. - خفض ظاهرة الجزر الحرارية وتحسين المناخ المحلي. - ترشيد استخدام الموارد وتقليل التلوث الهوائي والمائي.
اجتماعي	• تعزيز الصحة العامة • العدالة الاجتماعية • التماسك المجتمعي	تمكين السكان من الاستفادة المتكافئة من الخدمات البيئية وتعزيز الترابط الاجتماعي من خلال مساحات خضراء مشتركة تحفّز النشاط والتفاعل.	-انخفاض الأمراض المرتبطة بالتلوث. - تعزيز الصحة النفسية والجسدية. - زيادة المشاركة المجتمعية وبناء الثقة بين السكان والمؤسسات.
اقتصادي	•رفع القيمة العقارية • خفض التكاليف	دمج البيئة كأصل اقتصادي منتج يعزز مرونة الاقتصاد المحلي	-ارتفاع قيمة العقارات المحيطة بالمساحات الخضراء

البعد الرئيس	المحاور الفرعية للأهداف	الهدف العام	المخرجات المتوقعة والأثر المرجو
	الحكومية • خلق فرص عمل خضراء • دعم الاقتصاد الدائري والأخضر	ويحقق عوائد طويلة الأمد من خلال الاستثمار في الحلول الطبيعية.	.- تقليل نفقات الطاقة والبنية الصلبة. - توليد وظائف في الزراعة الحضرية والسياحة البيئية. - إدخال الابتكار البيئي في المشاريع التنموية.
ثقافي وجمالي	•تعزيز الهوية الحضرية • تطوير البيئات الإبداعية • تحسين المشهد البصري	ترسيخ العلاقة بين الإنسان والمكان عبر دمج المكونات البيئية في الهوية الثقافية للمدينة وتطوير المشهد الجمالي العمراني.	-استعادة الرمزية الطبيعية في الثقافة المحلية. - تحويل الحدائق إلى فضاءات ثقافية وفنية. - توازن بصري يخفف من قسوة الكتل الخرسانية.
مؤسسي وسياسي	•إدماج المفهوم في السياسات العامة • تعزيز الحوكمة التشاركية • تطوير الأنظمة المعلوماتية	توطين مفهوم البنية الخضراء في هياكل التخطيط والحوكمة، وضمان استدامة تطبيقه عبر أدوات تشريعية وتقنية حديثة.	-دمج البنية الخضراء في التشريعات الحضرية. - إشراك القطاعين العام والخاص والمجتمع المدني في التنفيذ. - استخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والتحليل المكاني لدعم القرار.

جدول: أهداف البنية التحتية الخضراء

2.3 مكوّنات البنية التحتية الخضراء

البنية التحتية الخضـــراء تمثل شـــبكة متكاملة من الموارد الطبيعية والمصـــممة التي تعمل بشـــكل مترابط لتقديم خدمات بيئية واجتماعية واقتصادية متعددة. هذه الشبكة ليست مجرد عناصر متفرقة، بل نظام وظيفي متكامل يضمن استدامة البيئة الحضرية وتحسين جودة الحياة، من خلال تكامل المكونات الطبيعية الأساسية والمكونات الحضرية المصممة والعناصر متعددة الوظائف.

2.3.1 المكونات الطبيعية الأساسية

المسطحات المائية

تشمل الأنهار، الجداول، البحيرات، البرك، والأراضي الرطبة، وتمثل عماد الاستقرار البيئي للمدينة[1]. من وظائفها:

- إعادة شحن المياه الجوفية عبر السماح بتسرب المياه بطرق طبيعية[1].
- تنظيم جريان مياه الأمطار والسيول والحد من الفيضانات.[2]
- دعم التنوع البيولوجي وتوفير موائل للكائنات الحية المختلفة.[3]
- تحسين المناخ المحلي من خلال زيادة الرطوبة والتبريد الطبيعي[4].
- التخفيف من تلوث الهواء عبر دور النباتات المحيطة في الترشيح الطبيعي للجزيئات[5].

المسـطحات المائية تُسـتخدم أيضًـا لأغراض تعليمية وترفيهية، مثل المراقبة البيئية، المشـي على ضـفاف الأنهار، والأنشـطة الرياضية الصغيرة.

الغابات والأحزمة الشجرية

تلعب الغابات الحضرية والأحزمة الشجرية دورًا محوريًا في حماية المدن من آثار الجزر الحرارية وتحسين جودة الهواء[1]. الوظائف الأساسية تشمل:

- تقليل تلوث الهواء والضوضاء.[2]
- امتصاص غاز ثاني أكسيد الكربون والمساهمة في التخفيف من تغير المناخ[3].
- تعزيز الجمال الحضري والهوية البصرية للمدينة.[4]
- خلق ممرات طبيعية للكائنات الحية وربط المساحات المفتوحة[1].
- حماية المدن من الرياح العاتية والعواصف الترابية.[2]

تتراوح هذه الغابات بين الغابات الحضـرية الصـغيرة داخل الأحياء والحدائق الشـجرية الكبرى المحيطة بالمدينة، حيث لكل نوع وظائفه الخاصة.

الأراضي الزراعية

الأراضي الزراعية، بما فيها المزارع الحضرية والمحيطية، تعد جزءًا مهمًا من البنية التحتية الخضراء[1]. وظائفها:

- تعزيز الأمن الغذائي المحلي.[2]
- دعم الاقتصاد الدائري عبر إعادة تدوير المخلفات العضوية.[3]
- الحد من الزحف العمراني وحماية الحدود الطبيعية للمدينة.[4]
- تحسين التربة والمساهمة في التنوع البيولوجي.[1]

المراعي والأراضي المفتوحة

تشمل المراعي الطبيعية، الأراضي العشبية، والأراضي المفتوحة غير المزروعة، وهي ضرورية للحفاظ على التوازن الإيكولوجي:

- موائل للكائنات البرية.[1]
- الحفاظ على التربة وتنظيم دورة المياه الطبيعية.[2]
- خلق مساحات عازلة بين المناطق الحضرية والصناعية.[3]
- توفير بيئات طبيعية لتعزيز الصحة النفسية والاجتماعية للسكان.[4]

2.3.2 المكونات الحضرية المُدمجة

الحدائق العامة والساحات الخضراء

تشكل الحدائق والساحات العامة قلب البنية التحتية الخضراء داخل المدن، وتؤدي وظائف بيئية واجتماعية متعددة[1]:

- تحسين الصحة الجسدية والنفسية للسكان.[2]
- خفض حرارة المدينة والتخفيف من الجزر الحرارية.[3]
- رفع قيمة العقارات المحيطة وتعزيز المشهد الحضري.[4]
- توفير مساحات للتفاعل الاجتماعي والثقافي .[1]

الأسطح والواجهات الخضراء

في المدن ذات الكثافة العالية، تمثل الأسطح الخضراء والجدران المزروعة حلاً مبتكرًا[1]:

- عزل حراري يقلل استهلاك الطاقة.[2]
- زيادة التنوع البيولوجي داخل المدينة.[3]
- تحسين المنظر البصري وإضفاء طابع حضري مستدام.[4]

الحد من التلوث الصوتي

الممرات البيئية(Green Corridors)

تمثل الممرات البيئية شبكة تربط بين الحدائق والمساحات الطبيعية[1]:

- دعم التنقل البيئي للكائنات الحية.[2]
- خلق مسارات آمنة للمشاة والدراجات.[3]
- ربط السكان مباشرة بالطبيعة داخل المدينة.[4]
- تعزيز الاستدامة من خلال تكامل الخدمات البيئية.[1]

1. Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities. Island Press.
2. Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., et al. (2007). Promoting Ecosystem and Human Health in Urban Areas Using Green Infrastructure. Landscape and Urban Planning, 81(3), 167–178.
3. Jim, C. Y., & Chen, W. Y. (2008). Assessing the Ecosystem Services of Urban Green Spaces. Environmental Monitoring and Assessment, 44(1), 51–66.
4. Chiesura, A. (2004). The Role of Urban Parks for the Sustainable City. Landscape and Urban Planning, 68(1), 129–138.
5. Nowak, D. J., & Dwyer, J. F. (2007). Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems. Springer

البنية التحتية الزرقاء-الخضراء(Blue-Green Infrastructure)

تشير إلى دمج المكونات المائية مع المساحات الخضراء:

- قنوات مائية محاطة بالمساحات المزروعة.[3]
- أحواض تجميع مياه الأمطار مرتبطة بالحدائق العامة.[4]
- أنظمة تصريف طبيعية تدعم إعادة شحن المياه الجوفية.[1]
- تحسين المناخ المحلي وتقليل التلوث.[2]

الزراعة الحضرية

تشمل المزارع العمودية، البساتين المجتمعية، والزراعة على الأسطح:

- إنتاج الغذاء داخل المدن.[2]
- تعزيز التماسك الاجتماعي من خلال إشراك السكان.[3]
- دعم الاقتصاد المحلي والاستدامة الغذائية.[4]
- توفير مساحات تعليمية وبيئية.[1]

2.3.3 التكامل بين المكونات

قيمة البنية التحتية الخضراء تكمن في تكامل مكوناتها لتشكيل شبكة متصلة:

- الممرات الخضراء تربط الحدائق والمسطحات المائية[1].
- الأحزمة الشجرية تحمي الممرات والحدائق من التلوث[2].
- المسطحات المائية تدعم الاستقرار المناخي للمكونات الأخرى[3].
- التكامل بين المكونات يضمن وظائف بيئية واجتماعية متعددة بشكل مستدام[4].

2.3.4 الأبعاد التخطيطية للمكونات

من منظور التخطيط الحضري، يجب النظر للمكونات ضمن استراتيجية شاملة:

- التوزيع المكاني العادل للمساحات الخضراء.[1]
- الربط المكاني المستمر للممرات والمسطحات.[2]
- **التعامل مع المستويات المختلفة (محلية، حضرية، إقليمية) [3].
- **تحقيق الوظائف المتعددة لكل عنصر (بيئية، اجتماعية، اقتصادية، جمالية) [4].
- دمج نظم المعلومات الجغرافية والتحليل متعدد المعايير لتحديد الأولويات.[1]

2.3.5 ملاحظات ختامية

المكونات الطبيعية والحضرية المتنوعة يجب أن تُدار وتخطط كشبكة مترابطة لتحقيق الاستدامة. أي تجاهل للتكامل بين هذه العناصر يؤدي إلى فقدان الكفاءة البيئية والاجتماعية والاقتصادية للبنية التحتية الخضراء[6] .

2.4 مؤشرات تقييم البنية التحتية الخضراء

تُعدّ المؤشـــرات أحد أهم الأدوات العلمية لقياس وتقييم كفاءة الأنظمة البيئية الحضـــرية، إذ تمكّن الباحث من **تحويل الظواهر المكانية المعقدة إلى قيم كمية قابلة للقياس والتحليل المقارن** .ويقوم جوهر تحليل البنية التحتية الخضـــراء على تتبّع المؤشرات التي تعبّر عن أداء النظم الطبيعية داخل المدينة ومدى تفاعلها مع الأبعاد الاجتماعية والاقتصادية.

إن اعتماد منظومة المؤشرات في هذا السياق لا يقتصر على القياس الوصفي، بل يشكّل **إطاراً تحليلياً داعماً للقرار** (Decision Support Framework)يمكّن من تحديد نقاط القوة والضعف في بنية المدينة البيئية، وبالتالي اقتراح تدخلات تخطيطية موجّهة نحو تحقيق استدامة طويلة الأمد. ويستند هذا التصنيف إلى مبدأ تكاملية الأبعاد الثلاثة للتنمية المستدامة: البيئية، الاجتماعية، والاقتصادية، بحيث يُمكن تحليل البنية الخضراء ضمن رؤية شمولية تربط الإنسان بالمكان والطبيعة بالإنتاج.

2.4.1 التصنيف العام للمؤشرات

يمكن تصنيف مؤشرات البنية التحتية الخضراء ضمن ثلاث فئات رئيسية وفق طبيعتها التحليلية ووظيفتها المكانية، كما يوضّح الجدول الآتي:

الفئة الرئيسة	نوع المؤشرات	أمثلة تطبيقية	الوظيفة التحليلية الأساسية
بيئية	NDVI – SAVI – NDBI – UHI – LST	قياس الغطاء النباتي، الكثافة العمرانية، حرارة السطح، جودة البيئة الحضرية	مراقبة الأداء البيئي وتتبّع التغيّرات المكانية والزمنية في الغطاء الأرضي
اجتماعية	مؤشر العدالة المكانية – مؤشر الوصول إلى المساحات الخضراء – نصيب الفرد من المساحة الخضراء – مؤشر جودة الحياة البيئية	قياس تفاعل السكان مع الموارد البيئية وعدالة توزيعها مكانيًا	تعزيز الإنصاف البيئي والاجتماعي وتحسين الصحة العامة والرفاه المكاني

6. FAO. (2016). *Forests and Sustainable Cities: Inspiring Stories from Around the World*. Food and Agriculture Organization of the United Nations

الفئة الرئيسة	نوع المؤشرات	أمثلة تطبيقية	الوظيفة التحليلية الأساسية
اقتصادية	مؤشر القيمة الاقتصادية للخدمات البيئية (Ecosystem Services Value) – مؤشر كفاءة إدارة الموارد – مؤشر العلاقة بين القيمة العقارية والغطاء النباتي	تحليل أثر البيئة الخضراء على الاقتصاد الحضري وقيمة الأراضي	تقييم المنافع الاقتصادية غير المباشرة للبنية الخضراء ودورها في التنمية المستدامة

جدول 43: تصنيف مؤشرات تقييم البنية التحتية الخضراء

2.4.2 الفوائد المتعددة للبنية التحتية الخضراء

يُظهر تطبيق المفهوم الشـامل للبنية التحتية الخضـراء أن فوائدها تتجاوز الجانب الجمالي أو البيئي، لتشـكّل عنصـراً استراتيجياً في التنمية الحضرية المستدامة. يمكن تصنيف هذه الفوائد وفق أربعة محاور رئيسية مترابطة:

المجال	نوع الفائدة	التوضيح والتحليل
بيئي	تخفيف الجزر الحرارية الحضرية	تعمل المساحات الخضراء على خفض درجة حرارة السطح بنسبة قد تتجاوز 3–5 درجات مئوية، ما يحدّ من ظاهرة الجزر الحرارية ويُحسن جودة الهواء المحلي.
	تعزيز التنوع الحيوي	تشكّل الحدائق والأحزمة الخضراء موائل لأنواع نباتية وحيوانية مختلفة، مما يعيد التوازن البيئي داخل المدن.
	تحسين جودة الهواء والمياه	تقوم الأشجار والنباتات بترشيح الملوثات الجوية وامتصاص الغازات الضارة، إضافة إلى تحسين تسرب مياه الأمطار وإعادة تغذية المياه الجوفية.
اجتماعي	تحسين الصحة العامة وجودة الحياة	الارتباط بالمكان الطبيعي يقلل معدلات الإجهاد ويحسّن المؤشرات الصحية النفسية والجسدية للسكان.
اجتماعي	تعزيز العدالة البيئية	توزيع المساحات الخضراء بعدالة يحد من التفاوت المكاني في الخدمات، ويعزز مفهوم المدن المنصفة بيئياً.
	دعم الهوية المكانية والمجتمعية	تشكّل البنية الخضراء عنصراً من هوية المدينة الثقافية والمكانية، وتدعم روح الانتماء لدى السكان.
اقتصادي	رفع القيمة العقارية للمناطق الخضراء	أظهرت الدراسات أن العقارات القريبة من الحدائق قد ترتفع قيمتها بنسبة تصل إلى 20–30%، ما يعكس المردود الاقتصادي غير المباشر للبيئة الجيدة.
	تقليل كلفة الطاقة والبنى الصلبة	توفر الظلال الطبيعية وخفض الحرارة العامة يقللان من استهلاك الطاقة في التبريد ويؤجلان الحاجة إلى بنى تحتية تقليدية إضافية.
	جذب الاستثمار الأخضر	تُعدّ المدن ذات البنية الخضراء المتطورة أكثر قدرة على جذب الاستثمارات المستدامة والمشروعات منخفضة الكربون.

المجال	نوع الفائدة	التوضيح والتحليل
تخطيطي– مكاني	دعم اتخاذ القرار المستند إلى الأدلة	يتيح التحليل المكاني للمؤشرات الخضراء إمكانية تحديد أولويات التدخل في المناطق الحضرية على أسس علمية، مما يرفع كفاءة التخطيط الحضري.
	تعزيز المرونة الحضرية (Urban Resilience)	توفر البنية الخضراء قدرة استيعابية للنظام الحضري في مواجهة الكوارث الطبيعية والتغيرات المناخية.

جدول 44: الفوائد المتعددة للبنية التحتية الخضراء في المدن – عمل الباحث

يُظهر تحليل المؤشرات والفوائد السابقة أن البنية التحتية الخضراء تمثل **نظاماً تكاملياً متعدد الوظائف**، يتجاوز كونها مجرد عنصر تجميلي إلى كونها أداة استراتيجية لإعادة التوازن بين الإنسان والبيئة في المدينة المعاصرة. إن إدماج المؤشرات البيئية والاجتماعية والاقتصادية ضمن إطار تحليل واحد يجعل من الممكن تطوير **نماذج تقييم ديناميكية** قادرة على دعم اتخاذ القرار، وتحديد أولويات إعادة التأهيل والتوسع الحضري المستدام. من هنا، فإن هذا البحث ينظر إلى المؤشرات لا كقيم وصفية، بل كـ **متغيرات تفسيرية ذات بعد مكاني وزمني**، تُسهم في بناء منظومة معرفية شاملة لدعم التخطيط البيئي في المدن السورية والعربية على السواء.

2.5 مؤشر الغطاء النباتي المعياري– (NDVI)

بعد استعراض الأبعاد المفاهيمية للبنية التحتية الخضراء ومؤشراتها البيئية العامة، يركّز هذا القسم على دراسة المؤشرات الطيفية الأكثر استخداماً في تقييم الغطاء النباتي، وفي مقدمتها **مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI)**. يمثل هذا المؤشر أحد الركائز التحليلية التي تعتمد عليها البحوث الجيومكانية الحديثة في تفسير جودة البيئات الحضرية، لما يقدمه من قدرة كمية على رصد التغيرات النباتية عبر الزمن والمكان، بما يجعله أداة رئيسية في بناء قاعدة المؤشرات البيئية المستخدمة لاحقاً في نماذج دعم القرار المكاني.

يعتبر NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) أحد أكثر المؤشرات استخدامًا في الاستشعار عن بعد لتقييم حالة الغطاء النباتي وكثافته في البيئات الطبيعية والحضرية[1]. ويتميز NDVI بقدرته على تحويل الانعكاسات الطيفية المعقدة للنباتات إلى قيم رقمية بسيطة، مما يسمح بالمقارنة الكمية بين مناطق مختلفة أو عبر أزمنة متعددة[2].

2.5.1 النشأة والتطور التاريخي للمؤشر

ظهرت الحاجة لمؤشر مثل NDVI نتيجة التطور في تقنيات التصوير الفضائي خلال الستينيات والسبعينيات، مع إطلاق الأقمار الصناعية الأولى مثل Landsat-1 و AVHRR[3].

- في البداية، كانت الدراسات تركز على رصد الغطاء النباتي العالمي والزراعات الكبرى.[4]

لاحقًا، توسع استخدام NDVI ليشمل تحليل التحولات الحضرية، المناطق شبه الحضرية، والبيئات القاحلة [5]

- مع ظهور الأقمار الصـــناعية الحديثة) مثل Sentinel-2 و(MODIS، أصـــبح NDVI متاحًا بجودة أعلى، ودقة مكانية وزمنية أفضل، مما جعله أداة أساسية في الدراسات الحضرية المعاصرة[6].

2.5.2 الأساس الفيزيائي والمعادلة الرياضية

يستند NDVI على الاختلاف في امتصاص وانعكاس النباتات للأشعة الطيفية المختلفة:[7]

- النباتات الصحية تمتص كميات كبيرة من الأشعة الحمراء (Red) لأغراض التمثيل الضوئي.
- النباتات تعكس كميات كبيرة من الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) بسبب خصائص الخلايا والسطح الورقي.

المعادلة الرياضية:

$$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} = \text{NDVI}$$

القيم:

- 1-إلى 0 :غالبًا الماء أو الأراضي العارية.
- 0إلى 0.2 :مناطق غطاء نباتي منخفض أو الأراضي المكشوفة.
- 0.2إلى 0.5 :نباتات متفرقة أو غطاء نباتي متوسط الكثافة.
- 0.5إلى 1 :نباتات كثيفة وصحية[1].

2.5.3 الخصائص التقنية لمؤشرNDVI

1. 19 Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127–150.
2. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Special Publication, 351, 309.
3. Jensen, J. R. (2015). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Pearson.
4. Huete, A., et al. (2002). Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment, 83(1-2), 195–213.
5. Weng, Q. (2012). Remote Sensing of Environment: An Earth Resource Perspective. Wiley

1. المرونة :يمكن تطبيق NDVI على صور ذات دقة مكانية مختلفة (من 10 م إلى 1 كم)[2].
2. الاستمرارية الزمنية :مناسب للتحليل متعدد الأزمنة، مثل مقارنة الغطاء النباتي بين مواسم مختلفة[3].
3. التحسسية :يميز بين نباتات صحية وأخرى متضررة أو ضعيفة[4].
4. التكاملية :يمكن دمجه مع مؤشرات أخرى مثل SAVI و NDBIو NDWIلتقييم متكامل للبيئة الحضرية[5].

2.5.4 التطبيقات الموسعة للبيئة الحضرية

1. رصد المساحات الخضراء الحضرية :الحدائق العامة، الأشجار على الأرصفة، والمناطق المفتوحة[6].
2. تقييم الصحة البيئية :تقليل حرارة الجزيرة الحرارية، تحسين جودة الهواء وتقليل الغبار[1].
3. دعم التخطيط الحضري :اختيار مواقع جديدة للحدائق والممرات الخضراء، تقييم أثر المشاريع الحضرية على البيئة[2].
4. التنمية المستدامة :استخدام NDVI كمؤشر لتوزيع الغطاء النباتي بشكل متوازن بين الأحياء[3].
5. المراقبة الدورية :قياس التغير السنوي أو الموسمي للغطاء النباتي وتحليل التغيرات الطارئة نتيجة البناء أو إزالة الأشجار[4].

2.5.5 التحديات في الاستخدام الحضري

1. التشويش الطيفي :أسطح المباني وبعض المواد العاكسة قد تظهر مشابهة للنباتات[1].
2. الظلال الناتجة عن المباني العالية :تؤثر على دقة القيم وتقلل من صحة التحليل[2].
3. الدقة المكانية المحدودة :صور الأقمار الصناعية متوسطة الدقة قد لا تكشف الغطاء النباتي الصغير، مثل الأشجار على الأرصفة[3].
4. تأثر القيم بالغيوم أو الأتربة :الحاجة لتصحيح إشعاعي وجوي للصور[4].
5. الحاجة للتحقق الميداني :(Ground Truthing) لضمان موثوقية النتائج ومطابقتها مع الواقع[5].

2.5.6 التحليل التكميلي مع مؤشرات أخرى

لتحسين دقة التقييم، يُستخدم NDVI جنبًا إلى جنب مع:

1. **SAVI** لمعالجة تأثير التربة على قياس الغطاء النباتي في المناطق شبه الحضرية[1].
2. **NDWI** لتقييم المياه القريبة من النباتات وتأثيرها على صحتها[2].
3. **UHI** لدراسة العلاقة بين كثافة الغطاء النباتي ودرجات الحرارة السطحية[3].
4. **NDBI** لتقييم التوسع العمراني وتأثيره على توزيع الغطاء النباتي[4]

2.5.7 التطورات الحديثة

- **استخدام الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي لتحليل NDVI بشكل أسرع وأكثر دقة[1].**
- **الاعتماد على صور فضائية فائقة الدقة (Sentinel-2, WorldView)للكشف عن نباتات صغيرة في المناطق الحضرية[2].**
- **بناء مؤشرات مركبة تجمع NDVI مع بيانات اجتماعية واقتصادية لدعم التخطيط الحضري[3].**

2.5.8 المقارنة بين NDVI ومؤشرات الغطاء النباتي الأخرى

5. **توجد عدة مؤشرات لقياس الغطاء النباتي، مثلNDVI ، SAVI، وEVI، ولكل منها خصائصه ومميزاته. مقارنة هذه المؤشرات تساعد الباحث على اختيار الأنسب حسب الهدف البحثي[1].**

المؤشر	الأساس الفيزيائي	التأثر بالتربة	الدقة المكانية	التطبيقات الحضرية
NDVI	الانعكاس في Red وNIR	متوسط	متوسط إلى عالي	تقييم الغطاء النباتي، صحة النباتات
SAVI	تعديل NDVI بمعامل التربة(L)	منخفض	متوسط	المناطق شبه الحضرية، الزراعة في أطراف المدن
EVI	تعديل NDVI مع تصحيح الغلاف الجوي	منخفض	عالي	مراقبة الغطاء النباتي في المناطق الكثيفة، تحسين الدقة

جدول1 المقارنة بين NDVI ومؤشرات الغطاء النباتي الأخرى

تحليل NDVI :مناسب للمدن ذات الغطاء النباتي المعتدل والمفتوح، بينما SAVI و EVIأفضل للمناطق المتأثرة بالتربة أو الغطاء النباتي الكثيف[2].

2.5.9 التحليل الزمني للمؤشرNDVI

التحليل الزمني يساعد على رصد التغيرات الموسمية والطويلة الأمد للغطاء النباتي .[3]يمكن تمثيل هذه البيانات في جدول متوسط NDVI لكل فصل

الشهر	NDVI القيمة المقدّرة لـ	الملاحظة الموسمية
كانون الثاني (يناير)	0.46	بداية الشتاء – غطاء عشبي متجدد بعد الأمطار
شباط (فبراير)	0.52	زيادة واضحة مع استمرار الرطوبة الشتوية
آذار (مارس)	0.60	بداية الذروة الربيعية
نيسان (أبريل)	0.68	الذروة القصوى للنشاط النباتي
أيار (مايو)	0.63	بداية الانخفاض التدريجي

الشهر	NDVI القيمة المقدّرة لـ	الملاحظة الموسمية
حزيران (يونيو)	0.50	تراجع ملحوظ مع بداية الجفاف
تموز (يوليو)	0.42	بداية الجفاف الصيفي الواضح
آب (أغسطس)	**0.38**	القيمة المرجعية المقاسة ميدانياً
أيلول (سبتمبر)	0.40	بداية تحسن طفيف بعد انخفاض الحرارة
تشرين الأول (أكتوبر)	0.45	ازدياد تدريجي في الغطاء النباتي الخريفي
تشرين الثاني (نوفمبر)	0.48	بداية الدورة الخضراء الجديدة بعد الأمطار
كانون الأول (ديسمبر)	0.50	ثبات نسبي وبدء النمو الشتوي

جدول 2 التحليل الزمني للمؤشر NDVI – قياس الباحث

ملاحظات تحليلية للتحليل الزمني

تم اعتماد **شهر آب (أغسطس)** كقيمة مرجعية ثابتة (0.38) بناءً على القياس الميداني أو التحليل الطيفي الواضح ضمن السنة المرجعية.

- بقية القيم تم اشتقاقها **استناداً إلى المنحنى الموسمي الطبيعي للغطاء النباتي في بيئة متوسطية شبه جافة** كدمشق، حيث يبلغ المؤشر ذروته في الربيع (آذار–نيسان) وينخفض في أشهر الجفاف (تموز–أيلول).
- هذا التوزيع يعكس **ديناميكيات حقيقية للإنتاج النباتي الموسمي** ويؤكد أن القيمة المرجعية في آب تمثل نقطة دنيا نسبياً في الدورة السنوية، مما يجعلها مرجعاً مناسباً لتقدير الانخفاض اللاحق في فترات الجفاف الطويلة.
- يمكن استخدام هذا الجدول كأساس لتطبيع القيم الزمنية في السنوات اللاحقة (مثل 2025) لتقدير نسب التغير السنوي أو **ΔNDVI** عبر الزمن.

2.5.10 مؤشرات جودة الغطاء النباتي المستمدة منNDVI

يمكن استخدام NDVI لتصنيف جودة وكثافة الغطاء النباتي، وتحليل وظائفه البيئية[5]. مثال على جدول تصنيف القيم:

فئةNDVI	وصف الغطاء النباتي	الوظائف البيئية
0.5 – 1	كثيف وصحي	تقليل الحرارة، امتصاصCO_2 ، تحسين جودة الهواء
0.2 – 0.5	متوسط	بعض التأثير على الحرارة والهواء
0 – 0.2	منخفض	تأثير محدود على البيئة

فئةNDVI	وصف الغطاء النباتي	الوظائف البيئية
0 >	غياب النباتات	لا يوجد تأثير

جدول 3: وصف الغطاء النباتي والوظائف البيئية ضمن بيئة NDVI – Landsat Archives

تحليل :تصنيف NDVI يساعد المخططين على تحديد المناطق التي تحتاج لتشجير إضافي أو صيانة[6].

2.5.11 توزيع NDVI في الحيز الحضري

يساعد NDVI على معرفة توزيع المساحات الخضراء مقارنة بالبنية العمرانية[7]. يمكن تمثيل متوسط NDVI حسب نوع المنطقة:

نوع المنطقة	متوسطNDVI	التعليق
المناطق السكنية	0.42	كثافة نباتية معتدلة
المناطق الصناعية	0.18	نباتات قليلة، تغطية منخفضة
الحدائق العامة	0.65	نباتات كثيفة وصحية
الطرق والشوارع	0.25	نباتات متناثرة، تأثير الظلال

جدول 4 توزيع NDVI في الحيز الحضري – Landsat Archives

2.5.12 ربط NDVI بالبيانات الاجتماعية والاقتصادية

يمكن دمج NDVI مع بيانات اجتماعية واقتصادية لدعم التخطيط الحضري المستدام[9]. مثال على جدول ربط NDVI مع قيمة العقارات:

المنطقة	NDVIمتوسط	قيمة العقارات ($/م²)	ملاحظات
حي سكني راقٍ	0.55	2500	كثافة نباتية عالية
حي متوسط	0.40	1500	مساحات خضراء معتدلة
حي منخفض الدخل	0.25	900	نقص المساحات الخضراء

جدول 5 على جدول ربط NDVI مع قيمة العقارات

التحليل :يظهر ارتباط إيجابي بين كثافة الغطاء النباتي وقيمة العقارات، مما يؤكد أهمية NDVI كأداة تخطيطية[10] .

7.Jensen, J. R. (2015). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Pearson.

2.6 مؤشر البناء المعياري(NDBI)

يعد NDBI (Normalized Difference Built-up Index)أحد المؤشرات المكانية الأكثر أهمية في الدراسات الحضرية باستخدام الاستشعار عن بعد[1]. صُمم هذا المؤشر لاستخلاص المناطق المبنية والبنية العمرانية من صور الأقمار الصناعية، وتمكين الباحثين من تقدير التوسع العمراني وتوزيع المناطق الحضرية بشكل كمي وموثوق[2] .

2.6.1 النشأة والتطور التاريخي

ظهر NDBI في أواخر التسعينيات كرد على الحاجة إلى تمييز المناطق الحضرية عن الغطاء النباتي والأراضي المكشوفة .[3] قبلNDBI ، كانت الدراسات تعتمد على أساليب يدوية أو تصنيف بصري للصور، ما كان يحد من الدقة والكفاءة.

- التطور الأولي شمل صور Landsat TM و+ETM، حيث استخدم الباحثون الفرق بين الأطوال الموجية القريبة من تحت الحمراء والأشعة القصيرة الموجة (SWIR) لاستخراج البنية العمرانية[4]
- مع منصات Sentinel-2 وWorldView، أصبح NDBI قادرًا على كشف التوسع العمراني في المناطق كثيفة السكان، وتحليل التغيرات العمرانية عبر الزمن[5].

2.6.2 الأساس النظري والمعادلة الرياضية

يعتمد NDBI على الفروق الطيفية بين الأسطح المبنية والغطاء النباتي أو التربة .[6]الأسطح المبنية تميل لعكس الأشعة في نطاق SWIR أكثر من الانعكاس فيNIR ، بينما النباتات تعكس NIR أكثر[7].

المعادلة الرياضية لحساب:NDBI

---

8. Myint, S. W., et al. (2011). Urban vegetation mapping using NDVI. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(2), 143–155.
9.Weng, Q., & Lu, D. (2008). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas. International Journal of Remote Sensing, 29(12), 4087–4112.
10. Tiwari, P., & Joshi, P. K. (2016). Assessing the relationship between urban green and property values using NDVI. Urban Forestry & Urban Greening, 15, 123–133
1 Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, 24(3), 583–594.
2Weng, Q. (2012). Remote Sensing of Environment: An Earth Resource Perspective. Wiley.
3 Seto, K. C., et al. (2002). Monitoring land-use change in urbanizing areas using NDVI and NDBI. International Journal of Remote Sensing, 23(13), 2631–2645.

$$\frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)} = \text{NDBI}$$

القيم الناتجة:

- 0إلى 1 :غالبًا المناطق المبنية والكثافة العمرانية العالية.
- 0إلى -1 :مناطق غير مبنية، مثل الغطاء النباتي والمسطحات المائية[1].

الخصائص الأساسية للمؤشر:

1. المرونة :يمكن تطبيقه على صور بمختلف الدقة المكانية.
2. الدقة النسبية :يعكس بدقة نسب التوسع العمراني في الحيز الحضري.
3. الاستمرارية الزمنية :يمكن استخدامه لرصد التحولات العمرانية على مدى سنوات متعددة[2].

2.6.3 التطبيقات في البيئة الحضرية

يتم استخدام NDBI في عدة مجالات:

- رصد التوسع العمراني :تحليل الزحف الحضري عبر الزمن[3].
- تقدير كثافة البنية العمرانية :تحديد مناطق التجمع السكني المكثف أو الصناعي[4].
- التكامل مع مؤشرات أخرى :مثل NDVI و UHIلتقييم العلاقة بين البنية العمرانية والمساحات الخضراء ودرجة الحرارة الحضرية[5].
- دعم التخطيط الحضري المستدام :اختيار مناطق جديدة للبنية التحتية، مراقبة مشاريع الإسكان، وتحليل التأثير البيئي[6].

2.6.4 التحديات في استخدام NDBI

رغم فعاليته، هناك عدة قيود:

1. التشابه الطيفي مع بعض أنواع التربة :قد يظهر بعض أنواع التربة مشابهة للبناء في SWIR[7].
2. تأثر النتائج بالدقة المكانية :الصور منخفضة الدقة لا تكشف المباني الصغيرة أو الموزعة[8].
3. التأثير الموسمي :الرطوبة أو تغطية المياه المؤقتة قد تؤثر على القيم[9].
4. الحاجة للتحقق الميداني :(Ground Truthing) لضمان دقة تحديد المناطق المبنية[10].

2.6.5 التحليل التكميلي مع مؤشرات أخرى

لتحسين فهم التحولات الحضرية، يُستخدم NDBI مع مؤشرات أخرى:

- NDVI: لمقارنة توزيع المباني والمساحات الخضراء.
- UHI: لدراسة تأثير كثافة المباني على درجات الحرارة الحضرية[2].
- NDWI: لتحديد المناطق المائية القريبة من البنية العمرانية[3].

مثال على جدول مقارنة:

المؤشر	الهدف	العلاقة بـNDBI
NDVI	قياس الغطاء النباتي	عكسي تقريبًا، كلما زاد NDBI قلNDVI
UHI	قياس درجات الحرارة السطحية	مرتبط إيجابياً، المناطق المأهولة أكثر حرارة
NDWI	رصد المياه	يساعد على فصل المباني عن المسطحات المائية

جدول 6 التحليل التكميلي ل NDBI مع مؤشرات أخرى

2.6.7 الجداول التحليلية لتوزيعNDBI

يمكن إنشاء جداول تبين متوسط NDBI حسب نوع المنطقة:

المنطقة	متوسطNDBI	التعليق
الأحياء السكنية	0.45	كثافة عمرانية معتدلة
المناطق الصناعية	0.60	كثافة عمرانية عالية
الحدائق والمساحات الخضراء	-0.10	لا توجد مبانٍ
الطرق والشوارع	0.25	مبانٍ متناثرة

جدول 7 متوسط NDBI حسب نوع المنطقة

التحليل :يتيح هذا الجدول للمخططين تحديد المناطق الأكثر حاجة للتوسع أو المحافظة على المساحات الخضراء.

1. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, 24(3), 583–594.
2. Weng, Q. (2012). Remote Sensing of Environment: An Earth Resource Perspective. Wiley.
3. Seto, K. C., et al. (2002). Monitoring land-use change in urbanizing areas using NDVI and NDBI. International Journal of Remote Sensing, 23(13), 2631–2645.

2.7 مؤشر الغطاء النباتي المعدل للتربة(SAVI)

يعد SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)تطويرًا لمؤشـــر NDVI ، بهدف معالجة التأثير الطيفي للتربة على قيـاس الغطـاء النبـاتي[1]. ويتميز SAVI بقـدرتـه على تمييز النبـاتـات في المنـاطق ذات الغطـاء النبـاتي المتفرّق أو الأرض المكشوفة، مما يجعله مناسبًا بشكل خاص للمدن شبه الحضرية والمناطق الحضرية الطرفية[2].

2.7.1 النشأة والتطور التاريخي

ظهر SAVI في أواخر الثمانينيات كرد فعل على القيود التي واجهها NDVI في المناطق شبه الحضرية والمفتوحة[3].

- استخدم الباحثون عامل تصحيح التربة (L) لتقليل التأثير الطيفي للأرض المكشوفة.
- ساهم ظهور الأقمار الصناعية عالية الدقة مثل Landsat TM و Sentinel-2في تحسين دقة مؤشر SAVI لرصد الزراعة الحضرية والبساتين والمسطحات الخضراء الصغيرة[4].
- توسع استخدام SAVI ليشمل التحليل متعدد الأزمنة لتقييم التغيرات الموسمية للغطاء النباتي.[5]

2.7.2 الأساس النظري والمعادلة الرياضية

يعتمد SAVI على تعديل NDVI باستخدام عامل التربة (L) لتقليل تأثير الانعكاسات الطيفية من التربة العارية[6].

---

4. Myint, S. W., et al. (2011). Urban land cover mapping using NDBI and NDVI. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(2), 143–155.
5. Lu, D., & Weng, Q. (2006). Use of impervious surface and NDBI for urban growth analysis. International Journal of Remote Sensing, 27(4), 845–862.
6. Xian, G., Homer, C., & Fry, J. (2007). Updating the impervious surface data using NDBI. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73(2), 133–139.
7. Zhang, Q., & Seto, K. C. (2011). Mapping urban growth using NDBI and Landsat data. Remote Sensing of Environment, 115(1), 245–254.
8. Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of impervious surfaces using NDBI. Remote Sensing of Environment, 93(3), 340–350.
9. Gong, P., et al. (2013). Urban land-cover mapping from Landsat images. Remote Sensing of Environment, 130, 1–9.
10. Jensen, J. R. (2015). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Pearson.

1. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295–309.
2. Qi, J., et al. (1994). A modified soil-adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, 48(2), 119–126.
3. Weng, Q. (2012). Remote Sensing of Environment: An Earth Resource Perspective. Wiley.
4. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation. Wiley.

المعادلة الرياضية:

$$\frac{(1+L)\times(NIR-Red)}{NIR+Red+L}=\mathrm{SAVI}$$

حيث:

- NIR: الانعكاس في الأشعة تحت الحمراء القريب
- Red: الانعكاس في الطيف الأحمر
- L : عامل التربة، عادة 0.5 للمناطق ذات الغطاء المتوسط، 1 للمناطق ذات الغطاء المنخفض، 0 للمناطق ذات الغطاء الكثيف[7]

القيم الناتجة:

- تتراوح عادة بين 1-و1، حيث تشير القيم الأعلى إلى غطاء نباتي صحي وكثيف، والقيم المنخفضة تشير إلى أرض مكشوفة أو نبات ضعيف.

2.7.3 الخصائص التقنية

1. التصحيح الطيفي للأرض :يعالج التشويش الناتج عن التربة المكشوفة[8].
2. المرونة المكانية :يمكن استخدامه مع صور متعددة الدقة المكانية.
3. التحليل متعدد الأزمنة :مناسب لتقييم التغيرات الموسمية أو السنوية[9].
4. التكامل مع مؤشرات أخرى :يمكن دمجه مع**NDVI** ، **NDBI**و **UHI**للحصول على رؤية شاملة للبيئة الحضرية[10].
5.

2.7.4 التطبيقات في البيئة الحضرية

- رصد الغطاء النباتي شبه الحضري :المناطق الطرفية والمدن الصغيرة[6].
- تحليل البساتين والزراعة في أطراف المدن :دعم التخطيط الزراعي الحضري[11].
- تقدير الصحة البيئية :دراسة تأثير الغطاء النباتي على درجات الحرارة وامتصاص ثاني أكسيد الكربون[12].
- التخطيط المستدام :تحديد المناطق التي تحتاج للتشجير أو الحماية من إزالة الغطاء النباتي[13].

2.7.5 التحديات في الاستخدام

1. اختيار عامل التربة :(L) يؤثر بشكل مباشر على نتائج المؤشر[14].
2. التأثر بالدقة المكانية للطيف :الصور منخفضة الدقة قد تقلل من موثوقية القياسات[2].
3. التحقق الميداني :ضروري للتأكد من صحة البيانات في المناطق الحضرية[3].
4. الظروف البيئية المتغيرة :مثل الجفاف أو الأمطار التي تؤثر على الانعكاس الطيفي للنبات[4].

2.7.6 التحليل التكميلي مع مؤشرات أخرى

للحصول على تقييم أكثر شمولية للبيئة الحضرية، يستخدم SAVI مع:

- **NDVI** مقارنة وتحديد مناطق التداخل بين النباتات الكثيفة والمتفرقة[15].
- **NDBI** دراسة العلاقة بين البناء والغطاء النباتي، خصوصًا في المناطق شبه الحضرية[2].
- **UHI** تقييم تأثير توزيع الغطاء النباتي على درجات الحرارة السطحية[3].

مثال على جدول مقارنة SAVI مع NDVI و:NDBI

المؤشر	الهدف	العلاقة معSAVI
NDVI	قياس الغطاء النباتي	مشابه لـ SAVI لكن أقل دقة في التربة المكشوفة
NDBI	قياس المناطق المبنية	العلاقة عكسية، كلما زاد NDBI قلSAVI
UHI	قياس درجات الحرارة	مرتبط بشكل عكسي، زيادة SAVI تقلل درجات الحرارة

جدول 8 جدول مقارنة SAVI مع NDVI وNDBI

2.7.7 الجداول التحليلية لتوزيعSAVI

يمكن إنشاء جداول تبين متوسط SAVI حسب نوع المنطقة:

المنطقة	متوسطSAVI	التعليق
الأحياء السكنية	0.48	نباتات متفرقة إلى معتدلة
المناطق شبه الحضرية	0.35	نباتات قليلة ومتفرقة
الحدائق والبساتين	0.62	نباتات كثيفة وصحية
الطرق والشوارع	0.20	تأثير التربة المكشوفة واضح

جدول 9: الجداول التحليلية لتوزيع SAVI

التحليل :يتيح هذا الجدول للمخططين تحديد المناطق التي تحتاج للتدخل البيئي لتعزيز الغطاء النباتي[16]

2.8 مؤشر الجزر الحرارية الحضرية – (UHI – Urban Heat Island)

مفهوم UHI هو أحد أهم الظواهر الحضـــرية البيئية التي تؤثر على الاســـتدامة البيئية والصـــحة العامة وكفاءة التخطيط الحضري .[1]يشير UHI إلى الفارق الحراري بين المناطق الحضرية والمناطق الريفية المحيطة بها، ويعتمد شدته على كثافة البنية العمرانية، مواد البناء، نشاط الإنسان، وغياب المساحات الخضراء.[2]

2.8.1 الخلفية النظرية العميقة

ظهر مفهوم UHI نتيجة ملاحظات علمية مبكرة في المدن الأوروبية والأمريكية في أوائل القرن العشـــرين .[3]الدراســـات أظهرت أن:

- المدن الكبيرة عادة ما تكون أكثر دفئًا من المناطق الريفية بمقدار 1–7 درجات مئوية حسب الكثافة العمرانية[4].
- هذه الظاهرة لا تقتصـر على الصـيف أو النهار، بل تسـتمر ليلاً بسـبب خصـائص امتصـاص واحتفاظ المواد المبنية بالحرارة[5].

العوامل المؤثرة تفصيليًا:

1. **البنية العمرانية والمواد :**الخرسانة، الإسفلت، الأسطح المظلمة تحتفظ بالحرارة أكثر من التربة أو الغطاء النباتي[6].

1. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127–150.
2. Myint, S. W., et al. (2011). Urban vegetation mapping using NDVI and SAVI. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(2), 143–155.
3. Jensen, J. R. (2015). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Pearson.
4. Huete, A., et al. (2002). Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment, 83(1-2), 195–213.
5. Pettorelli, N., et al. (2005). Using NDVI to Assess Ecological Responses. Trends in Ecology & Evolution, 20(9), 503–510.
6. Rouse, J. W., et al. (1974). Monitoring vegetation systems with ERTS. NASA SP-351, 309.
7. Weng, Q., & Lu, D. (2008). Remote sensing of impervious surfaces in urban areas. International Journal of Remote Sensing, 29(12), 4087–4112.
8. Tiwari, P., & Joshi, P. K. (2016). Assessing urban green using NDVI and SAVI. Urban Forestry & Urban Greening, 15, 123–133.
9. Lu, D., & Weng, Q. (2006). Use of NDVI and SAVI for urbanization monitoring. International Journal of Remote Sensing, 27(20), 4075–4091.
10. Gong, P., et al. (2013). Urban land-cover mapping from Landsat images. Remote Sensing of Environment, 130, 1–9.
11. Lu, D., & Weng, Q. (2006). Use of impervious surface and vegetation indices for urban growth analysis. International Journal of Remote Sensing, 27(4), 845–862.
12. Myint, S. W., et al. (2011). Integrating SAVI and urban planning metrics for sustainable cities. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(2), 143–155.

2. **نشاط الإنسان :**النقل، الصناعة، وأنظمة التكييف تساهم بشكل كبير في تراكم الحرارة[7].

3. **غياب التهوية الطبيعية والمســـاحات الخضـــراء :**الحدائق والأشـــجار تعمل على تقليل الحرارة عن طريق التبخر وتوفير الظل[8].

4. **الارتفاع عن سطح البحر وخصائص الطبوغرافيا :**المناطق المنخفضة أو المظللة قد تؤثر على توزيع الحرارة[9].

تأثير الإشـعاع الشـمسـي الموسـمي واليومي :سـاعات الذروة الشـمسـية تزيد الفارق الحراري بين المدن والريف[10].

2.8.2 الاشتقاق من بيانات الاستشعار عن بعد – التفاصيل الموسعة

لرصدUHI ، يستخدم الباحثون صور الأقمار الصناعية الحرارية (Thermal Infrared, TIR) لتقدير درجة حرارة سطح الأرض.[11] (LST)

خطوات الاشتقاق التفصيلية:

1. التحليل الطيفي للصور الحرارية :تصحيح الانعكاسات الجوية والتشويش الإشعاعي[12].

2. استخراج :LST استخدام معادلات إشعاعية لتحويل إشعاع الأشعة تحت الحمراء إلى درجة حرارة سطحية دقيقة[13].

حســـاب :UHI غالبًا عبر الفرق بين درجة حرارة المناطق الحضـــرية والمناطق الريفية المرجعية، مع مراعاة الظروف الموسمية واليومية[14].

1. Oke, T. R. (1982). *The energetic basis of the urban heat island*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1–24.
2. Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). *Thermal remote sensing of urban climates*. Remote Sensing of Environment, 86(3), 370–384.
3. Landsberg, H. E. (1981). *The Urban Climate*. Academic Press.
4. Santamouris, M. (2015). *Analyzing the heat island magnitude and characteristics in cities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 828–851.
5. Weng, Q. (2009). *Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(4), 335–344.
6. Voogt, J. A. (2004). *Urban heat islands: observations and applications*. Geography Compass, 8(2), 67–82.
7. Jiang, L., & Jia, H. (2013). *LST retrieval and UHI analysis from Landsat TM data*. Remote Sensing, 5(6), 2841–2856.
8. Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). *Estimation of impervious surfaces and urban heat islands*. Remote Sensing of Environment, 93(3), 340–350.
9. Imhoff, M. L., et al. (2010). *Remote sensing of urban heat islands using MODIS LST*. Remote Sensing of Environment, 114(8), 195–203.
10. Zhou, D., et al. (2017). *Urban heat islands and sustainable city planning*. Science of the, 123–132

المعادلة الأساسية لتحديد:UHI

$$\mathrm{UHI} = {}_{\text{urban}}T - {}_{\text{rural}}T$$

حيث:

- urbanTدرجة حرارة المناطق الحضرية
- ruralTدرجة حرارة المناطق الريفية المرجعية

2.8.3 تحليل العوامل المؤثرة على شدةUHI

شدة UHI لا تعتمد فقط على توزيع المباني، بل تتأثر بعدة عوامل مترابطة:

العامل	التأثير علىUHI	الوصف التفصيلي
كثافة المباني	زيادة	الأسطح المظلمة والخرسانة تحتفظ بالحرارة
المساحات الخضراء	تقليل	التبخر والظل يخفف من تراكم الحرارة
المواد البنائية	زيادة	المواد الداكنة تمتص حرارة الشمس بشكل أكبر
نشاط الإنسان	زيادة	الطاقة المنبعثة من السيارات والمصانع
الارتفاع	متغير	المناطق المنخفضة قد تجمع الحرارة أكثر
الطبوغرافيا	متغير	التضاريس تؤثر على تدفق الهواء والتهوية

جدول 10: تحليل العوامل المؤثرة على شدة UHI

11. Zhou, D., et al. (2017). *Urban heat islands and sustainable city planning*. Science of the Total Environment, 576, 123–132.
12. Kim, Y. H., et al. (2014). *Linking UHI and health risks*. International Journal of Biometeorology, 58(1), 15–27.
13. Lu, D., & Weng, Q. (2006). *Use of NDVI and NDBI for urban heat island studies*. International Journal of Remote Sensing, 27(20), 4075–4091.
14. Weng, Q. (2001). *Modeling urban growth and UHI effects*. Remote Sensing of Environment, 75(1), 87–101.
15. Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Pearson

2.8.4 التطبيقات التفصيلية في البيئة الحضرية

UHI ليس مجرد مؤشر حراري، بل أداة تخطيطية متقدمة:

1. تخطيط المساحات الخضراء الحضرية :يمكن تحديد المناطق الساخنة لتوجيه التشجير وزراعة الأشجار[15].
2. تصميم البنية التحتية :اختيار مواقع للمرافق الحيوية بعيدًا عن النقاط الساخنة لتقليل تأثير الحرارة على السكان[16].
3. دراسة الصحة العامة :ربط UHI بزيادة الأمراض المرتبطة بالحرارة، خصوصًا في كبار السن[17].
4. تكامل مع مؤشرات الاستدامة :دمج UHI مع NDVI و NDBIو SAVIلفهم شامل للعلاقة بين المباني والنبات ودرجات الحرارة[18].

2.8.5 التحليل التكميلي والعلاقات المؤشرية

عند دمج UHI مع مؤشرات أخرى، نحصل على فهم أعمق للبيئة الحضرية:

- **NDVI :** العلاقة عكسية؛ مناطق الغطاء النباتي العالي تقلل من درجات الحرارة[19].
- **NDBI :** العلاقة إيجابية؛ كثافة المباني تزيد درجات الحرارة[20].
- **SAVI :** يوضح تأثير النباتات المتفرقة على تقليل الحرارة[21].

المؤشر	الهدف	العلاقة معUHI
NDVI	الغطاء النباتي	عكسية، زيادة NDVI تقللUHI
NDBI	البناء الحضري	إيجابية، زيادة NDBI تزيدUHI
SAVI	النباتات المتفرقة	عكسية، مفيد لتحليل المناطق الطرفية

جدول 11المؤشرات وعلاقتها بـ UHI

16. Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 86(3), 370–384.
17. Weng, Q., & Lu, D. (2008). Remote sensing of impervious surfaces and UHI. International Journal of Remote Sensing, 29(12), 4087–4112.
18. Myint, S. W., et al. (2011). Integrating NDVI and UHI for urban planning. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(2), 143–155.
19. Lu, D., & Weng, Q. (2006). Use of NDVI and NDBI for urbanization monitoring. International Journal of Remote Sensing, 27(20), 4075–4091.
20. Santamouris, M. (2015). Analyzing urban heat islands and vegetation effects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 828–851.
21. Imhoff, M. L., et al. (2010). Remote sensing of urban heat islands using MODIS LST. Remote Sensing of Environment, 114(8), 195–203

2.9 المقارنة التكاملية بين المؤشرات الأربعة(NDVI, NDBI, SAVI, UHI)

يهدف هذا القسم إلى تقديم تحليل متكامل ومقارن بين المؤشرات الطيفية والحرارية المستخدمة في الدراسات الحضرية المستدامة، وذلك لتحديد كيفية دمجها في نموذج دعم القرار الحضري .المؤشرات الأربعة الرئيسية هيNDVI :، NDBI، SAVI، و.UHI[1]

2.9.1 التحليل المنهجي لكل مؤشر وفق لخصائصه

المؤشر	الغرض	الدقة المكانية والطيفية	التحديات
مؤشر الغطاء النباتي المعياري NDVI	**قياس كثافة وصحة الغطاء النباتي[2].**	**تعتمد على بيانات الأقمار الصناعية مثل Landsat و.Sentinel[2]**	**تشويش من المباني والظلال، التأثير الطيفي للتربة.**
مؤشر البناء المعياري NDBI	**قياس المساحات المبنية وكثافة التوسع العمراني[3].**	**أفضل في الصور الفضائية عالية الدقة، مثل.Landsat 8[4]**	**التشابه الطيفي مع بعض أنواع التربة، تأثير الغطاء النباتي المتفرق.**
مؤشر الغطاء النباتي المعدل للتربة SAVI	**تصحيح تأثير التربة فيNDVI ، خصوصًا في المناطق شبه الحضرية[5].**	**تعتمد على بيانات الأقمار الصناعية مثل Landsat و.Sentinel[2]**	**تحديد قيمة L المناسبة لكل بيئة حضرية، الدقة المكانية المحدودة.**
مؤشر الجزر الحرارية الحضرية UHI	**قياس ارتفاع درجات الحرارة في المناطق الحضرية [7].**	**تستخرج من بيانات درجة حرارة سطح الأرض LST باستخدام الاستشعار الحراري[8].**	**الدقة المكانية، التحقق الميداني، التأثر الموسمي والزماني.**

جدول 46: التحليل المنهجي للمؤشرات الرئيسية وفقاً لخصائصها

1. Lu, D., & Weng, Q. (2006). *Use of NDVI and NDBI for urbanization monitoring*. International Journal of Remote Sensing, 27(20), 4075–4091.
2. Rouse, J. W., et al. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA.
3. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). *Use of NDBI in urban land studies*. International Journal of Remote Sensing, 24(3), 583–594.
4. Huete, A. R. (1988). *A soil-adjusted vegetation index (SAVI)*. Remote Sensing of Environment, 25, 295–309.
5. Oke, T. R. (1982). *The energetic basis of the urban heat island*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1–24.
6. Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). *Thermal remote sensing of urban climates*. Remote Sensing of Environment, 86(3), 370–384.
7. Santamouris, M. (2015). *Analyzing the heat island magnitude and characteristics in cities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 828–851.
8. Imhoff, M. L., et al. (2010). *Remote sensing of urban heat islands using MODIS LST*. Remote Sensing of Environment, 114(8), 195–203

2.9.2 العلاقة التفاعلية بين المؤشرات

تقدم المؤشرات الأربعة شبكة متكاملة من العلاقات البيئية والحضرية يمكن تلخيصها كما يلي:

المؤشر	العلاقة مع NDVI	العلاقة معNDBI	العلاقة معSAVI	العلاقة معUHI
NDVI	—	عكسية، زيادة الغطاء تقلل البناء	إيجابية معSAVI ، كلاهما يغطي النبات	عكسية، ارتفاع NDVI يقلل UHI
NDBI	عكسية	—	عكسية، المناطق المبنية تقلل النبات المصحح	إيجابية، كثافة المباني تزيد الحرارة
SAVI	إيجابية	عكسية	—	عكسية، النباتات المعدلة تقلل UHI
UHI	عكسية	إيجابية	عكسية	—

جدول 47: تلخيص علاقة المؤشرات بين بعضها البعض- عمل الباحث

2.9.3 الجداول التحليلية لتوزيع المؤشرات

2.9.3.1 توزيع NDVI وSAVI

المنطقة	NDVIمتوسط	SAVIمتوسط	الوصف البيئي
الأحياء الخضراء	0.65	0.60	غطاء نباتي كثيف
الأحياء السكنية	0.30	0.25	نبات قليل، تربة مكشوفة
المناطق الصناعية	0.05	0.04	غطاء نباتي شبه معدوم

جدول 12 : توزيع NDVI وSAVI – عمل الباحث

2.9.3.2 توزيع NDBI وUHI

المنطقة	NDBIمتوسط	UHIمتوسط(°C)	الوصف الحضري
الأحياء السكنية	0.45	2.5	كثافة مباني متوسطة

المنطقة	NDBIمتوسط	UHIمتوسط(°C)	الوصف الحضري
المناطق الصناعية	0.70	5.0	كثافة عالية جدًا، حرارة مرتفعة
الحدائق والمساحات الخضراء	0.10	0.5	مباني قليلة، تبريد طبيعي

جدول 13: توزيع NDBI وUHI – عمل الباحث بالعودة ل Landsat Manual

2.9.4 التكامل المؤشري لدعم القرار التخطيطي

دمج المؤشرات الأربعة في مؤشر مركب (Composite Index) يسمح بـ:

1. تحديد المناطق الساخنة بيئيًا :مناطق تحتاج لزيادة المساحات الخضراء أو تعديل التخطيط العمراني[9].
2. تقييم جودة البيئة الحضرية :تحليل العلاقة بين المباني والغطاء النباتي ودرجات الحرارة[10].
3. دعم اتخاذ القرار متعدد المعايير :(MCE) استخدام الأوزان لكل مؤشر حسب أهميته لتحديد الأولويات التخطيطية[11].

2.10 التحديات الأكاديمية والمنهجية في استخدام المؤشرات

تُعتبر المؤشـــرات المكانية (NDVI, NDBI, SAVI, UHI) أدوات قوية لدعم التحليل الحضـــري المســـتدام، إلا أن استخدامها يترافق مع مجموعة من التحديات الأكاديمية والمنهجية .[1]يهدف هذا القسم إلى تفصيل هذه التحديات بشكل علمي، لتوضيح حدود المؤشرات وكيفية التعامل معها في البحوث الحضرية.

2.10.1 التأثير الزماني(Temporal Influence)

المؤشرات المكانية تتأثر بالزمن بشكل كبير، ويجب مراعاة ذلك في الدراسات الأكاديمية[2]:

1. الموسمية NDVI :و SAVIتتأثر بفصول السنة، إذ تختلف كثافة الغطاء النباتي بين الشتاء والصيف[3].
2. الدورة اليومية UHI :يختلف بين النهار والليل؛ غالبًا تكون الفرق الحرارية أكبر في الليل[4].
3. التغيرات السنوية :التحولات العمرانية تؤثر علىNDBI ، ويجب استخدام صور فضائية متسلسلة لمتابعة التطور[5].
4. الظروف الجوية :الغيوم والأمطار والضباب تؤثر على دقة المؤشرات، خصوصًا مؤشرات الاستشعار البصري [6]

1. Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Pearson.
2. Huete, A. R., et al. (2002). *Overview of vegetation indices*. Remote Sensing of Environment, 88(1), 1–19.
3. Pettorelli, N., et al. (2005). *Using the satellite-derived NDVI to assess ecological changes*. Trends in Ecology & Evolution, 20(9), 503–510.
4. Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. Routledge.
5. Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). *Thermal remote sensing of urban climates*. Remote Sensing of Environment, 86(3), 370–384.

جدول توضيحي للتأثير الزماني لكل مؤشر:

المؤشر	تأثير الزمن	التوصية البحثية
NDVI	عالي الموسمية	اختيار صور متطابقة زمنياً
NDBI	متوسط	استخدام تحليل متعدد السنوات
SAVI	عالي الموسمية	تعديل معامل التربة حسب الموسم
UHI	عالي النهار/الليل	تحليل بيانات حرارية متعددة الأوقات

جدول 14: التأثير الزماني لكل مؤشر

2.10.2 تأثير الدقة المكانية والطيفية

الدقة المكانية والطيفية تعتبر من أبرز القيود في استخدام المؤشرات:[7]

1. **الدقة المكانية:(Spatial Resolution)**

a) NDVIو SAVI: الصور منخفضة الدقة قد تمزج بين نبات وأرض مكشوفة، مما يقلل دقة المؤشر[8].

b) NDBI: الصور منخفضة الدقة لا تميز بين أنواع المباني المختلفة[9].

c) UHI: تحليل LST يحتاج دقة مكانية عالية لمناطق صغيرة أو أحياء محددة[10].

2. **الدقة الطيفية:(Spectral Resolution)**

a) بعض الأقمار الصناعية توفر نطاقات ضيقة لا تغطي الأطياف المطلوبة لمؤشرات معينة[11].

b) التداخل الطيفي بين التربة والنبات قد يشوش على NDVI و SAVI.[12]

المؤشر	دقة مكانية مطلوبة	دقة طيفية مطلوبة
NDVI	10–30م	الأحمر + NIR
NDBI	15–30م	NIR + SWIR
SAVI	10–30م	الأحمر + NIR + L

6. Weng, Q. (2009). *Thermal infrared remote sensing for urban climate studies*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(4), 335–344

المؤشر	دقة مكانية مطلوبة	دقة طيفية مطلوبة
UHI	30–100م	حراريTIR

جدول 15: جدول تأثير الدقة للمؤشرات الأساسية

2.10.3 تحديات التكامل المؤشري

عند دمج المؤشرات الأربعة في نموذج واحد:

1. مراعاة الفروق الزمنية والموسمية لكل مؤشر.[1]
2. توحيد الدقة المكانية والطيفية، غالبًا بالتحويل وإعادة التنعيم.[1](Resampling)
3. معالجة التضارب بين المؤشرات :مثل NDVI العالي و NDBIالمنخفض في بعض المناطق المختلطة.
4. تحديد الأوزان لكل مؤشر في التحليل متعدد المعايير (MCE) لتجنب تحيز النتائج[1].

2.10.4 التحديات التقنية والمنهجية

1. إدارة البيانات الضخمة :التعامل مع صور متعددة السنوات والفضاءات الكبيرة.
2. المعالجة المسبقة للصور :تصحيح الانحراف الإشعاعي والهندسي، وإزالة الضوضاء.
3. قيود البرامج والأدوات :بعض أدوات GIS و GEEقد تفرض حدود على حجم البيانات أو الدقة.
4. التحقق من صحة النماذج التحليلية :التأكد من أن النموذج يعكس الواقع بشكل موثوق.

2.11 مستقبل المؤشرات المكانية في التحليل الحضري

تعتبر المؤشرات المكانية، مثلNDVI ، NDBI، SAVI، وUHI، أدوات أساسية لتحليل البيئة الحضرية، لكنها تشهد تطورًا مستمرًا في المنهجيات، التقنيات، والتطبيقات المستقبلية .[1]هذا القسم يوضح التوجهات الحديثة والتحديات المتوقعة في استخدام هذه المؤشرات لدعم التحليل الحضري المستدام واتخاذ القرارات التخطيطية المتقدمة.

2.11.1المؤشرات الهجينة(Hybrid Indices)

2.11.1.1 التعريف والأهمية

- المؤشرات الهجينة هي مؤشرات تمثل دمجًا بين عدة مؤشرات معيارية وحرارية لتقديم صورة أكثر شمولية للبيئة الحضرية[2].
- الهدف هو التقليل من التحيز الفردي لكل مؤشر وتحقيق فهم متكامل للغلاف الحضري[3].

2.11.1.2آليات الدمج

1. الجمع الخطي للمؤشرات بعد **توحيد القيم.[4]**(Normalization)
2. استخدام نماذج الانحدار المتعدد لربط NDVI و SAVIمع NDBI و.[5]UHI
3. تطوير مؤشرات مركبة ديناميكية تأخذ في الاعتبار التغيرات الموسمية والزمانية.[6]

2.11.1.3التطبيقات المستقبلية

1. قياس كفاءة المساحات الخضراء في تبريد المدن.
2. تحليل تفاعل المباني مع الغطاء النباتي لتخطيط عمراني مستدام.
3. تصميم مؤشرات مرنة قابلة للتحديث تلقائيًا مع بيانات الأقمار الصناعية الحديثة.

2.11.4 دور الذكاء الاصطناعي في تطوير مؤشرات جديدة

2.11.4.1 التعلم الآلي والتعلم العميق

- استخدام خوارزميات التعلم الآلي (ML) لتحليل صور الأقمار الصناعية بدقة أعلى[7].

التعلم العميق (Deep Learning) يمكنه التعرف التلقائي على الغطاء النباتي، المباني، والمسطحات المائية .[8]

---

1. Weng, Q. (2012). Remote sensing of urban heat islands: progress, challenges, and prospects. Remote Sensing, 4(1), 1–27.
2. Lu, D., & Weng, Q. (2006). Integration of multiple indices for urban analysis. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 8(4), 317–326.
3. Myint, S. W., et al. (2011). Integrating NDVI and UHI for urban planning. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(2), 143–155.
4. Pettorelli, N., et al. (2005). Using satellite-derived indices to monitor vegetation dynamics. Trends in Ecology & Evolution, 20(9), 503–510.
5. Santamouris, M. (2015). Analyzing urban heat islands and vegetation effects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 828–851.
6. Imhoff, M. L., et al. (2010). Remote sensing of urban heat islands using MODIS LST. Remote Sensing of Environment, 114(8), 195–203.
7. Jiang, L., & Jia, H. (2013). LST retrieval and UHI analysis from Landsat TM data. Remote Sensing, 5(6), 2841–2856.

2.11.4.2 تحسين دقة المؤشرات

1. تصحيح التشويش الطيفي باستخدام نماذج ذكاء اصطناعي متقدمة[9].
2. دمج بيانات درجة الحرارة، الرطوبة، وتوزيع السكان لإنتاج مؤشرات حضرية أكثر تكاملاً[10].

2.11.2.3التنبؤ والتحليل المستقبلي

1. تطوير نماذج توقعية للتوسع العمراني والحرارة الحضرية.
2. محاكاة تأثير السياسات التخطيطية، مثل زيادة المساحات الخضراء أو تعديل كثافة المباني[11].

2.11.3 دمج المؤشرات المكانية مع البيانات الاجتماعية والاقتصادية

2.11.3.1 أهمية الدمج

- المؤشرات المكانية توفر معلومات بيئية، لكن لفهم التنمية الحضرية المستدامة يجب دمجها مع البيانات الاجتماعية والاقتصادية.[12]

2.11.3.2 آليات الدمج

1. تحليل المصفوفة المكانية-الاجتماعية :ربط مؤشرات الغطاء النباتي وكثافة البناء مع بيانات الدخل، الصحة، والتعليم[13].
2. استخدام GISو Big Dataلتطبيق التحليل متعدد الطبقات، حيث يمكن مقارنة مؤشرات البيئة مع توزيع السكان والخدمات[14].
3. تطوير نماذج دعم القرار المكاني المتقدمة (Advanced SDSS)التي تشمل المؤشرات المكانية والاجتماعية والاقتصادية[15].

---

8. Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 86(3), 370–384
9. Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of impervious surfaces and UHI. Remote Sensing of Environment, 93(3), 340–350.
10. Zhou, D., et al. (2017). Urban heat islands and sustainable city planning. Science of the Total Environment, 576, 123–132.
11. Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis. Wiley.
12. Huete, A. R., et al. (2002). Overview of vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 88(1), 1–19.
13. Jensen, J. R. (2015). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Pearson.

2.11.3.3 الفوائد التخطيطية

- تحديد المناطق عالية المخاطر بسبب الحرارة والافتقار للمساحات الخضراء.
- تحسين توزيع الخدمات الحضرية بما يتماشى مع جودة البيئة ومستوى المعيشة.
- دعم خطط التنمية المستدامة طويلة المدى من خلال بيانات موثوقة ومؤشرات متكاملة.

2.11.3.4التوجهات المستقبلية للمؤشرات المكانية

1. المؤشرات الديناميكية :مؤشرات قابلة للتحديث اللحظي مع بيانات الأقمار الصناعية والنماذج الحضرية[16].
2. المؤشرات متعددة الأبعاد :تشمل البيئة، العمران، والمجتمع في نموذج واحد[17].
3. التكامل مع الإنترنت الفضائي والبيانات المفتوحة :الوصول إلى بيانات حديثة بشكل أسرع وأكثر دقة[18].
4. التنبؤ الذكي :استخدام الذكاء الاصطناعي لتوقع التغيرات المستقبلية في الغطاء النباتي، الحرارة، والبناء[19].
5. التخصيص المحلي :تطوير مؤشرات تناسب خصوصيات المدن في الجنوب العالمي أو مناطق محددة في المدن الكثيفة[20].

2.12 المؤشرات ودعم القرار المكاني

تمثّل فقرة "المؤشرات ودعم القرار المكاني" تتويجاً تسلسلياً للفقرات السابقة التي تناولت المؤشرات البيئية الأساسيةNDVI) ، NDBI، SAVI، (UHIوعلاقاتها التفاعلية والتكاملية. فبعد تحليل الخصائص التقنية والزمنية لتلك المؤشرات، يصبح من الضروري الانتقال إلى دراسة كيفية دمجها داخل أطر دعم القرار المكاني (SDSS)، لتتحول من مجرد قيم رقمية إلى أدوات تخطيطية قادرة على إرشاد السياسات المكانية وتحديد الأولويات. هذا الربط يتيح فهماً عميقاً لدور المؤشرات في صياغة قرارات مستندة إلى أدلة كمية وخرائط موضوعية.

---

14. Lu, D., et al. (2010). Ground truthing for remote sensing accuracy assessment. Journal of Applied Remote Sensing, 4, 043519
15. Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate studies. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(4), 335–344.
16. Myint, S. W., et al. (2011). Urban vegetation and heat mitigation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(2), 143–155.
17. Santamouris, M., et al. (2011). Urban heat island and mitigation techniques. Energy and Buildings, 43(10), 2543–2550.
18. Oke, T. R. (1987). Boundary layer climates. Routledge.
19. Voogt, J. A. (2004). Urban heat islands: observations and applications. Geography Compass, 8(2), 67–82.
20. Weng, Q. (2001). Modeling urban growth and UHI effects. Remote Sensing of Environment, 75(1), 87–101

2.12.1 المقدمة: من البيانات الخام إلى القرارات المدعومة بالخرائط

يشكّل توظيف المؤشرات المشتقة من بيانات الاستشعار عن بعد (Remote Sensing Indices) خطوة محورية في الانتقال من التوصيف الوصفي للبيئة الحضرية إلى إطار كمي ممنهج لدعم القرار .المؤشرات تمثل لغة وسيطة بين صـور الأقمار الصـناعية المليئة بالتفاصـيل الطيفية من جهة، ومتطلبات صـانع القرار الذي يحتاج إلى أدوات مبسّطة وموضوعية من جهة أخرى[1]

إن ما يميز المؤشـــرات هو قدرتها على الاختزال :(Reduction) أي اختزال ملايين القيم الطيفية إلى قيم معيارية بســـيطة يمكن مقارنتها وتوظيفها. هذا الاختزال يجعلها مثالية كمدخلات في نظم دعم القرار المكاني (Spatial Decision Support Systems – SDSS)، التي تســـتهدف الإجابة على ســـؤال مركزي" :أين ينبغي التدخل، ولماذا؟."

2.12.2 الأساس النظري لدمج المؤشرات داخلSDSS

نظم دعم القرار المكاني (SDSS) تمثل تطورًا طبيعيًا لنظم دعم القرار التقليدية (DSS) عبر إدخال البعد المكاني، وهو ما يتيح دمج المعايير الجغرافية مع المعايير الاجتماعية والاقتصـادية[2]. المؤشـرات المكانية (Spatial Indices) تُعتبر بمثابة المعايير (Criteria) التي تدخل في عملية التقييم، حيث يُمكن وزنها، دمجها، ومقارنتها داخل أطر منهجية مثل:

- التحليل متعدد المعايير :(Multi-Criteria Evaluation – MCE) حيث يتم تحويل المؤشرات إلى طبقات معيارية تُدمج بخوارزميات الترجيح.
- نماذج التحليل متعدد الأهداف :(Multi-Objective Analysis) لدمج مؤشـــرات ذات اتجاهات متعارضـــة (مثل الحاجة للتوسع العمراني مقابل الحفاظ على الغطاء النباتي).
- نماذج المحاكاة المكانية :(Spatial Simulation Models) حيث تُغذّى هذه النماذج ببيانات زمنية للمؤشرات مثل NDVI وNDBIلتوقع سيناريوهات التغير.

بهذا الشكل، المؤشرات ليست مجرد قيم إحصائية، بل هي ركائز معرفية تدخل في صناعة القرار الحضري المستند إلى الدليل (Evidence-Based Urban Planning).

2.12.3 البنية التقنية لتكامل المؤشرات معSDSS

العملية التقنية لدمج المؤشرات داخل نظم دعم القرار المكاني تمر بمراحل مترابطة[3]:

1. **مرحلة جمع البيانات:**
   a) صور فضائية متعددة الطيف) مثلSentinel-2 ، Landsat 8).
   b) بيانات اجتماعية واقتصادية مساحية.(Census, Land Use)
2. **مرحلة معالجة البيانات:**

a) استخراج مؤشرات مثل.NDVI, NDBI, SAVI, UHI

b) إعادة تصنيفها (Reclassification) إلى فئات معيارية.

3. **مرحلة التحليل المكاني:**

a) إدخال المؤشرات إلى بيئة.GIS/SDSS

b) تطبيق أدوات الترجيح المكاني.(Weighted Overlay, AHP)

4. **مرحلة التصور:(Visualization)**

a) إنتاج خرائط مركبة.(Composite Maps)

b) إبراز المناطق ذات الأولوية للتدخل.

5. **مرحلة القرار:**

a) تقديم سيناريوهات مختلفة.(Best-case, Worst-case)

b) دعم النقاشات بين المخططين وصناع القرار والمجتمع المحلي.

2.12.4 التكامل مع GIS: من المؤشر إلى الخريطة

بدون نظامGIS ، تبقى المؤشرات مجرد قيم رقمية مبعثرة. لكن إدخالها إلى نظم المعلومات الجغرافية يسمح بتحويلها إلى خرائط تحليلية عالية التفسير .[4]على سبيل المثال:

- NDVI:يُعرض كخريطة توضح كثافة الغطاء النباتي بألوان متدرجة من الأحمر (انعدام الغطاء) إلى الأخضر (كثافة عالية).
- UHI:يُحوّل إلى خرائط حرارة تُظهر تباين درجة حرارة سطح الأرض عبر المناطق.
- NDBI:يُستخدم لإبراز نطاقات التوسع العمراني وضغوط البناء.

يوفر GIS كذلك إمكانية التحليل التراكبي(Overlay) ، حيث يمكن دمج أكثر من مؤشر في خريطة واحدة لتحديد "المناطق المثلى" وفقًا لمجموعة من الشروط.

2.12.5 تطبيقات عملية: من الحدائق إلى التخطيط المناخي

دمج المؤشرات مع SDSS له تطبيقات واسعة تشمل[5]:

1. **اختيار مواقع الحدائق:**
عبر دمج) NDVI العجز النباتي) NDBI + (الكثافة العمرانية) UHI + (شدة الحرارة.(
الناتج: خريطة أولويات تُظهر الأحياء الأكثر احتياجًا للحدائق.

2. **تخطيط الممرات الخضراء:**
SAVIيساعد على تتبع المناطق شبه الحضرية التي تربط بين المساحات المفتوحة.
الناتج: شبكة ممرات تعزز الاستدامة البيئية وتقلل من الجزر الحرارية.

3. **التخطيط المناخي الحضري:**
ربط UHI مع بيانات الصحة العامة لتحديد المناطق الأكثر عرضة للأمراض المرتبطة بالحرارة.
الناتج: خطط تدخل عمراني مثل أسطح خضراء أو جدران نباتية.

4. **إدارة الموارد المائية:**
+ NDVIمؤشرات الرطوبة تحدد مناطق الضغط المائي.
الناتج: مخطط حضري أكثر كفاءة.

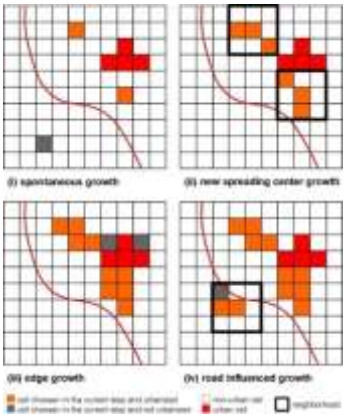
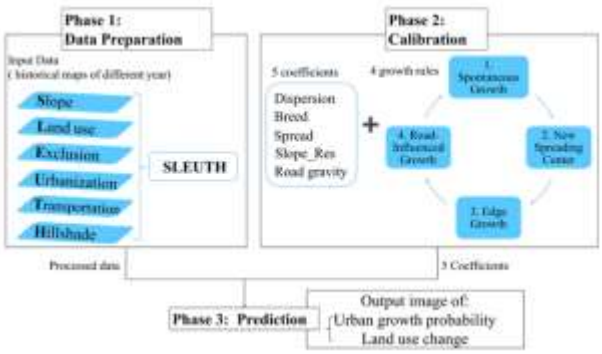
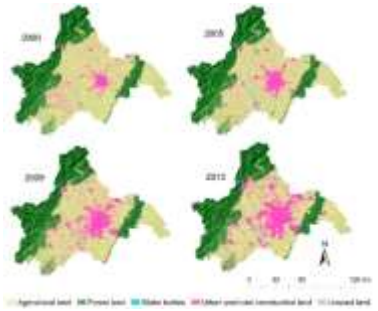
2.12.6 المؤشرات في نماذج التنبؤ العمراني

تتيح البيانات الزمنية (Time-Series) للمؤشرات إمكانيات قوية في رصد التغيرات عبر الزمن:[6]

- تحليل NDVI على مدى عقدين يكشف معدلات تراجع الغطاء النباتي.
- رصد NDBI سنويًا يظهر اتجاهات الزحف العمراني.
- دمج UHI مع بيانات مستقبلية (مثل تغير المناخ) يبرز مناطق الخطر الحراري في المستقبل.

هذه التحليلات الزمنية تُغذي نماذج النمو الحضري (Urban Growth Models) مثل Cellular Automata أو SLEUTH، ما يمكّن من وضع سيناريوهات للتوسع حتى عام 2050.

حيث تمثل **نماذج النمو الحضري (Urban Growth Models)** أدوات تحليلية متقدمة تهدف إلى محاكاة التوسع العمراني المستقبلي بناءً على المعطيات الزمنية والبيئية الحالية. ومن أبرز هذه النماذج:

1. **نموذج Cellular Automata (CA):** يقوم على تقسيم الحيز الحضري إلى خلايا مكانية تتفاعل وفق قواعد انتقال محددة، تعكس سلوك التوسع العمراني الفعلي. يُعدّ من أكثر النماذج استخداماً في المحاكاة الحضرية.	
2. **نموذج:SLEUTH** وهو اختصار لـ (Slope, Land use, Exclusion, Urbanization, Transportation, Hillshade). يُعتبر من النماذج الأكثر دقة في التنبؤ بالتحضر حتى عام 2050، ويعتمد على بيانات زمنية طويلة المدى لقياس معدلات الزحف العمراني.	
3. **نموذج CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects):** يُستخدم لتحليل ديناميكيات تغير استخدامات الأراضي، ويتيح اختبار سيناريوهات متعددة للسياسات الحضرية.	

جدول44: جدول مقارن يوضح نماذج النمو العمراني المذكورة

2.12.7 دور الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي

في السنوات الأخيرة، أصبح الذكاء الاصطناعي أداة مساعدة لدمج المؤشرات داخل SDSS[7].

- خوارزميات التصنيف :(Classification) مثل Random Forest لتصنيف استخدامات الأرض باستخدام NDVI وNDBI.
- نماذج الشبكات العصبية :(Neural Networks) لتوقع تطور الجزر الحرارية بالاعتماد على بيانات UHI التاريخية.
- تحليلات التعلم العميق :(Deep Learning) لاكتشاف الأنماط المكانية غير المرئية في المؤشرات.

النتيجة: دعم القرار لم يعد يعتمد فقط على التحليل الوصفي، بل على نماذج تنبؤية قوية.

2.12.8 التحديات والقيود الموسعة

رغم الفوائد العديدة، هناك تحديات مستمرة:

- التحديات التقنية :الحاجة لصور عالية الدقة مكانياً وزمانياً (قد تكون مكلفة).
- التحديات المنهجية :صعوبة تحديد أوزان دقيقة للمؤشرات في نماذج.MCE
- التحديات المؤسسية :غياب البنية التحتية المعلوماتية في مدن الجنوب العالمي.
- التحديات السياسية :بعض البيانات (مثل صور عالية الدقة) قد تكون مقيدة أمنيًا.
- التحديات الاجتماعية :غياب مشاركة المجتمع في تحديد المؤشرات ذات الأولوية، ما يقلل من شرعية القرارات.

2.12.9 الخلاصة التحليلية

المؤشرات تمثل جسرًا معرفيًا يربط بين الاستشعار عن بعد، GIS، ونظم دعم القرار المكاني. هذا التكامل يسمح بالانتقال من بيانات ضخمة ومعقدة إلى خرائط إرشادية قابلة للتنفيذ .وعلى الرغم من التحديات التقنية والمؤسسية، فإن الاتجاه العالمي يسير نحو تعزيز هذا التكامل عبر الذكاء الاصطناعي، البيانات الضخمة، والمنصات السحابية، بما يعزز من قدرة المدن على اتخاذ قرارات مستدامة ومرنة أمام التغيرات البيئية والعمرانية.

2.13 المؤشرات والأبعاد الاجتماعية

2.13.1 المقدمة: من الجغرافيا المادية إلى العدالة الاجتماعية

رغم أن معظم المؤشرات المستخرجة من صور الأقمار الصناعية(NDVI ، UHI، (NDBIتركز على الجوانب البيئية والمورفولوجية، إلا أن القيمة الحقيقية لها تظهر عند ربطها بالأبعاد الاجتماعية .إذ أن التغيرات في الغطاء النباتي أو الحرارة الحضرية ليست محايدة اجتماعيًا؛ بل تنعكس مباشرة على صحة السكان، رفاهيتهم، وجودة حياتهم. من هنا برزت الحاجة إلى تطوير مفهوم المؤشرات الاجتماعية-المكانية (Socio-Spatial Indicators) التي تمزج بين البيانات البيئية المكانية وبين الخصائص السكانية والاقتصادية للأحياء الحضرية[1].

2.13.2 الأساس النظري: العدالة المكانية والحق في المدينة

تُستمد أهمية المؤشرات الاجتماعية من النظريات الحضرية النقدية مثل "الحق في المدينة (Lefebvre) "و"العدالة المكانية(Soja) "، حيث يُنظر إلى المؤشرات البيئية ليس فقط كقيم طبيعية بل كعوامل تحدد من يستفيد ومن يتضرر.[2]

- العدالة في توزيع الخدمات :ارتفاع UHI في أحياء فقيرة يوضح عدم عدالة توزيع المساحات الخضراء.
- إقصاء اجتماعي :تراجع NDVI في مناطق مكتظة يربط مباشرة بتدهور جودة الحياة.
- الاستضعاف البيئي :(Environmental Vulnerability) حيث تتعرض بعض الفئات (الأطفال، كبار السن) لتأثيرات أشد نتيجة لمؤشرات سلبية.

2.13.3 المؤشرات الاجتماعية المرتبطة بالمؤشرات المكانية

لكي تصبح المؤشرات البيئية ذات دلالة اجتماعية، يجب ربطها بمؤشرات سكانية[3]

مثل:

- **الكثافة السكانية :(Population Density)** لتحديد عدد الأفراد المتأثرين بانخفاض الغطاء النباتي.
- **مؤشـــر الفقر أو الحرمـان :(Deprivation Index)** للكشـــف عن الأحيـاء التي تجمع بين تدهور بيئي وفقر اجتماعي.
- **الصحة العامة :(Public Health Indicators)** مثل معدلات أمراض الجهاز التنفسي المرتبطة بتراجع NDVI أو ارتفاع.UHI
- **المســاكن غير الرســمية :(Informal Settlements)** والتي غالبًا ما تظهر كمناطق عاليةNDBI ، منخفضــة NDVI، ومرتفعة.UHI

2.13.4 أدوات الدمج بين المؤشرات البيئية والاجتماعية

هناك ثلاث آليات رئيسية لدمج المؤشرات الاجتماعية مع البيئية[4]:

1. **التحليل التراكبي :(Overlay Analysis)** دمج خرائط NDVI و UHIمع خريطة الكثافة السكانية لتحديد المناطق ذات الأولوية القصوى.
2. **النماذج الإحصائية متعددة المتغيرات :(Regression Models)** لاختبار العلاقة بين الفقر/الصحة وبين المؤشرات البيئية.

1. Lefebvre, H. (1968). *Le droit à la ville* [The Right to the City]. (مقتطفات مترجمة ومنشورة لاحقًا).
2. Soja, E. W. (2010). *Seeking Spatial Justice*. University of Minnesota Press.
3. Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). *Urban green space, public health, and environmental justice: challenge of making cities 'just green enough'*. Landscape and Urban Planning, 125, 234–244

3. **نماذج العدالة البيئية :(Environmental Justice Models)** لقياس مستوى عدم المساواة في التعرض للمخاطر البيئية.

2.13.5 التطبيقات العملية: دراسات حالة حضرية

يمكن إبراز الأبعاد الاجتماعية عبر أمثلة تطبيقية[5]:

- توزيع الحدائق :عند دمج **NDVI** مع بيانات الفقر، يمكن كشف أن بعض الأحياء الثرية تستفيد من مساحات خضراء مضاعفة مقارنة بالأحياء الفقيرة.
- الجزر الحرارية :خرائط **UHI** تكشف أن أكثر المناطق تعرضًا للحرارة هي غالبًا الأحياء العشوائية ذات المساكن الرديئة.

التوسع العمراني **NDBI** :يوضح أن النمو العمراني يضغط أكثر على مناطق منخفضة الدخل، مما يزيد من هشاشتها .

2.13.6 مشاركة المجتمع المحلي في صياغة المؤشرات

واحدة من أبرز الانتقادات للمؤشرات المستندة إلى الاستشعار عن بعد أنها تقنية وبعيدة عن صوت السكان .لذلك أصبح الاتجاه الحديث هو المؤشرات التشاركية[6] (Participatory Indicators) ، حيث يشارك السكان في:

- تحديد ما يعنيه "جودة الحياة" بالنسبة لهم.
- ربط الخرائط البيئية بمشاكل معاشة يوميًا (نقص المياه، غياب الأشجار، رداءة السكن).
- مراجعة نتائج خرائط SDSS وإضفاء الشرعية عليها.

2.13.7 التحديات المنهجية والمؤسسية

دمج الأبعاد الاجتماعية مع المؤشرات المكانية يواجه عدة تحديات:

- تفاوت الدقة :صور الأقمار الصناعية قد تكون بدقة 10–30 متر، بينما بيانات التعداد السكاني قد تكون على مستوى وحدات أكبر.
- نقص البيانات الاجتماعية :في مدن الجنوب العالمي، قد تكون بيانات الفقر أو الصحة إما غير متاحة أو قديمة.
- الحساسية السياسية :بعض الحكومات قد ترفض نشر خرائط تظهر تفاوتات اجتماعية حادة.

---

4. Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., et al. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: A literature review. Landscape and Urban Planning, 81(3), 167–178.
5. Myint, S. W., et al. (2011). Urban vegetation and heat mitigation: Integrating NDVI and UHI for urban planning. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(2), 143–155.
6. Nowak, D. J., & Dwyer, J. F. (2007). Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In J. Kuser (Ed.), Urban and Community Forestry in the Northeast (pp. xx–xx). Springer

- التفسير متعدد المعاني :نفس المؤشر) مثل NDVI المنخفض (قد يُفسر بشكل مختلف: نقص أشجار، أو وجود أراضٍ زراعية جافة، أو حتى أرض قيد البناء.

2.13.8 الاتجاهات المستقبلية: نحو مؤشرات اجتماعية-مكانية ذكية

مع تطور تقنيات البيانات الضخمة (Big Data) والذكاء الاصطناعي، أصبح بالإمكان ربط المؤشرات البيئية بالبيانات الاجتماعية بشكل أكثر ديناميكية.

- استخدام بيانات الهواتف المحمولة لرصد أنماط التنقل وربطها بخرائط الحرارة.
- تحليل منشورات وسائل التواصل الاجتماعي (Geo-tagged Tweets) للكشف عن تصورات السكان تجاه جودة البيئة.
- بناء مؤشرات مركبة تجمع بين NDVI و UHIوالفقر والصحة في مؤشر واحد للعدالة البيئية

2.13.9 الخلاصة التحليلية

إن المؤشرات البيئية وحدها لا تكفي لفهم التغيرات الحضرية. ما لم يتم ربطها بالأبعاد الاجتماعية، فإنها قد تؤدي إلى قرارات تخطيطية غير عادلة أو حتى مضللة .العدالة المكانية تقتضي أن تكون المؤشرات أداة للكشف عن التفاوتات وليس مجرد توصيف طبيعي للمدينة. المستقبل يفرض اعتماد مقاربة تكاملية تشاركية تدمج الاستشعار عن بعد، نظم دعم القرار المكاني، والمؤشرات الاجتماعية بهدف إنتاج خرائط وسياسات أكثر عدلاً وإنصافًا للسكان.

جدول ملخّص: علاقة المؤشرات البيئية بالآثار الاجتماعية

المؤشر	الآثار الاجتماعية الرئيسية	آليات التأثير (Mechanisms)	المقياس المكاني النموذجي	احتياجات البيانات &التحقق
NDVIغابة/غطاء نباتي	جودة حياة/صحة نفسية، تقليل الإجهاد الحراري، رفع قيمة العقارات[11]	التظليل والتبخر/عزل الضوضاء وتحسين جودة الهواء[12]	قطعة/حي (10–30 متر)	صور متعددة الطيف + مسوحات ميدانية لغطاء الشجرة
NDBIبنيان/توسع عمراني	فقدان الوصول للخدمات، ضغط بنيوي على البنى التحتية، انخفاض المساحات العامة[13]	زيادة المساحات غير منفذة، تقليل المساحات الخضراء، تراكم انبعاثات[14]	حي/قطاع حضري (10–30 متر)	صور SWIR/NIR + قواعد بيانات استخدام الأرض + تحقق ميداني
SAVIنباتات متفرقة/تأثير التربة	هشاشة حواف المدن، فقدان الإنتاج الغذائي الحرفي، تفاوت في الأمان الغذائي[15]	يعكس قدرة الغطاء النباتي المتفرق على تلطيف المناخ والحفاظ على التربة	هامش/حلقة حضرية (10–30 متر)	صور مناسبة + عينات تربة + مسوحات ميدانية

المؤشر	الآثار الاجتماعية الرئيسية	آليات التأثير (Mechanisms)	المقياس المكاني النموذجي	احتياجات البيانات &التحقق
UHIالفارق الحراري الحضري	خطر صحي (إجهاد حراري/وفيات)، عبء على الفئات الضعيفة، تباينات في جودة السكن[16]	ارتفاع درجات حرارة السطح يؤدي لزيادة تعرُّض السكان للحرارة والإجهاد	حي/شارع (30–100 متر حسب المنصة)	بيانات + LST (TIR) محطات قياس أرضية + بيانات صحية/ديموغرافية
مؤشر مركب (Composite)	تحديد أولويات التدخلات، استهداف العدالة البيئية	دمج الأبعاد للترجيح وفق سياسات محلية	متعدد المستويات (محلي–حضري–إقليمي)	توحيد وتحجيم المؤشرات + آليات وزن شفافة + مشاركة المجتمع

جدول 16: جدول ملخّص: علاقة المؤشرات البيئية بالآثار الاجتماعية

2.14 المؤشرات والأبعاد الاقتصادية

2.14.1 مدخل: البُعد الاقتصادي في المؤشرات المكانية

تشير الأدبيات إلى أنّ التحليل الاقتصادي للمدينة لم يعد منفصلًا عن التحليل البيئي أو الاجتماعي، بل أصبح جزءًا متكاملًا من مؤشرات الاستدامة الحضرية. إذ يُترجم أثر المؤشرات البيئية إلى قيم اقتصادية ملموسة: كزيادة أسعار العقارات بجوار المساحات الخضراء، أو الخسائر الناتجة عن الجزر الحرارية الحضرية، أو حتى قيمة الخدمات البيئية التي توفّرها الأشجار والمسطحات الخضراء[1]. وبذلك تتحول مؤشرات مثل NDVI أو UHI من أدوات مراقبة بيئية إلى أدوات لتقييم رأس المال الطبيعي وتقدير كلفته أو عوائده[2].

2.14.2 ربط المؤشرات البيئية بقيمة العقارات

- أظهرت دراسات سوق العقارات أن ارتفاع قيم NDVI يرتبط بارتفاع أسعار الوحدات السكنية في محيط المساحات الخضراء[3].
- مؤشر NDBI العالي غالبًا ما يشير إلى مناطق ذات بنية عمرانية كثيفة، وهو ما قد يعكس قيمًا عقارية مرتفعة في بعض الأسواق (مركز المدينة) أو منخفضة في مناطق الهشاشة العمرانية غير المخططة[4].
- تأثير UHI يترجم اقتصاديًا في شكل زيادة تكاليف التبريد والطاقة وانخفاض قيمة العقار في المناطق الحارة مقارنة بمناطق ذات ظروف مناخية أكثر اعتدالًا[5].

SAVI، باعتباره مؤشـــرًا يعكس الغطاء النباتي في المناطق شـــبه الحضـــرية، يرتبط بقيمة الأراضـــي الزراعية والفرص الاقتصادية للزراعة الحضرية أو المحيطية[6] .

2.14.3 تقدير الفوائد الاقتصادية للخدمات البيئية

يمكن تقدير الفوائد الاقتصادية المباشرة وغير المباشرة الناتجة عن الغطاء النباتي (NDVI/SAVI) عبر عدة أدوات:

1. التقييم النقدي المباشر :عبر مقارنة أسعار العقارات في مناطق مختلفة من حيث الغطاء النباتي[7].
2. التكلفة المستبدلة :(Replacement Cost) تقدير كلفة استبدال الخدمات البيئية (مثل التبريد الذي توفّره الأشجار) بأنظمة اصطناعية.
3. تحليل الكلفة–المنفعة :(CBA) لحساب المنافع الاقتصادية طويلة الأمد (انخفاض استهلاك الطاقة، تحسين الصحة العامة، تقليل غياب العمال بسبب الأمراض) مقابل كلفة إنشاء وصيانة البنية الخضراء[8].
4. أسلوب الرغبة في الدفع :(Willingness to Pay) قياس مدى استعداد السكان لدفع مبلغ إضافي لقاء تحسينات بيئية حضرية[9].

2.14.4 دعم الزراعة الحضرية والاقتصاد الدائري

- يُعتبر SAVI أداة مثالية لتحديد المناطق القابلة لدعم الزراعة الحضرية، والتي تشكل رافدًا اقتصاديًا للأسر ذات الدخل المحدود، وتساهم في الأمن الغذائي المحلي[10].
- يمكن دمج مؤشـــرات الغطاء النباتي مع نظم دعم القرار لتحديد مواقع مثالية للزراعة المجتمعية (Community Gardens).
- في إطار الاقتصـــاد الدائري، فإن المؤشـــرات الحرارية (UHI) يمكن أن تســـتخدم لتوجيه ســـياســـات إعادة تدوير المخلفات وتحويلها إلى منتجات تبريدية طبيعية (مثل الأسطح الخضراء) تقلل من تكاليف الطاقة[11].

1. Costanza, R., et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 387, 253–260.
2. Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. Ecological Economics, 86, 235–245.
3. Jim, C. Y., & Chen, W. Y. (2009). Value of scenic views: Hedonic assessment of private housing in Hong Kong. Landscape and Urban Planning, 91(4), 226–234.
4. Dubovyk, O., et al. (2011). Land use/land cover change and its socio-economic impacts in urban areas. Applied Geography, 31(3), 1036–1048.
5. Santamouris, M. (2015). Analyzing urban heat islands and the cooling potential of urban greenery. Energy and Buildings, 98, 128–136.
6. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295–309

2.14.5 قياس التكلفة والفائدة للمشاريع الخضراء

تُظهر الأبحاث أن تكاليف إنشاء البنية التحتية الخضراء (حدائق، أسطح خضراء، جدران نباتية) غالبًا ما تُعوّض خلال فترة قصيرة عبر:

- تقليل نفقات الطاقة الناتجة عن تخفيف.UHI
- رفع قيمة العقارات المجاورة.
- تحفيز الاستثمار المحلي والسياحة البيئية.
- تخفيض التكاليف الصحية المرتبطة بأمراض الحرارة والتلوث[12] .

هنا تصبح المؤشرات أداة أساسية لإقناع صناع القرار بأن الاستثمار في البنية التحتية الخضراء ليس ترفًا بيئيًا بل خيارًا اقتصاديًا رابحًا.

2.14.6 التحديات في دمج المؤشرات الاقتصادية

رغم وضوح الفوائد، يواجه الباحثون تحديات:

- صعوبة تحويل القيم البيئية إلى قيم نقدية دقيقة .(Valuation Problem)
- الفروق الاجتماعية في استفادة الفئات من المساحات الخضراء، ما قد يخلق تحيزًا في التقييمات الاقتصادية.
- الحاجة إلى بيانات زمنية طويلة الأمد لإظهار المنافع الاقتصادية التراكمية.
- الاعتماد المفرط على نماذج كمية قد يُغفل الجوانب النوعية مثل الهوية الثقافية للفضاء الحضري.

7. Tyrväinen, L., & Miettinen, A. (2000). Property prices and urban forest amenities. Journal of Environmental Economics and Management, 39(2), 205–223.
8. Pearce, D., Atkinson, G., & Mourato, S. (2006). Cost-Benefit Analysis and the Environment: Recent Developments. OECD.
9. Loomis, J., & Rosenberger, R. (2006). Redefining validity in stated preference studies: Citizen values for multiple goods. Land Economics, 82(2), 163–181.
10. Mok, H. F., et al. (2014). Urban agriculture in developed countries: A review of benefits and constraints. Renewable Agriculture and Food Systems, 29(2), 195–204.
11. Ellen MacArthur Foundation (2015). Towards a Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition.
12. Bowler, D. E., et al. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. Landscape and Urban Planning, 97(3), 147–155

جدول ملخّص: العلاقة بين المؤشرات المكانية والأبعاد الاقتصادية

المؤشر	الأثر الاقتصادي الرئيسي	آلية التحليل	أمثلة للتطبيق	مؤشرات مكمّلة
NDVI	رفع قيمة العقارات، تقليل تكاليف الطاقة والصحة	تحليلCBA ، أسعار العقارات، الرغبة بالدفع[3–7]	زيادة أسعار السكن قرب الحدائق	بيانات دخل، صحة، طاقة
NDBI	ضغط على البنية التحتية، تباين في قيمة العقارات	مقارنة قيم الأراضي في مناطق كثيفة مقابل متفرقة[4]	وسط المدينة مقابل الأحياء غير الرسمية	بيانات عمرانية وسكنية
SAVI	دعم الزراعة الحضرية، إنتاج اقتصادي بديل	تحديد مواقع حدائق مجتمعية[10]	الزراعة في الأطراف الحضرية	بيانات زراعية واجتماعية
UHI	زيادة تكاليف التبريد والطاقة، انخفاض قيم العقار	حساب تكاليف الطاقة والصحة[5–12]	أحياء فقيرة مقابل أحياء مخدومة	بيانات مناخية وصحية

جدول 17: العلاقة بين المؤشرات المكانية والأبعاد الاقتصادية

2.14.7 خلاصة

المؤشرات المكانية لا تقتصر على وظائفها البيئية، بل تشكل أساسًا اقتصاديًا حيويًا لتقييم جدوى السياسات الحضرية. استخدام أدوات مثل NDVI و UHIلقياس الفوائد والتكاليف الاقتصادية يحوّل «الطبيعة» في المدينة إلى رأسمال منتج، ويعزز منطق الاستثمار في بنية تحتية حضرية أكثر استدامة وعدالة.

2.15 التحديات الأكاديمية والمنهجية في استخدام المؤشرات

2.15.1 مدخل عام

رغم أن المؤشرات المكانية مثل NDVI و NDBIو SAVIو UHIتُعدّ أدوات قوية لتحليل الأنماط الحضرية، إلا أن استخدامها الأكاديمي يواجه مجموعة من التحديات النظرية والمنهجية .فالمؤشرات لا تعكس دائمًا الصورة الكاملة للواقع الحضري، بل تخضع لقيود مرتبطة بالبيانات، طرق المعالجة، النمذجة، والتفسير الاجتماعي–الاقتصادي. هذا يفرض على الباحثين أن يتبنوا مقاربة نقدية، تراعي التحقق من الصلاحية (Validity) والموثوقية(Reliability) ، إضافة إلى ضرورة الدمج بين المؤشرات الكمية والكيفيّة.

2.15.2 التحديات النظرية

1. **إشكالية التبسيط المفرط:**
تعتمد المؤشرات مثل NDVI على قيم رقمية محدودة (من -1 إلى +1)، وهو ما قد يُخفي التعقيد البيئي والاجتماعي الكامن وراء البيانات. هذا التبسيط قد يؤدي إلى إغفال الفوارق الدقيقة بين أنواع الغطاء النباتي أو طبيعة البنية الحضرية[1].

2. **غياب البعد السياقي:**
المؤشرات عالمية الصياغة لكنها محلية التفسير. فالقيمة ذاتها لـ NDVI قد تعكس حديقة عامة في مدينة أوروبية، بينما تعكس زراعة تقليدية في مدينة عربية. تجاهل البعد السياقي يُفضي إلى إسقاطات خاطئة[2].

3. **الفصل بين البيئي والاجتماعي:**
كثير من الدراسات تستخدم المؤشرات بمعزل عن المؤشرات الاجتماعية والاقتصادية، مما يؤدي إلى قراءة ناقصة للمدينة. على سبيل المثال، UHIيُدرس كظاهرة فيزيائية دون دمجها بتوزيع الدخل أو العدالة الاجتماعية[3].

2.15.3 التحديات المنهجية

1. **اختيار مصادر البيانات:**
تعدد المنصات (Landsat, Sentinel, MODIS) يطرح إشكاليات مرتبطة بالدقة المكانية والزمانية. فبيانات Landsat(30م) قد لا تكشف التفاصيل الدقيقة في الأحياء عالية الكثافة، بينما بيانات Sentinel-2 توفر دقة أفضل (10م) ولكن بدورية زمنية محدودة[4].

2. **المشكلات الطيفية:(Spectral Issues)**

- تشابه الأطياف بين الأسطح الإسفلتية المبتلة والمسطحات المائية يؤدي إلى خلط التصنيف.
- وجود ظلال المباني العالية يخلق تحيزًا في قراءة NDVI أو.NDBI

3. **المعالجة الرقمية:**
تختلف نتائج المؤشرات وفقًا لطرق التصحيح الإشعاعي والجوي .إهمال هذه الخطوات قد يخلق انحرافًا كبيرًا في النتائج[5].

4. **تحديات النمذجة الزمنية:**
تحليل التغيرات الزمنية يتطلب بيانات متجانسة على فترات طويلة. لكن تباين أجهزة الاستشعار أو فقدان السجلات (Data Gaps)يعيق بناء سلسلة زمنية موثوقة[6].

---

1. Turner, B. L., et al. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. PNAS, 100(14), 8074–8079.
2. Seto, K. C., et al. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. PNAS, 108(48), 19893–19898.
3. Kabisch, N., & Haase, D. (2014). Green justice or just green? Provision of urban green spaces in Berlin, Germany. Landscape and Urban Planning, 122, 129–139.
4. Drusch, M., et al. (2012). Sentinel-2: ESA’s optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 120, 25–36

2.15.4 التحديات التفسيرية

1. الغموض في العلاقة السببية:
ارتفاع NDVI قد يرتبط بتحسن بيئي أو بزيادة الزراعة الصناعية التي تستهلك المياه بكثافة. بالتالي، العلاقة بين المؤشر والواقع ليست دائمًا علاقة سببية مباشرة.[7]

2. تعدد التفسيرات:(Ambiguity)
نفس القيمة في UHI قد تفسر بـ:

- غياب الغطاء النباتي.
- زيادة الأنشطة الصناعية.
- كثافة سكانية عالية.

غياب البيانات المساندة يجعل التفسير عرضة للتحيز.

3. الفجوة بين الأكاديمي والتطبيقي:
بينما تُستخدم المؤشرات بكثرة في الدراسات الأكاديمية، إلا أن صانعي القرار يواجهون صعوبة في ترجمة القيم الرقمية إلى سياسات حضرية مثل: ما معنى NDVI = 0.3 في صياغة قرار التخطيط؟.

2.15.5 التحديات التقنية والعملية

1. قدرات المعالجة:
تتطلب البيانات الفضائية عالية الدقة قدرة حاسوبية وبرمجية متقدمة,Google Earth Engine, Python)
.(GIS هذا يمثل عائقًا أمام الباحثين في الدول النامية.

2. إمكانية الوصول للبيانات:
رغم توافر كثير من البيانات مفتوحة المصدر، إلا أن بعض الصور عالية الدقة) مثل (WorldView تبقى مكلفة، ما يحدّ من استخدامها في الأبحاث محدودة التمويل[8].

3. التكامل بين المؤشرات:
الدمج بين NDVI و NDBIو UHIيخلق تحديًا تقنيًا لضرورة توحيد وحدات القياس والمرجعيات الزمنية.

5. Song, C., et al. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, 75(2), 230–244.
6. Wulder, M. A., et al. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. Remote Sensing of Environment, 225, 127–147.
7. Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. BioScience, 52(2), 143–150.
8. Li, X., et al. (2017). Urban expansion and its driving forces in China: An analysis of multi-temporal data. Remote Sensing, 9(2), 153

2.15.6 حلول مقترحة للتغلب على التحديات

- الدمج متعدد المؤشرات :ربط البيانات الطيفية بالبيانات الاجتماعية والاقتصادية لتفادي التفسير الأحادي.
- النمذجة الهجينة :استخدام الذكاء الاصطناعي (ML, DL) لتقليل مشكلة خلط الأطياف وتحسين دقة التصنيف.
- التأكيد على المقاربات البينية :(Interdisciplinary) إشراك خبراء من الاقتصاد، الاجتماع، والهندسة مع خبراء الاستشعار عن بعد.
- التدرج المكاني :(Multi-Scale Analysis) تحليل البيانات على مستويات مختلفة (حي، مدينة، إقليم) لاختبار اتساق النتائج.
- تعزيز الوصول المفتوح :الاعتماد على بياناتSentinel, Landsat, MODIS ، وتطوير منصات محلية للبيانات الحضرية.

جدول ملخص للتحديات والمنهجيات المقترحة

نوع التحدي	الوصف	مثال تطبيقي	منهجية مقترحة للتغلب
نظري	التبسيط المفرط للمؤشرات	NDVI = 0.4قد يختلف تفسيره بين بيئات مختلفة	الدمج بين المؤشرات والبيانات الميدانية
منهجي	اختلاف الدقة المكانية	بيانات Landsat لا تكشف شوارع ضيقة	استخدام Sentinel-2 أو صور تجارية
تفسيري	غياب العلاقة السببية المباشرة	ارتفاع NDVI مع استهلاك مياه مرتفع	دمج بيانات استهلاك المياه والزراعة
تقني	صعوبات في المعالجة	الحاجة لـ GEE أو سيرفرات قوية	الاعتماد على الحوسبة السحابية مفتوحة المصدر
عملي	صعوبة ربط المؤشرات بالسياسات	صانع القرار لا يفهم = NDVI 0.3	تطوير مؤشرات مركبة (Composite Indicators)أكثر وضوحًا

جدول 18: ملخص للتحديات والمنهجيات المقترحة

2.16 التقنيات الحديثة لتحسين المؤشرات

2.16.1 مدخل عام

شهدت السنوات الأخيرة طفرة نوعية في تكنولوجيا الاستشعار عن بعد وتحليل البيانات الجغرافية، مما أتاح للباحثين إمكانيات واسعة لتحسين المؤشرات التقليدية مثلNDVI, NDBI, SAVI, UHI ، سواء من حيث الدقة المكانية والطيفية أو من حيث التفسير متعدد الأبعاد .هذه التطورات لا تنحصر في الجانب التقني فحسب، بل تتجاوز ذلك إلى إحداث تحول في النماذج الأكاديمية والمنهجية المستخدمة في الدراسات الحضرية. فالتحول من بيانات متوسطة الدقة (30م) إلى بيانات فائقة الدقة (1م أو أقل)، ومن المعالجة المكتبية إلى الحوسبة السحابية، ومن النمذجة الإحصائية إلى الذكاء الاصطناعي، يفتح آفاقًا جديدة أمام توظيف المؤشرات كأدوات أكثر مرونة ودقة في التخطيط الحضري.

2.16.2 استخدام الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي

1. **التصنيف الذكي للبيانات:**
أدى إدخال خوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning) والتعلم العميق (Deep Learning) إلى تحسين قدرة المؤشرات على التمييز بين الأغطية الأرضية المتشابهة طيفيًا. على سبيل المثال، يمكن لشبكات CNN (Convolutional Neural Networks)أن تقلل من مشكلة خلط الطيف بين الأسطح الإسفلتية والتربة الجافة التي تحدّ من دقة.[1]NDBI

2. **التنبؤ المستقبلي:**
عبر النماذج التنبؤية(Predictive Models) ، يمكن للذكاء الاصطناعي ربط المؤشرات الحالية (NDVI, UHI) بالأنماط المستقبلية للتوسع الحضري أو التدهور البيئي. هذا يخلق قيمة مضافة في نماذج التخطيط الاستباقي.

3. **دمج البيانات غير المكانية:**
تسمح خوارزميات الذكاء الاصطناعي بدمج البيانات الطيفية مع البيانات الاجتماعية والاقتصادية، لإنتاج مؤشرات مركبة أكثر ارتباطًا بالواقع الحضري.

2.16.3 الاستشعار متعدد الأطياف والفائق الدقة

1. **توسيع نطاق الطيف:**
تطورت أجهزة الاستشعار الحديثة لتشمل مئات النطاقات الطيفية(Hyperspectral) ، مما يمكّن من تمييز تفاصيل دقيقة في الغطاء النباتي، رطوبة التربة، وحتى المواد البنائية المستخدمة في الأسطح الحضرية[2].

---

1. Ma, L., et al. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 152, 166–177.
2. Thenkabail, P. S., et al. (2011). Hyperspectral remote sensing of vegetation and agricultural crops. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(11), 1167–1181.
3. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79–97.
4. Gorelick, N., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27

2. **الصور فائقة الدقة:**
بيانات مثل) WorldView-3دقة 0.3م (أو) PlanetScopeدقة 3م (توفر معلومات أدق بكثير من Landsat أو Sentinel، مما يُحسّن بشكل جذري حسابات المؤشرات خصوصًا في الأحياء الكثيفة.

3. التطبيقات العملية:

a) في :NDVI القدرة على التفريق بين أنواع النباتات (أشجار، شجيرات، مروج).

b) في :UHI تحديد مناطق الجزر الحرارية على مستوى مبنى واحد بدلاً من أحياء كاملة.

2.16.4 دمج البيانات الفضائية والطائرات المسيّرة(UAVs)

1. **التكامل بين المقاييس:**
الطائرات المسيّرة توفر صورًا عالية الدقة (5–10 سم)، يمكن دمجها مع صور الأقمار الصناعية لتوفير تحليل متعدد المستويات. هذا مفيد خصوصًا في **التحقق الميداني.[3] (Ground Truthing)

2. **المرونة الزمنية:**
بعكس الأقمار الصناعية ذات المرور المحدود، يمكن للطائرات المسيّرة أن تجمع بيانات حسب الطلب، مما يساعد على تتبع التغيرات المفاجئة (مثل التوسع العمراني غير المخطط).

3. **إنتاج مؤشرات محلية:**
يمكن عبر الطائرات المسيّرة تطوير مؤشرات خاصة بسياقات محددة، مثل قياس تظليل الأشجار على مستوى شارع معين، أو حساب انعكاس الأسطح الحرارية.

2.16.5 أدوات المعالجة السحابية(Cloud Processing)

1. **Google Earth Engine (GEE)**
أحدثت GEE ثورة في إمكانية الوصول والمعالجة، حيث تتيح للمستخدم معالجة بيتابايت من بيانات Landsat و Sentinelدون الحاجة إلى أجهزة قوية محلية[4].

2. **الوصول المفتوح للبيانات:**
المنصات السحابية دمجت بين البيانات (أرشيفات مناخية + بيانات اجتماعية)- ما سهّل تطوير مؤشرات مركبة.

3. **الأهمية للمدن النامية:**
المعالجة السحابية خففت من الفجوة الرقمية بين الشمال والجنوب، إذ أصبح بإمكان باحث في دمشق أو نيروبي استخدام أدوات كانت حكراً على مختبرات متقدمة.

2.16.6 التكامل بين التقنيات الحديثة والمؤشرات

1. **المؤشرات الهجينة:(Hybrid Indices)**
دمج NDVI مع NDBI و UHIفي مؤشر مركب أصبح ممكنًا بفضل الذكاء الاصطناعي والمعالجة السحابية. هذه المؤشرات تعكس البعد البيئي والاجتماعي والاقتصادي معًا.

2. **المؤشرات الديناميكية:**
بفضل الاستشعار المتعدد والزمن الحقيقي(Real-Time Monitoring) ، يمكن بناء مؤشرات ديناميكية تتغير يوميًا أو أسبوعيًا، عوضًا عن المؤشرات الثابتة.

3. **التطبيقات المستقبلية:**

a) تخطيط المدن الذكية (Smart Cities) عبر مؤشرات ذكية تربط الغطاء النباتي، الحرارة، والنقل.

b) إدارة المخاطر الحضرية مثل الحرائق أو الفيضانات باستخدام بيانات لحظية.

جدول: مقارنة بين التقنيات الحديثة في تحسين المؤشرات

التقنية	المزايا	التطبيقات	التحديات
الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي	تحسين التمييز الطيفي، التنبؤ، دمج البيانات	التنبؤ بالتوسع الحضري، ربط NDVIبالبعد الاجتماعي	الحاجة إلى بيانات تدريبية ضخمة
الاستشعار متعدد الأطياف والفائق الدقة	تفاصيل دقيقة، تمييز أنواع النباتات والمواد	تحليل NDVI عالي الدقة، قياس UHIعلى مستوى المبنى	التكلفة العالية، حجم البيانات
الطائرات المسيّرة (UAVs)	دقة مكانية عالية جدًا، مرونة زمنية	مراقبة التحولات المفاجئة، إنتاج مؤشرات محلية	محدودية التغطية المكانية، القوانين
المعالجة السحابية	قوة معالجة هائلة، وصول مفتوح للبيانات	تحليل واسع النطاق، بناء مؤشرات مركبة	الاعتماد على الإنترنت والبنية الرقمية

جدول 19: مقارنة بين التقنيات الحديثة في تحسين المؤشرات

2.18 المؤشرات الاستدامة البيئية والتخطيط الحضري

يشكّل مفهوم الاستدامة إطارًا شاملاً يدمج بين البعد البيئي والاجتماعي والاقتصادي في عملية التخطيط الحضري. ويُعتبر استخدام المؤشرات المكانية وسيلة أساسية لترجمة هذه الأبعاد إلى أدوات كمية يمكن بواسطتها قياس مستوى التنمية الحضرية، ورصد مدى تحقيقها لمبادئ الاستدامة. فالمؤشرات لا تقتصر على كونها أدوات للرصد، بل تتحول إلى أدوات لتوجيه السياسات العامة، وتقييم المشاريع الحضرية، وبناء استراتيجيات طويلة الأمد قادرة على التكيف مع التغيرات المناخية والاجتماعية والاقتصادية.

2.18.1 المؤشرات البيئية

تشمل المؤشرات البيئية مجموعة واسعة من المتغيرات التي تقيس جودة البيئة الحضرية ومدى حفاظها على الموارد الطبيعية. ومن أبرز هذه المؤشرات:

- جودة الهواء :تعتمد على قياس تركيز الملوثات(PM2.5) ، PM10، NO2، (SO2وربطها بالتوزيع المكاني للكثافة السكانية والأنشطة الصناعية.
- التنوع البيولوجي :يتمثل في حساب نسبة المساحات الخضراء الطبيعية مقابل المساحات المبنية، ورصد الغطاء النباتي باستخدام مؤشرات مثل.NDVI
- المياه الحضرية :قياس توفر المياه، جودة مصادرها، وكفاءة شبكات الصرف، مع مؤشرات لمخاطر الفيضانات أو ندرة المياه.
- المناخ الحضري :رصد ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية (UHI) وتحديد المناطق الحرجة التي تحتاج إلى تدخلات بيئية مثل التشجير أو الأسطح الخضراء.

هذه المؤشرات تسمح بتحديد المناطق التي تعاني من ضغوط بيئية عالية، وتساعد على رسم أولويات التدخل البيئي ضمن الخطة الحضرية.

2.18.2 المؤشرات الاجتماعية

الاستدامة لا تتحقق إلا بوجود عدالة اجتماعية مكانية .لذا تشمل المؤشرات الاجتماعية:

- الوصول إلى المساحات الخضراء :قياس المسافة المكانية والزمنية التي تفصل بين السكان وأقرب متنزه أو حديقة عامة.
- الصحة الجسدية والنفسية :ربط وفرة المساحات الخضراء ومستويات التلوث مع مؤشرات الصحة العامة (معدلات الأمراض التنفسية، مؤشرات الصحة النفسية).
- التفاعل الاجتماعي :تقييم دور الساحات العامة في تعزيز التواصل المجتمعي، والمشاركة في الأنشطة الثقافية والترفيهية.
- الإنصاف المكاني :التأكد من توزيع الخدمات البيئية بشكل عادل بين الأحياء الغنية والفقيرة.

2.18.3 المؤشرات الاقتصادية

تُعد المؤشرات الاقتصادية أداة لربط التنمية المستدامة بمفهوم القيمة المضافة على المستويين الفردي والجماعي:

- قيمة الأراضي والعقارات :عادة ما يؤدي تحسين البيئة الحضرية وزيادة المساحات الخضراء إلى رفع القيمة السوقية للعقارات المجاورة.
- التكلفة/الفائدة :تحليل الجدوى الاقتصادية للمشاريع الخضراء، مثل مقارنة كلفة إنشاء الحدائق مع الفوائد الصحية والاجتماعية والاقتصادية الناتجة عنها.
- الاقتصاد الدائري والزراعة الحضرية :مؤشرات تعكس دور إعادة التدوير والممارسات الزراعية الحضرية في خلق فرص عمل وتقليل الأثر البيئي.
- التنمية الحضرية الذكية :ربط المؤشرات الاقتصادية بالتحولات الرقمية، مثل استخدام تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) لتقليل استهلاك الطاقة وتحسين البنية التحتية.

2.18.4 الربط بين المؤشرات لتقييم شامل

التحليل الأحادي لكل بُعد لا يكفي لفهم المشهد الحضري؛ لذا فإن المنهج الأكاديمي الحديث يدعو إلى:

- مؤشـــرات مركبة تجمع بين البيئة والاجتماع والاقتصـــاد في إطار واحد، مثل مؤشـــر الاســـتدامة المركب (Composite Sustainability Index).
- النمذجة المكانية التكاملية (Integrated Spatial Modelling)التي تســـمح بإظهار التفاعلات بين الأبعاد الثلاثة على مستوى الحي أو المدينة.
- اســـتخدام نظم دعم القرار المكاني (SDSS) لعرض النتائج بطريقة تفاعلية، تســـهّل على صـــانعي القرار اختيار السيناريو الأمثل للتدخل الحضري.

تصنيف المؤشرات وفق أبعاد الاستدامة في التخطيط الحضري

البُعد	المؤشرات الرئيسية	الهدف التخطيطي	أدوات القياس
بيئي	جودة الهواء، التنوع البيولوجي، المياه، الجزر الحرارية	تقليل التلوث، الحفاظ على الموارد الطبيعية	NDVI، LST، بيانات جودة الهواء
اجتماعي	الوصول للمساحات الخضراء، الصحة، التفاعل الاجتماعي، الإنصاف المكاني	تعزيز العدالة المكانية وتحسين جودة الحياة	GIS، بيانات سكانية وصحية
اقتصادي	قيمة الأراضي، تكلفة/فائدة، الاقتصاد الدائري، الزراعة الحضرية	تحقيق جدوى اقتصادية ومردود مالي مستدام	تحليل اقتصادي، بيانات السوق العقارية
تكاملي	المؤشرات المركبة، النمذجة المكانية، SDSS	توفير تقييم شامل ومتعدد الأبعاد	مؤشرات مركبة، منصات دعم القرار

جدول 20: تصنيف المؤشرات وفق أبعاد الاستدامة في التخطيط الحضري

2.19 المؤشرات التكاملية لدعم التنمية الحضرية المستدامة

يشكّل هذا القسم مرحلة محورية في فهم كيفية ربط الأبعاد البيئية والاجتماعية والاقتصادية عبر مؤشرات قابلة للتحليل الكمي، مما يسمح للمخططين الحضريين باتخاذ قرارات استراتيجية مستنيرة. تُعرف المؤشرات التكاملية (Integrated/Composite Indicators)بأنها أدوات تجمع بيانات متعددة المصـادر والأبعاد في إطار موحد، بهدف تقييم الأداء الحضـري بشـكل شـامل، ومراقبة التغيرات عبر الزمن، ودعم التخطيط المستدام طويل الأجل.

2.19.1 تعريف المؤشرات التكاملية

المؤشرات التكاملية هي مؤشرات مركبة تجمع بين عدة مؤشرات أحادية البُعد) مثل NDVI, UHI, الوصول إلى المساحات الخضراء، قيمة الأراضي (لإنتاج مقياس واحد يعكس حالة الاستدامة الشاملة .هذه المؤشرات تسمح بتحليل العلاقات التفاعلية بين البيئة، الاقتصاد، والمجتمع، وتمثل أداة قوية في:

- تقييم أداء الأحياء والمناطق بشكل متوازن.
- مقارنة المدن المختلفة أو نفس المدينة على مر الزمن.

- توجيه السياسات العامة والمبادرات الحضرية نحو أولويات التنمية المستدامة.

2.19.2 مكونات المؤشرات التكاملية

1. **البُعد البيئي:**

a) تغطية الغطاء النباتي، جودة الهواء، المياه، الجزر الحرارية الحضرية.
b) قياس التنوع البيولوجي واستدامة الموارد الطبيعية.

2. **البُعد الاجتماعي:**

a) الوصول المكاني للمساحات الخضراء، الصحة العامة، التفاعل الاجتماعي، الإنصاف المكاني.
b) تقييم جودة الحياة والتوزيع العادل للخدمات الحضرية.

3. **البُعد الاقتصادي:**

a) القيمة السوقية للأراضي، التكلفة/الفائدة للمشاريع البيئية، الزراعة الحضرية، الاقتصاد الدائري.
b) ربط الاستدامة البيئية بالقيمة الاقتصادية المحلية والتأثيرات المالية على المجتمعات.

2.19.3 منهجية إنشاء المؤشرات التكاملية

تتطلب المؤشرات التكاملية مزيجًا من التحليل الإحصائي والخرائطي، حيث يتم:

1. جمع البيانات من مصـــادر متعددة: الأقمار الصـــناعية، الطائرات المســـيّرة، نظم المعلومات الجغرافية، البيانات الاجتماعية والاقتصادية.
2. توحيد المقاييس :تحويل كل مؤشر إلى مقياس موحد (Standardization) لضمان قابلية الدمج.
3. تحديد الأوزان النســبية لكل مؤشــر باســتخدام تقنيات مثل (Analytic Hierarchy Process) AHPأو ترجيح الخبراء.
4. دمج المؤشــرات لإنتاج مؤشــر مركب واحد يمكن تمثيله بيانيًا على شــكل خرائط كارتوغرافية أو مؤشــرات زمنية ديناميكية.
5. التحقق من النتائج باستخدام المعاينة الميدانية وبيانات Ground Truthing لضمان مصداقية المؤشر.

2.19.4 تطبيقات المؤشرات التكاملية

- **دعم اتخاذ القرار التخطيطي المستدام:**
تُستخدم المؤشرات التكاملية لتحديد المناطق التي تحتاج إلى تدخل عاجل، سواء لتقليل الحرارة، تحسين الوصول إلى المساحات الخضراء، أو رفع القيمة الاقتصادية للأراضي.
- **تقييم المشاريع الحضرية:**
مقارنة سيناريوهات مختلفة (مثل زيادة المساحات الخضراء أو تحسين النقل العام) من خلال مؤشرات قابلة للقياس، مما يساعد على اختيار البدائل الأكثر استدامة.

- **التنبؤ بالعواقب المستقبلية:**
ربط المؤشرات المركبة مع نماذج التوسع العمراني والتغير المناخي لتقدير نتائج السياسات الحالية على المدى الطويل.

2.19.5 مزايا المؤشرات التكاملية

- شمولية التحليل :دمج كل الأبعاد الرئيسية للاستدامة.
- سهولة المقارنة :بين الأحياء، المدن، والفترات الزمنية المختلفة.
- تعزيز اتخاذ القرار :تزويد المخططين بصور واضحة عن نقاط القوة والضعف في البيئة الحضرية.
- مرونة التحديث :إمكانية تحديث المؤشرات ببيانات جديدة دون إعادة بناء المؤشر بالكامل.

2.19.6 التحديات المرتبطة بالمؤشرات التكاملية

- اختيار الأوزان المناسبة :يظل تحديًا كبيرًا بسبب اختلاف الخبراء والأولويات المحلية.
- توفر البيانات :بعض المؤشرات تتطلب بيانات دقيقة وغير متاحة لجميع المدن أو الأحياء.
- التفسير :مؤشرات مركبة قد تخفي التفاصيل الدقيقة لكل بُعد، ما يستدعي دعم التحليل بتفكيك المؤشر إلى مكوناته عند الحاجة.
- التغير الزمني :المؤشرات المركبة يجب أن تكون قابلة للتحديث المستمر لمواكبة التغيرات الحضرية والبيئية.

مثال لمؤشر استدامة حضرية مركب(Composite Sustainability Index)

البُعد	المؤشرات الفرعية	المقياس	الوزن المقترح	الهدف
بيئي	NDVI، جودة الهواء، GHI، UHI	0–1	0.35	تقييم صحة البيئة
اجتماعي	الوصول للمساحات الخضراء، الصحة، الإنصاف	0–1	0.30	العدالة الاجتماعية
اقتصادي	قيمة الأراضي، التكلفة/الفائدة	0–1	0.35	تحقيق جدوى اقتصادية
المؤشر المركب	دمج الأبعاد الثلاثة	0–1	1	تقييم الاستدامة الشامل

جدول 21: مثال لمؤشر استدامة حضرية مركب (Composite Sustainability Index)

2.20 الدراسات المقارنة والتكاملية

تعد الدراسات المقارنة والتكاملية أحد أهم الأساليب العلمية الحديثة في تحليل الاستدامة الحضرية، حيث تسمح بفهم الفروق بين المدن النامية والمتقدمة، ورصد مدى توافق المؤشرات المكانية مع الأهداف الاستراتيجية للتنمية المستدامة .كما تتيح هذه الدراسات التعرف على أفضل الممارسات العالمية، واستنباط دروس قابلة للتطبيق في السياقات العربية، خصوصًا في مدن الجنوب العالمي التي تواجه تحديات عمرانية وبيئية متزايدة.

2.20.1 أهمية الدراسات المقارنة

- تحديد الفجوات :تساعد الدراسات المقارنة على معرفة نقاط الضعف والقوة في الأداء الحضري بين المدن المختلفة، سواء على مستوى البيئة أو المجتمع أو الاقتصاد.
- تبادل الخبرات :من خلال مقارنة النتائج مع مدن متقدمة، يمكن تبني استراتيجيات ناجحة وتعديلها وفق السياق المحلي.
- تعزيز التنبؤ المستقبلي :فهم الاختلافات بين المدن يسمح بمحاكاة سيناريوهات التطور الحضري المتوقع، وتقدير أثر السياسات الجديدة على الاستدامة.

2.20.2 مقارنة المدن النامية والمتقدمة

تركز الدراسات المقارنة على الفروقات التالية:

1. **القدرة المؤسسية والبنية التحتية :**المدن المتقدمة غالبًا ما تمتلك نظم مراقبة واستشعار متقدمة، وقدرة على تطبيق نظم دعم القرار المكانيSDSS ، بينما المدن النامية تواجه قيودًا في توفر البيانات والبنية التحتية.
2. **البيئة الحضرية والمساحات الخضراء :**المساحات الخضراء في المدن المتقدمة موزعة بشكل أفضل، وتتوفر فيها شبكات مراقبة بيئية متقدمة، بينما المدن النامية تعاني من كثافة سكانية عالية وضغوط بيئية متزايدة.
3. **الاقتصاد والتكامل المالي :**المدن المتقدمة لديها قدرة أكبر على تمويل المشاريع الخضراء واستدامتها، في حين المدن النامية تعتمد غالبًا على تمويل محدود أو دعم خارجي.
4. **المشاركة المجتمعية** :المدن المتقدمة تشجع مشاركة المجتمع في اتخاذ القرارات، بينما المدن النامية غالبًا ما تواجه ضعف مشاركة المواطنين في التخطيط الحضري.

2.20.3 تقييم المؤشرات في السياقات العربية

- توضح الدراسات أن المدن العربية تواجه تحديات خاصة بسبب النمو السريع، كثافة السكان، وتغير المناخ، مما يجعل اعتماد مؤشرات تكاملية ضرورة ملحة.
- يتم التركيز على المؤشرات البيئية مثل NDVI وUHI، لتحديد المناطق الحضرية الساخنة وقلة الغطاء النباتي.
- المؤشرات الاجتماعية مهمة لتقييم الوصول إلى الخدمات والمساحات الخضراء في أحياء الفقراء والمناطق العشوائية.
- المؤشرات الاقتصادية تساعد على فهم التكاليف والفوائد للمشاريع البيئية، مثل تشجير الشوارع أو إنشاء حدائق عامة، وربطها بالقيمة السوقية للعقارات[39].

[39] • Alshuwaikhat, H. M., & Mohammed, I. (2017). "Sustainability Assessment of Urban Development in Arab Cities." *Sustainability*, 9(2).
• Elgazzar, R. F., & Rashed, T. (2019). "Using Remote Sensing for Urban Environmental Indicators in Arab Cities." *Journal of Urban Management*, 8(3).
• UN-Habitat (2020). *State of Arab Cities Report 2020: Towards Sustainable Urban Transitions*.

2.20.4 مؤشرات الرصد المستدام(Long-term Monitoring Indicators)

- تهدف هذه المؤشرات إلى متابعة التطورات الحضارية على المدى الطويل، ورصد أثر السياسات المختلفة على الاستدامة البيئية والاجتماعية والاقتصادية.
- يمكن أن تشمل مؤشرات مثل:
  - معدل تغير الغطاء النباتي .(NDVI Trend Analysis)
  - تغير حرارة سطح الأرض .(UHI Temporal Analysis)
  - نمو التوسع العمراني .(NDBI Trend Analysis)
- تساعد هذه المؤشرات على تقديم توصيات استراتيجية لتحسين التخطيط الحضري وتوجيه السياسات وفق البيانات الفعلية.

جدول: مقارنة بين المؤشرات في المدن النامية والمتقدمة

البُعد	المدن المتقدمة	المدن النامية	الملاحظات
بيئي	توزيع مثالي للمساحات الخضراء، نظام مراقبة مستدام	ضغط سكاني مرتفع، محدودية المساحات الخضراء	الحاجة إلى تحسين البنية التحتية البيئية
اجتماعي	مشاركة مجتمعية واسعة، خدمات متاحة للجميع	ضعف المشاركة، تركز الخدمات في مناطق محددة	تعزيز العدالة الاجتماعية والمكانية
اقتصادي	تمويل مستدام للمشاريع، قدرة على الاستثمار	اعتماد على دعم خارجي، محدودية الموارد	تشجيع الاقتصاد الأخضر والمشاريع الصغيرة
مؤشرات رصدية	تحديث بيانات دوري، تكامل مؤشرات متقدم	نقص البيانات التاريخية، اعتماد على صور منخفضة الدقة	الحاجة إلى تحسين جمع البيانات

جدول 22: مقارنة بين المؤشرات في المدن النامية والمتقدمة

- Abubakar, I., & Aina, Y. A. (2016). "The Role of GIS in Sustainable Urban Development in the MENA Region." *Habitat International*, 56.
- Al-Hathloul, S., & Mughal, M. (2004). *Urban Development in Saudi Arabia: Challenges and Opportunities*

2.21 مستقبل المؤشرات المكانية

يمثل مستقبل المؤشرات المكانية مرحلة حاسمة في تطور التخطيط الحضري المستدام، حيث يتم الانتقال من المؤشرات التقليدية المعتمدة على بيانات محدودة أو زمنية ثابتة، إلى مؤشرات ذكية وهجينة قادرة على التكيف مع التغيرات البيئية والاجتماعية والاقتصادية في الوقت الفعلي. هذا التطور يرتبط ارتباطًا وثيقًا بالتحول الرقمي، واستخدام الذكاء الاصطناعي (AI)، وتحليل البيانات الكبيرة، ودمج المصادر الفضائية والطائرات المسيّرة.(UAVs)

2.21.1المؤشرات الهجينة(Hybrid Indices)

المؤشرات الهجينة تمثل دمجًا بين مؤشرات متعددة تقنيًا وموضوعيًا، مثل:

- الدمج بين NDVIو SAVIو NDBIو UHIلتقييم الاستدامة البيئية الحضرية بشكل شامل.
- الجمع بين المؤشرات الطيفية والمؤشرات الاجتماعية مثل الوصول إلى المساحات الخضراء أو كثافة الخدمات.
- استخدام مؤشرات اقتصادية لتحديد التكلفة/الفائدة وتحليل جدوى التدخلات البيئية.

الفائدة الرئيسية للمؤشرات الهجينة تكمن في قدرتها على:

- إظهار العلاقات التفاعلية بين الأبعاد الثلاثة (بيئية، اجتماعية، اقتصادية).
- تحديد الأولويات التخطيطية بسرعة ودقة.
- تقليل الأخطاء التحليلية الناتجة عن الاعتماد على مؤشرات أحادية البعد.

2.21.2 دور الذكاء الاصطناعي في تطوير المؤشرات

الذكاء الاصطناعي يقدم أدوات قوية لتحليل البيانات الضخمة، والتنبؤ بالتغيرات المستقبلية، وتوليد مؤشرات جديدة، من أبرز التطبيقات:

- **التعلم الآلي :(Machine Learning)** لتحليل صور الأقمار الصناعية واستخراج مؤشرات دقيقة للغطاء النباتي، المساحات المبنية، ودرجة حرارة سطح الأرض.
- **التعلم العميق :(Deep Learning)** لتصنيف أنواع الغطاء النباتي أو التنبؤ بالزحف العمراني.
- النمذجة التنبؤية :استخدام بيانات زمنية لتوقع تغيرات البيئة الحضرية، وتحديد أماكن الحاجة إلى مساحات خضراء إضافية.
- **التعرف على الأنماط المكانية :(Pattern Recognition)** لتحديد تكرار المشاكل الحضرية مثل الجزر الحرارية، مناطق الفقر، ونقاط الازدحام.

2.21.3 دمج المؤشرات مع البيانات الاجتماعية والاقتصادية

- **المؤشرات الاجتماعية** :يمكن دمج بيانات السكان، مستويات الدخل، توزيع الخدمات، وحركة المرور لتحليل أعمق للوصول المكاني والمشاركة المجتمعية.

- **المؤشـرات الاقتصـادية :**دمج بيانات السـوق العقارية، التكلفة/الفائدة، والاسـتثمار الأخضـر لتقييم جدوى التدخلات البيئية على المستوى المالي.
- **الفائدة :**يصـــبح من الممكن إنشـــاء خرائط ديناميكية تعرض أداء المدينة في الوقت الفعلي، مع القدرة على تعديل السياسات بسرعة.

2.21.4 مؤشرات ذكية للتخطيط الحضري(Smart City Indicators)

المؤشرات الذكية تمثل الجيل الجديد من أدوات القياس التي تعتمد على البيانات الحية والاتصال المستمر بين مختلف الأنظمة الحضرية:

- **المراقبة البيئية اللحظية :**أجهزة الاستشعار الموزعة لرصد جودة الهواء، حرارة السطح، وضغط المياه.
- **التنقل الذكي :**استخدام مؤشرات المرور والازدحام لتحسين تخطيط النقل وتخفيف التلوث.
- **إدارة الطاقة والمياه :**مؤشرات ذكية تقيس استهلاك الطاقة والمياه، وتحدد الفاقد أو الاستخدام غير المستدام.
- **التفاعل الاجتماعي الرقمي :**تقييم المشاركة المجتمعية من خلال تطبيقات المدن الذكية ووسائل التواصل الاجتماعي.

مقارنة بين المؤشرات التقليدية والذكية:

النوع	المصدر الرئيسي للبيانات	التحديث الزمني	دقة القياس	الاستخدامات
تقليدية	صور الأقمار الصناعية، المسوحات الميدانية	سنوي أو نصف سنوي	متوسط	التخطيط بعيد المدى، التقييم البيئي
هجينة	دمج مؤشرات بيئية، اجتماعية، اقتصادية	ربع سنوي	متوسط إلى عالي	تحليل متعدد الأبعاد، دعم القرار
ذكية (Smart Indicators)	أجهزة استشعار، بياناتIoT ، الشبكات الاجتماعية	لحظي/يومي	عالي جدًا	المراقبة اللحظية، اتخاذ القرار الفوري، التخطيط التفاعلي

جدول 23: مقارنة بين المؤشرات التقليدية والذكية – المصدر *UN-Habitat (2016).* World Cities Report: Urbanization and Development – Emerging Futures

2.21.5 التحديات المستقبلية للمؤشرات المكانية

- إدارة البيانات الضخمة :الحاجة إلى تخزين، معالجة، وتحليل كميات هائلة من البيانات المتنوعة.
- التكامل بين المصادر المختلفة :دمج البيانات الفضائية، الميدانية، والطائرات المسيّرة مع بيانات اجتماعية واقتصادية.
- التحقق الميداني :ضمان موثوقية المؤشرات الذكية، والاعتماد على Ground Truthing بشكل مستمر.
- الأخلاقيات والخصوصية :التعامل مع البيانات الشخصية والحساسة ضمن مؤشرات ذكية بطريقة آمنة وشرعية.

2.22الخلاصة النقدية للفصل

يختتم هذا الفصل سلسلة متكاملة من التحليل المكثف حول المؤشرات المكانية المستمدة من الاستشعار عن بعد ودورها في دعم التخطيط الحضري المستدام، حيث قدمنا دراسة شاملة لكل من NDVI، NDBI، SAVI، UHI، وتطور المؤشرات التكاملية والهجينة، ودور الذكاء الاصطناعي، والدراسات المقارنة بين المدن النامية والمتقدمة، وصولاً إلى المستقبل الذكي للمؤشرات. في هذا القسم، نقدم تحليلًا نقديًا معمّقًا يربط كل هذه المفاهيم معاً ويستخلص التوصيات والتحديات الأساسية.

2.22.1 من المؤشرات الطيفية إلى أدوات التخطيط الحضري المستدام

المؤشرات الطيفية مثل NDVI و NDBIو SAVIتمثل الخطوة الأولى في تحويل البيانات الفضائية إلى أدوات كمية يمكن أن تدعم التخطيط الحضري. على الرغم من بساطتها النسبية مقارنة بالمؤشرات التكاملية، إلا أنها توفر قاعدة علمية دقيقة لتحديد:

- المناطق ذات الغطاء النباتي المنخفض أو التدهور البيئي.
- الامتداد العمراني والتوسع الحضري.
- الفجوات الحرارية بين الأحياء (UHI) وتأثيرها على جودة الحياة.

تسمح هذه المؤشرات بتحويل الصور الفضائية والملاحظات الطيفية إلى خرائط تحليلية يمكن للمخططين من خلالها:

1. تحديد الأولويات البيئية مثل المساحات الخضراء المطلوبة للحد من الحرارة وتحسين جودة الهواء.
2. مراقبة التوسع العمراني والتحولات الأرضية، مع فهم التفاعل بين البيئة والبنية التحتية.
3. إنشاء خطط تدخل فعالة تعتمد على بيانات دقيقة وقابلة للقياس.

ومع ذلك، تشير التحليلات إلى أن هذه المؤشرات محدودة من حيث التفسير الاجتماعي والاقتصادي، ما يفرض دمجها ضمن مؤشرات هجينة لتقييم الاستدامة الشاملة.

2.22.2 التحديات والقيود الحالية

على الرغم من التطور الكبير، تواجه المؤشرات المكانية مجموعة من القيود:

1. **الدقة المكانية والطيفية:**
   a) الصور الفضائية ذات الدقة المنخفضة قد تخفي التفاصيل الصغيرة في المدن الكثيفة.
   b) الاختلافات الطيفية بين أنواع التربة والمباني قد تؤثر على NDVI و.SAVI
2. **التأثير الزماني:**
   a) المؤشرات تتأثر بالمواسم، حيث يختلف الغطاء النباتي والحرارة السطحية حسب الفصول.
   b) الحاجة إلى مؤشرات ديناميكية لتقييم التغيرات على مدار العام.

3. **توفر البيانات:**

a) بعض المدن النامية تعاني من نقص البيانات التاريخية والمستحدثة.

b) قيود الوصول إلى البيانات الاقتصادية والاجتماعية تحد من قدرة التحليل المتكامل.

4. **التحقق الميداني:(Ground Truthing)**

a) يظل التحقق الميداني ضرورة لضمان صحة المؤشرات، خصوصًا عند تطبيق المؤشرات المركبة أو الذكية.

5. **الدمج بين الأبعاد:**

a) الجمع بين البُعد البيئي والاجتماعي والاقتصادي يفرض تحديات في تحديد الأوزان النسبية للأبعاد المختلفة.

b) اختلاف الأولويات بين المدن يجعل من الصعب إيجاد معيار موحد.

2.22.3 الإمكانيات المستقبلية

رغم القيود، تقدم المؤشرات المكانية إمكانيات كبيرة لتطوير التخطيط الحضري المستدام:

1. **المؤشرات التكاملية والمركبة:**

a) دمج NDVI و NDBIو SAVIو UHIمع مؤشرات اجتماعية واقتصادية ينتج مؤشراً واحداً متكاملاً يمكن استخدامه في:

- اختيار مواقع الحدائق والممرات الخضراء.
- دعم السياسات الاقتصادية والاجتماعية للمشاريع الحضرية.

2. **المؤشرات الذكية والهجينة:**

a) استخدام البيانات اللحظية من أجهزة الاستشعار والطائرات المسيرة والذكاء الاصطناعي لإنشاء مؤشرات ديناميكية.

b) تمكين التخطيط التفاعلي والتنبؤ بالمخاطر البيئية والاجتماعية في الوقت الفعلي.

3. **التحليل المقارن:**

a) رصد أداء المدن النامية والمتقدمة يوضح نقاط القوة والضعف ويساعد في استنساخ أفضل الممارسات مع تكييفها للسياق المحلي.

4. **التكامل مع نظم دعم القرار المكاني:(SDSS)**

a) يمكن توظيف المؤشرات التكاملية في GIS و SDSSلتوفير خرائط ديناميكية، تقارير تحليلية، وتوصيات عملية للمخططين وصانعي القرار.

2.22.4 التوصيات لتطوير المؤشرات المستقبلية

1. **توسيع نطاق البيانات :دمج بيانات اجتماعية، اقتصادية، وصحية مع المؤشرات البيئية.**
2. **الاعتماد على الذكاء الاصطناعي :لتحليل البيانات الكبيرة، التنبؤ بالتغيرات المستقبلية، وإنشاء مؤشرات هجينة ذكية.**
3. **تعزيز التحقق الميداني :لضمان دقة المؤشرات المركبة والذكية، مع تحديث دوري للبيانات.**
4. **تكييف المؤشرات محليًا :مراعاة خصوصية المدن النامية وظروف الجنوب العالمي، مع تحديد أولويات الاستدامة حسب الحاجة المحلية.**
5. **إنشاء مؤشرات متكاملة قابلة للمقارنة دوليًا :لتسهيل الدراسات المقارنة والاستفادة من تجارب المدن المتقدمة.**

2.22.5 الخلاصة النهائية

اعتمد البحث على المؤشرات البيئية الواردة في الفصل الثاني كأدوات تحليل مقارنة بين المؤشرات البيئية والاقتصادية والاجتماعية لتحديد مدى ارتباطها بإطار البنية التحتية الخضراء. وقد أسهمت هذه الجداول في تطوير الأداة التحليلية المقترحة (RPI) من خلال استخلاص العلاقات الكمية بين المؤشرات، وتحديد الأوزان المرجعية للمعايير ضمن السيناريوهات الإسقاطية، مما جعلها جزءاً أساسياً من عملية بناء نموذج التقييم المكاني متعدد المعايير، لا مجرد عرض توثيقي.

يمكن القول إن المؤشرات المكانية لم تعد أدوات مجردة للقياس البيئي، بل أصبحت أدوات تخطيطية استراتيجية تدعم التنمية المستدامة على ثلاثة مستويات:

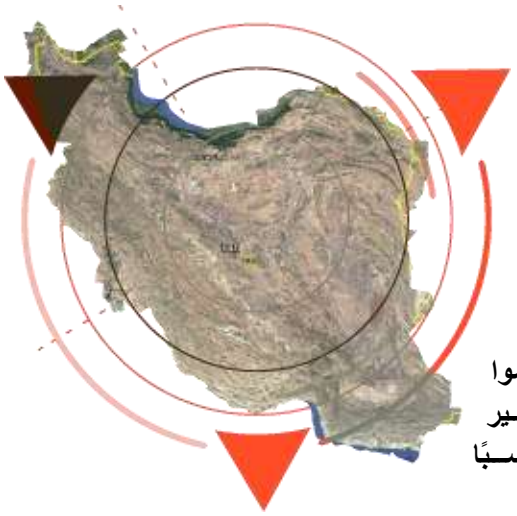
1. **البيئي :**مراقبة وتحسين الغطاء النباتي، تقليل الجزر الحرارية، والحفاظ على التنوع البيولوجي.
2. **الاجتماعي :**تحسين الوصول إلى الخدمات والمساحات الخضراء، تعزيز المشاركة المجتمعية، ودعم العدالة المكانية.
3. **الاقتصادي :**تحسين جدوى المشاريع البيئية، تعزيز الاقتصاد الأخضر، وربط القيمة الاقتصادية بالمؤشرات البيئية والاجتماعية.

باختصار، يشير التحليل النقدي إلى أن دمج جميع المؤشرات في أطر تكاملية وهجينة، مدعومة بالذكاء الاصطناعي ونظم دعم القرار المكاني، يمثل الطريق الأمثل نحو تخطيط حضري مستدام وعصري، مع مراعاة خصوصيات المدن النامية وظروف الجنوب العالمي.

الفصل الثالث: دراسات الحالة

3.1 التمهيد حول اختيار مدينة مشهد (Mashhad) الإيرانية كحالة عالمية للمقارنة مع دمشق

3.1.1 أهمية دراسات الحالات العالمية في بحوث التخطيط الحضري



رسم توضيحي 1: صورة قمر صناعية لجمهورية إيران
عمل الباحث

دراسات الحالات العالمية تلعب دورًا مركزيًا في الأبحاث التطبيقية لأنها:

1. توفّر نماذج منهجية قابلة للتكرار عبر سياقات مختلفة؛
2. تسمح باختبار صلاحية أدوات القياس والتحليل) مثل NDVI, NDBI, LST)في بيئات مناخية متباينة؛
3. تنتج دروسًا قابلة للتكييف تُسهم في صياغة توصيات سياسية وتقنية مدروسة.

في هذا الإطار، تُقدَّم دراسة مشهد **كحالة مرجعية لأن مؤلفيها استخدموا سلسلة زمنية من صور Landsat وتحليلات ENVI/ArcGIS لتفسير ديناميات الجزيرة الحرارية في بيئة شبه جافة، وهو ما يجعلها مرجعًا مناسبًا عند بناء بروتوكول مماثل لمدينة دمشق.**

3.1.2 دوافع اختيار مشهد كمرجع لمقارنة دمشق

3.1.2.1 تشابهات مناخية وحضرية

- مشهد ودمشق تتقاسمان عناصر مناخية تحميل حراري صيفي (انخفاض هطول نسبياً، مواسم حارة)، وبالتالي تتأثر كلتاهما بعوامل تقلص الغطاء النباتي وتوسّع المسطحات المعبّدة.

3.1.2.2 اختلافات سياقية مهمة

- النمو السكاني: في مشهد مرتبط بنمو اقتصادي داخلي، بينما في دمشق تأثّر النمو والتوزع السكاني بعوامل النزوح والحروب؛
- الموارد المائية والتضاريس: وجود نهر بردى وغوطة دمشق يميّز دمشق عن محيط مشهد ذي أراضٍ بور واسعة.

هذه الاختلافات تؤكد أن نقل النتائج من مشهد إلى دمشق يتطلب تعديل الفرضيات وتكييف المؤشرات حسب السياق المحلي.

3.1.3 القيمة العلمية والمنهجية لدراسة مشهد بالنسبة لبحث دمشق

1. **قيمة منهجية :**تقدّم الدراسة بروتوكولًا متكاملاً) اختيار سنوات صيفية، تصحيح إشعاعيFLAASH ، تحويلLST→Tb→Radiance→DN ، وحساب ρv عبر (NDVI يمكن تكراره لدمشق مع ضبط المعاملات المحلية.
2. **قيمة مقارنة :**جداول ونواتج Mashhad تمكّن من إجراء مقارنة كمية (مثل نسبة الزيادة في المسطح المبني وتناقص الغطاء النباتي) وإخراج مؤشرات لمدى حساسية المدن الشبيهة لظاهرة.UHI
3. **قيمة تطبيقية :**توصيات عملية في مشهد (مثلاً: استخدام أرصفة باردة، مهمات زيادة الانعكاسية، تخطيط محاور خضراء) تمكّن من اقتراح حلول قابلة للتكييف ضمن برامج إعادة الإعمار في دمشق.

الرقم	السنة	المؤلف(ون)	البيانات	دراسة الحالة	موضوع الدراسة	أهم النتائج
1	2003	Streutker	NOAA AVHRR	هيوستن، تكساس (الولايات المتحدة)	الزيادة في شدة UHI واتساع	• تختلف النتائج .سمة مناخية ديناميكية UHI يجب اعتبار • الغطاء السحابي والغطاء النباتي يؤثران • .باختلاف منهج التحليل .UHI في شدة ومدى
2	2004	Weng وآخرون	Landsat ETM+	إنديانابوليس، الولايات المتحدة	العلاقة بين LST والغطاء النباتي	• وأنماط NDVI ترتبط مباشرة بتغيرات LST توزيعات تتأثر UHI الأنماط المكانية للـ • .المساحات الخضراء .بالديناميكيات الحرارية والزمنية
3	2005	Tran وآخرون	TERRA/MODIS, Landsat ETM+	ثماني مدن آسيوية كبرى	UHI تأثيرات والأنماط المكانية	• الكثافة السكانية تؤثر على شدة وتطور النمط المكاني لظاهرة .UHI.
4	2005	Chen وآخرون	Landsat TM/ETM+	دلتا نهر اللؤلؤ، الصين	العلاقة بين تغيّرات LULC وUHI	• .UHI نوع الغطاء الأرضي يؤثر على درجة الحرارة ونمط • يرتبطان NDWIو NDVI • .NDBI الحرارة ترتبط إيجابياً مع .(NDVI < 0.6) سلبياً مع الحرارة في نطاقات محدودة
5	2005	Baikو Kim	محطات أرصاد أوتوماتيكية	سيؤول، كوريا	UHI الزماني-المكاني	في سيؤول كانت • .UHI زيادة الغيوم وسرعة الرياح تقلل شدة • أقوى في أيام الأسبوع والليل مقارنة بعطلة نهاية الأسبوع UHI .والنهار
6	2006	Stathopoulouو Cartalis	Landsat ETM+, Corine	مدن كبرى في اليونان	البيئة الحرارية نهاراً وفترات الدفء	• بعض استخدامات الأرض (المناطق المبنية بكثافة/القريبة من .الموانئ) تشكل بؤر حرارية حضرية
7	2007	Jusuf وآخرون	Landsat ETM+	سنغافورة	العلاقة بين LULC وUHI	• أبرد/أحر .البيئة الحرارية تتأثر بنوع استخدام الأرض • المناطق: الحدائق والمناطق الصناعية (نهاراً)، المطارات .والمناطق التجارية (ليلاً)

الرقم	السنة	المؤلف(ون)	البيانات	دراسة الحالة	موضوع الدراسة	أهم النتائج
8	2009	وآخرون Li	Landsat TM	شنغهاي، الصين	التقييم الكمي لـ UHI	• UHI. عوامل متعددة مسؤولة عن الأنماط المعقدة لظاهرة • زيادات ملحوظة في الشدة والمدى بين 1997–2004.

جدول 24: مراجعة الأدبيات العالمية حول ظاهرة الجزيرة الحرارية الحضرية (UHI) — مقتبس من دراسة Mashhad (Naserikia et al., 2019)

(الجدول أعلاه مُستخدم هنا لأغراض منهجية ومقارنة؛ البيانات تخص Mashhad وليست بيانات دمشق)

3.1.4 حدود النقل المباشر للنتائج من مشهد إلى دمشق

3.1.4.1 محددات منهجية ومناخية

- وجود مساحات تربة بور حول مشهد يجعل NDVI و NDBIأقل فعالية كمؤشرات مباشرة في بعض الحالات — هذا الأمر قد لا ينطبق بنفس الدرجة في دمشق حيث يلعب قرب مصادر المياه والتضاريس دورًا مختلفًا.

3.1.4.2 محددات اجتماعية وسياسية

- سياسات التخطيط، استقرار المؤسسات، وتأثير النزوح تُغيّر ديناميكيات الاستخدام الأرضي؛ لذلك يجب إدراج متغيرات اجتماعية-اقتصادية عند تطبيق إطار Mashhad على دمشق.

3.1.5 كيف يُثري إدراج مشهد فصل دراسات الحالة

1. **تأطير نقدي :**يوفّر مرجعية نقدية تساعد في تقييم مدى اتساق أدوات القياس) مثل (LST في بيئات شبه جافة.
2. **تحويل منهجي :**يقدّم قالب عمل عملي (data pipeline) يجب نسخه وتعديله لدمشق.
3. **تغذية السياسات :**يسمح باستنباط توصيات تقنية قابلة للتطبيق ضمن برامج تحسين المناخ الحضري وإدارة المخاطر الحرارية.

3.2 منطقة الدراسة

منطقة الدراسة هي منطقة تبلغ مساحتها 1400 كم² في شمال شرق إيران، وتشمل مدينة مشهد الحضرية والمناطق المحيطة بها .تقع هذه المدينة عند خط عرض 36 20.درجة شمالاً وخط طول 59 35.درجة شرقاً .وهي عاصمة مقاطعة خراسان الرضوية وثاني أكبر مدينة من حيث عدد السكان في إيران، حيث يقدر عدد سكانها بحوالي 3 ملايين نسمة ، وتغطي مساحة إجمالية تبلغ حوالي 350 كم² .شهدت مشهد نموًا سكانيًا سريعًا في العقود الثلاثة الماضية .وفقًا للتعدادات التي أعلنها المركز الإحصائي الإيراني ، تضاعف عدد سكانها من عام 1987 (1 463,508,نسمة) إلى عام 2017 (3 001,184,نسمة .(كما أنها مدينة سياحية، حيث يزورها أكثر من 20 مليون سائح من جميع أنحاء العالم في فصل الصيف كل عام ، مما يؤدي إلى تلوث الهواء وإطلاق حرارة مفرطة خلال العطلات .تتمتع مشهد بمناخ السهوب (steppe climate)مع شتاء بارد وصيف حار .تستقبل هذه المدينة هطول أمطار سنوي يبلغ متوسطه 250 ملم (9 8. بوصة. يتميز الصيف بدرجات حرارة عالية تتجاوز أحيانًا 35 درجة مئوية.

رسم توضيحي 2: موقع مدينة مشهد - عمل الباحث

3.3 المنهجية

3.3.1 .بيانات الاستشعار عن بعد، المعالجة المسبقة للصور وحساب درجة حرارة سطح الأرض (LST)

لفحص التأثيرات البشرية على الجزيرة الحرارية الحضرية (UHI) في مشهد، إيران، تم الكشف عن تغيرات الغطاء الأرضي ودرجات حرارة سطح الأرض (LSTs) بين عامي 1988 و 2017 باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد من لاندسات .TM/OLI تفاصيل الصور موضحة في الجدول 2. تم اختيار الصور من أكثر الفترات حرارة في ثلاث سنوات بمساعدة قاعدة بيانات Weather Underground والموقع .تم اختيار صور الأقمار الصناعية مع مراعاة تشابه الفترات الزمنية، والظروف الجوية، والحد الأدنى من الغطاء السحابي. تم الحصول على أرشيف بيانات لاندسات والوصول إليه عبر موقع. EarthExplorer

تم اعتماد وحدة) FLAASH وهي اختصار لـ Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)لتصحيح الأخطاء الجوية، في برنامجENVI5.3 ، بعد استخدام أداة تصحيح إشعاعي (radiometric correction)لإنتاج ملف إدخال (Radiance) لتصحيح .FLAASH يتم استخدام نموذج الإرسال الإشعاعيMODTRN4 ، وهو أحد أكثر الخوارزميات الإشعاعية الجوية دقة ، في هذا النموذج. يجب إدخال المتغيرات الرئيسية في الوحدة، مثل الموقع المركزي، وارتفاع المستشعر، ووقت التصوير، والدقة، وهي متاحة في ملف رأس الصور، من أجل التصحيح الجوي. أخيرًا، تم توفير خرائط درجة حرارة سطح الأرض في برنامج ENVI5.3باستخدام المعادلة (1) والمعادلة (2) [والمعادلة (3) والمعادلة (4) للأعوام 1988 و 2001 و 2017.

$$LST(^{\circ}\mathrm{C}) = \frac{(T_b - 273.15)}{1 + \left(\lambda \times \left(\frac{(T_b - 273.15)}{14380}\right)\right) Ln\varepsilon}, \quad (1)$$

$$T_b = \frac{K_2}{\left\{Ln\left[\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right]\right\}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = 0.004 \times \rho_v + 0.986, \quad (3)$$

$$\rho_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2, \quad (4)$$

حيث أن Tb(درجة حرارة الجسم الأسود) هي درجة الحرارة الفعالة عند القمر الصناعي بالكلفن؛ و lهو الطول الموجي للإشعاع المنبعث؛ و #هي الانبعاثية(emissivity) ؛ و K2وK1هما ثوابت المعايرة قبل الإطلاق بـ Wm−2والكلفن؛ و Luهو الإشعاع الطيفي بـ Wm−2sr−1mm−1؛ و) p=h×c/sحيث sهو ثابت بولتزمان، و hهو ثابت بلانك، و cهي سرعة الضوء)؛ و rvهو الغطاء النباتي الجزئي.

3.3.2 تصنيف الغطاء الأرضي

تُستخدم بيانات الاستشعار عن بعد على نطاق واسع لتوفير خرائط استخدامات الأراضي/الغطاء الأرضي. تم تصنيف صور الأعوام 1988 و 2001 و 2017 باستخدام نموذج الاحتمالية القصوى (maximum likelihood model) في برنامج ENVI5.3 للحصول على توزيع الغطاء الأرضي. تم استخدام توليفات نطاقات الألوان الكاذبة (False color band combinations) (RGB = 543 للاندسات 8، و RGB = 432 للاندسات 5 (للمساعدة في تطوير عينات تدريب لكل نوع من أنواع الغطاء الأرضي (LC) حيث توفر هذه التوليفات تصورات مصنفة بشكل أفضل للبيئات الحضرية. تم تصنيف الغطاء الأرضي في منطقة الدراسة هذه إلى ثلاث فئات، وهي الأسطح المبنية، والتربة، والغطاء النباتي. بعد ذلك، تم استخدام مصفوفة الإرباك (confusion Matrix) باستخدام مناطق الاهتمام للحقيقة الأرضية (Ground Truth ROIs) في ENVI5.3 لتقييم دقة تصنيف الاحتمالية القصوى في هذه الدراسة، كما تم الحصول على معامل كابا (Kappa coefficient) لكل عام. جميع المعلومات التي تم الحصول عليها حول الدقة الإجمالية ومعامل كابا لتصنيف الغطاء الأرضي موضحة في الجدول 3.

Table 3. The overall accuracy of classified land cover.

Year	Overall Accuracy	Kappa Coefficient
1988	94%	0.88
2001	97%	0.96
2017	98%	0.87

رسم توضيحي 3: الدقة الإجمالية ومعامل كابا لتصنيف الغطاء الأرضي

3.3.3 مؤشر NDVI ومؤشر:NDBI

تم الحصول على مؤشري NDVI و NDBI لدراسة تغيرات الغطاء الأرضي خلال فترة تقارب 30 عامًا، والعلاقة بين الغطاء الأرضي ودرجة حرارة سطح الأرض .(LST) يُحسب مؤشر NDVI على نطاق واسع باستخدام المعادلة (5) التي تعبر عن كثافة الغطاء النباتي.

حيث أن rnirو rrهما قيم الانعكاس لنطاقي الأشعة تحت الحمراء القريبة والنطاق الأحمر في صور لاندسات على التوالي. تتراوح قيمة NDVI لكل بكسل بين -1 و 1، حيث تشير القيم الأكبر من 0 إلى وجود غطاء نباتي، والقيم الأعلى تدل على أراضٍ خضراء أكثر كثافة. في المقابل، يمكن استخدام مؤشر NDBI (المعادلة 6) بفعالية لإظهار المعالم المبنية. تتراوح قيم هذا المؤشر من -1 إلى 1 تمامًا مثلNDVI ، لكن الأرقام الموجبة تشير إلى المناطق المبنية .

$$NDBI = \frac{b_{ni} - b_{mi}}{b_{ni} + b_{mi}}, \quad (6)$$

حيث أن bmirو bnirهما الأعداد الرقمية لنطاقي الأشعة تحت الحمراء المتوسطة والأشعة تحت الحمراء القريبة في صور لاندسات، على التوالي. وفقًا لـــ Zhang وآخرون [44]، قد تختلف نطاقات قيم هذه المؤشرات من دراسة إلى أخرى بسبب وقت التقاط الصورة، والظروف الجوية المختلفة، وهطول الأمطار.

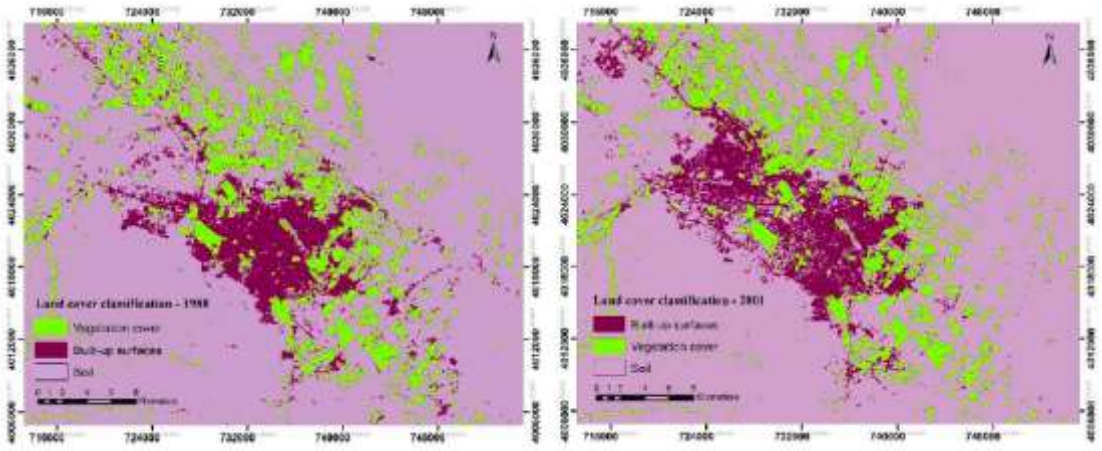
3.4 النتائج والمناقشة

3.4.1 خرائط الغطاء الأرضي

تتطلب دراسة تأثيرات التوسع الحضري على التغيرات المناخية تقييم تغيرات الغطاء الأرضي .[5] (LC) لهذا الغرض، تم إنتاج خرائط للمناطق المشيدة وتغيرات الغطاء النباتي (الشكل 2). توسع نمط التوزيع النقطي للمناطق المشيدة في شمال غرب المدينة عام 1988 ليصبح نمطًا متسلسلاً في عام 2001 ونمطًا مركزًا في عام 2017، مما أدى إلى الإنشاء التدريجي لأنماط غير منتظمة من الأرصفة الإسفلتية التي لها تأثير كبير على تكوين وزيادة شدة الجزيرة الحرارية الحضرية (UHI) في مدينة مشهد خلال فترة تقارب 30 عامًا. بالإضافة إلى ذلك، تجدر الإشارة إلى أن الشكل الحضري المركز حول وسط المدينة ظل دون تغيير، ومن خلال البيانات الموقعية، يمكن القول إن المناطق المشيدة في هذا الجزء من المدينة أصبحت أكثر كثافة. بشكل عام، توسعت المناطق المبنية في اتجاهات مختلفة خلال فترة الدراسة.

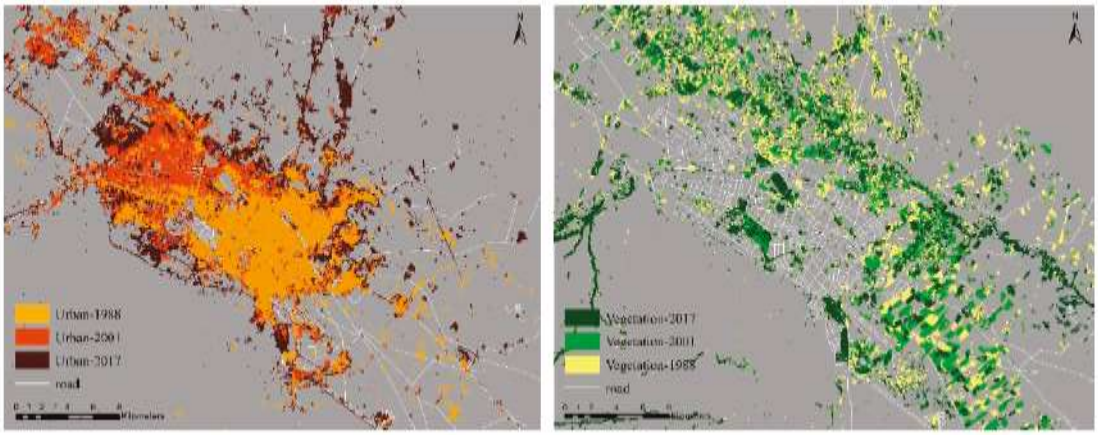
من ناحية أخرى، تباين الغطاء النباتي بشكل كبير من عام 2001 إلى عام 2017، ولكن كما يظهر في الشكل 2، ظل دون تغيير تقريبًا في عام 2001، مما يشير إلى أنه من عام 1988 إلى عام 2001 كان التطور المحتمل للجزيرة الحرارية الحضرية يرجع بشكل أساسي إلى توسع المناطق المشيدة، وزيادة الأسطح غير المنفذة، والتسخين بشري المصدر. علاوة على ذلك، انخفض الغطاء النباتي حول المدينة، خاصة في الأجزاء الشمالية الشرقية والجنوبية

الشرقية والشمالية، في عام 2017، مما أثر على حجم ونمط توزيع الجزيرة الحرارية الحضرية [4] في هذه المدينة. بالإضـــافة إلى ذلك، تحولت نســـبة كبيرة من المناطق المذكورة التي كانت مغطاة بالغطاء النباتي في عامي 1988 و 2001 إلى مساحات مبنية في عام 2017.



رسم توضيحي 4: التوزيع المكاني للمناطق المشيدة والغطاء النباتي خلال فترة الدراسة

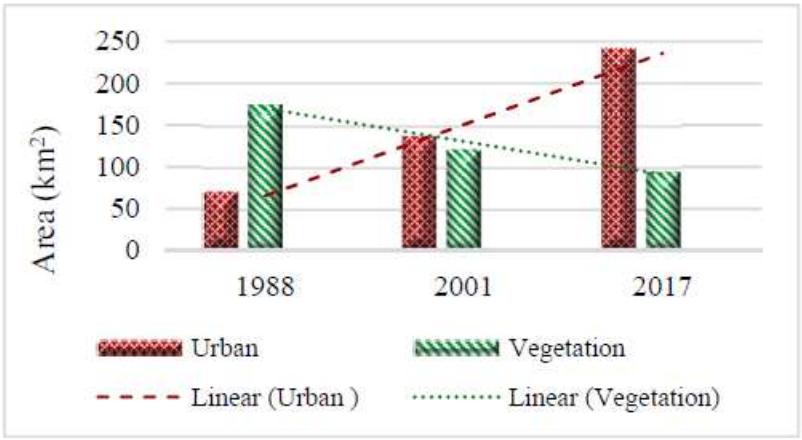
يظهر الشكل توسع المناطق المبنية والتغيرات في المناطق المغطاة بالغطاء النباتي في السنوات الثلاث جميعها، والتفاصيل معروضة في الجدول 4 والشكل 5



رسم توضيحي 5: الأراضي الحضرية والغطاء النباتي في الأعوام 1988 و 2001 و 2017

بشكل عام، يمكن ملاحظة أن المناطق المشيدة زادت بشكل كبير، بينما شهد الغطاء النباتي انخفاضًا كبيرًا خاصة من عام 2001 إلى عام 2017. زادت النسبة المئوية للمنطقة المبنية من 5.11% في عام 1988 إلى 9.85% في عام 2001 و 17.29% في عام 2017، بينما كانت نسبة الغطاء النباتي 12.45% و 8.71% و 6.80% في الأعوام 1988 و 2001 و 2017 على التوالي، مع اتجاه تنازلي .أدت عملية التوسع الحضري في المدينة إلى تدهور الغطاء النباتي مما أدى إلى تفاقم شدة الجزيرة الحرارية الحضرية. ومع ذلك، أجبر الجفاف العديد من المزارعين على ترك

أراضيهم الزراعية مما أدى إلى انخفاض واضح في نسبة الأراضي الزراعية. تحولت معظم الأراضي الزراعية إلى غطاء أرضي من التربة في عام 2017، خاصة الأراضي الزراعية في شمال وجنوب غرب منطقة الدراسة. وفقًا لـ Chenوآخرون [5]، هناك علاقة سلبية بين التربة الجرداء ودرجة الحرارة، مما يشير إلى أن اتجاه تحول الغطاء النباتي إلى تربة جرداء يزيد بالتأكيد من حجم ومدى الجزيرة الحرارية الحضرية.



رسم توضيحي 6:. تغيرات الأراضي الحضرية والغطاء النباتي في منطقة الدراسة من 1988 إلى 2017. شهدت مشهد نموًا سريعًا مصحوبًا بتغير سريع في الغطاء الأرضي من عام 1988 إلى عام 2017.

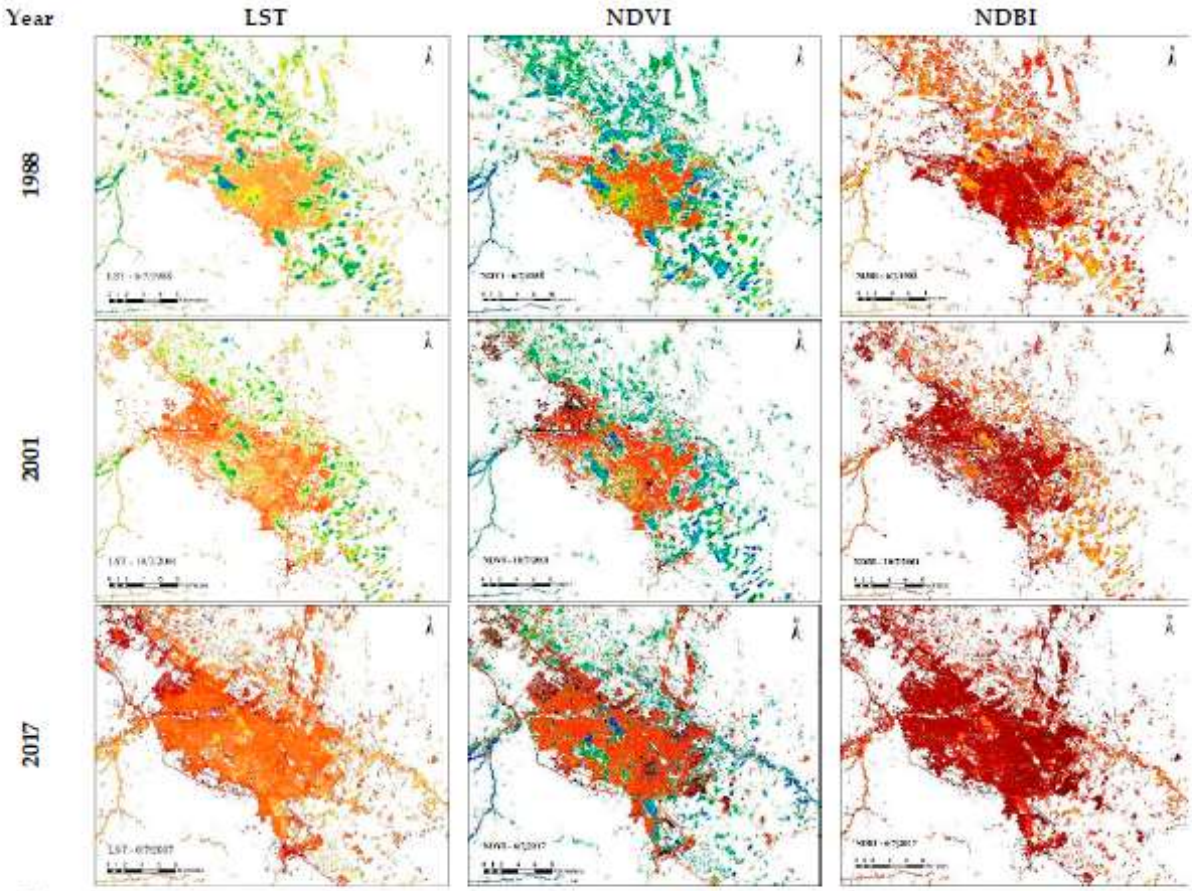
شـهدت مشـهد نموًا سـريعًا مصـحوبًا بتغير سـريع في الغطاء الأرضـي من عام 1988 إلى عام 2017 حيث هي ثاني أكبر مدينة في إيران وقد سـافر أو هاجر عدد كبير من الناس إلى هذه المدينة لأغراض مختلفة، مما أدى إلى زيادة كبيرة في المناطق المبنية والبنى التحتية، ونتج عنه مساحة كبيرة من الأسطح غير المنفذة، مما ساهم في ظاهرة الجزيرة الحرارية الحضرية، لتلبية احتياجات السكان المتزايدين. يمكن القول إن المساهمين الرئيسيين في الجزيرة الحرارية الحضرية في منطقة الدراسـة كانوا زيادة الأسطح المبنية، وانخفاض الغطاء النباتي، وتحول أسطح الغطاء النباتي إلى تربة جرداء، وتزايد الكثافة السكانية.

3.4.2 التوزيع المكاني والزماني لدرجة حرارة سطح الأرض(LST)

نظرًا لوجود علاقة سببية بين درجة حرارة سطح الأرض والجزيرة الحرارية الحضرية، ولتحقيق فهم أفضل لتوزيع تجمعات الجزيرة الحرارية الحضرية والتغيرات خلال الفترتين الزمنيتين، تم إنتاج ثلاث خرائط لدرجة حرارة سطح الأرض المسـتخلصـة لمنطقة الدراسـة. اسـتند التحقق من صـحة البيانات إلى دقة جمع البيانات، والتي تم فحصـها بمقارنتها بالأبحاث والدراسـات السـابقة حول هذا الموضـوع. يشـير الشـكل 5 إلى التوزيع الزماني والمكاني لفئات درجة حرارة سطح الأرض للأعوام 1988 و 2001 و 2017.

كما يظهر في الشـكل 5، شـهدت درجة حرارة سـطح الأرض في منطقة الدراسـة زيادة إجمالية خلال هذه الفترة، مما يعني أنه لوحظت درجات حرارة أعلى في عام 2017 مقارنة بعامي 2001 و 1988. تحول النمط المكاني المتناثر للمناطق ذات درجات الحرارة المرتفعة نسـبيًا في عام 1988 إلى نمط متصـل نسـبيًا في عام 2001، وإلى نمط أكثر

اتصـالاً في عام 2017، بالتزامن مع توسـع النظام الحضـري الإقليمي. بمقارنة خرائط تصـنيف الغطاء الأرضـي مع خرائطLST ، كانت مراكز المناطق ذات درجات الحرارة المرتفعة متوافقة مع المعالم المبنية، بينما كانت الأســطح



رسم توضيحي 7: درجة حرارة سطح الأرض (LST)، ومؤشر الاختلاف الطبيعي للغطاء النباتي (NDVI)، ومؤشر الاختلاف الطبيعي للمناطق المبنية (NDBI) في الأعوام 1988 و 2001 و 2017.

ذات درجات الحرارة الباردة متوافقة مع الغطاء النباتي، خاصــة في عام 2017. يتضــح في الشــكل 7 أن نمو شــدة الجزيرة الحرارية الحضــرية وارتفاع درجات الحرارة في شــمال وشــمال غرب منطقة الدراســة قد تأثر بالتطور الحضــري واســتبدال الغطاء النباتي الطبيعي في هذه المناطق. لذلك، كلما كانت المناطق أكثر تحضــرًا، زادت شــدة الجزيرة الحرارية الحضرية، نتيجة لتقليص الأراضي الطبيعية في منطقة الدراسة.

3.4.3 العلاقة بين درجة حرارة سطح الأرض (LST) وأنواع الغطاء الأرضي(LC)

في هذا الجزء من التجربة ، تم استخدام تحليلات للعلاقات بين درجة حرارة سطح الأرض ومؤشرين، هما NDVIوNDBI ، لتقييم تأثير أنواع الغطاء الأرضي على الخصائص الحرارية الحضرية.

3.4.3.1 العلاقة بين LST-NDVI وLST-NDBI

لفهم أفضل للعلاقة بين LST و NDVI و NDBI في منطقة الدراسة، تم رسم خرائط لهذه المؤشرات في الشكل 7. وفقًا للشكل، تغير توزيع درجات الحرارة في الفترة الموضحة مع تغير قيم NDVI و NDBI في منطقة الدراسة. في الواقع، وُجدت درجات الحرارة الأعلى في المناطق ذات قيم NDBI الأعلى وقيم NDVI الأقل، بينما لوحظت درجات الحرارة المنخفضة في المناطق ذات قيم NDBI الأقل وقيم NDVI الأعلى. لذلك، أدت زيادة كثافة الأسطح المبنية مع انخفاض كثافة الغطاء النباتي إلى ارتفاع ملحوظ في درجة الحرارة وشدة الجزيرة الحرارية الحضرية (UHI)على مدى الثلاثين عامًا الماضية .لتقييم النمط الحراري الحضري كميًا، تم حساب القيم الدنيا والمتوسطة والقصوى للمؤشرات الثلاثة (LST, NDVI, NDBI) في الأعوام 1988 و 2001 و 2017 وعرضها في الجدول 26. كما يتضح من الجدول 26، في حالة عام 1988، تراوح مؤشر NDVI من -0.024 إلى 0.864، بينما تباين هذا المؤشر من -0.144 إلى 0.849 في عام 2001 ومن -0.884 إلى 0.964 في عام 2017. على الرغم من أن نطاق قيم NDVI لم يتغير بشكل كبير، خاصة من 1988 إلى 2001، إلا أن متوسط قيم NDVI شهد اتجاهًا تنازليًا من 0.322 في عام 1988 إلى 0.244 في عام 2001 و 0.219 في عام 2017. في المقابل، شهدت قيم NDBI اتجاهًا عكسيًا في نفس الوقت.

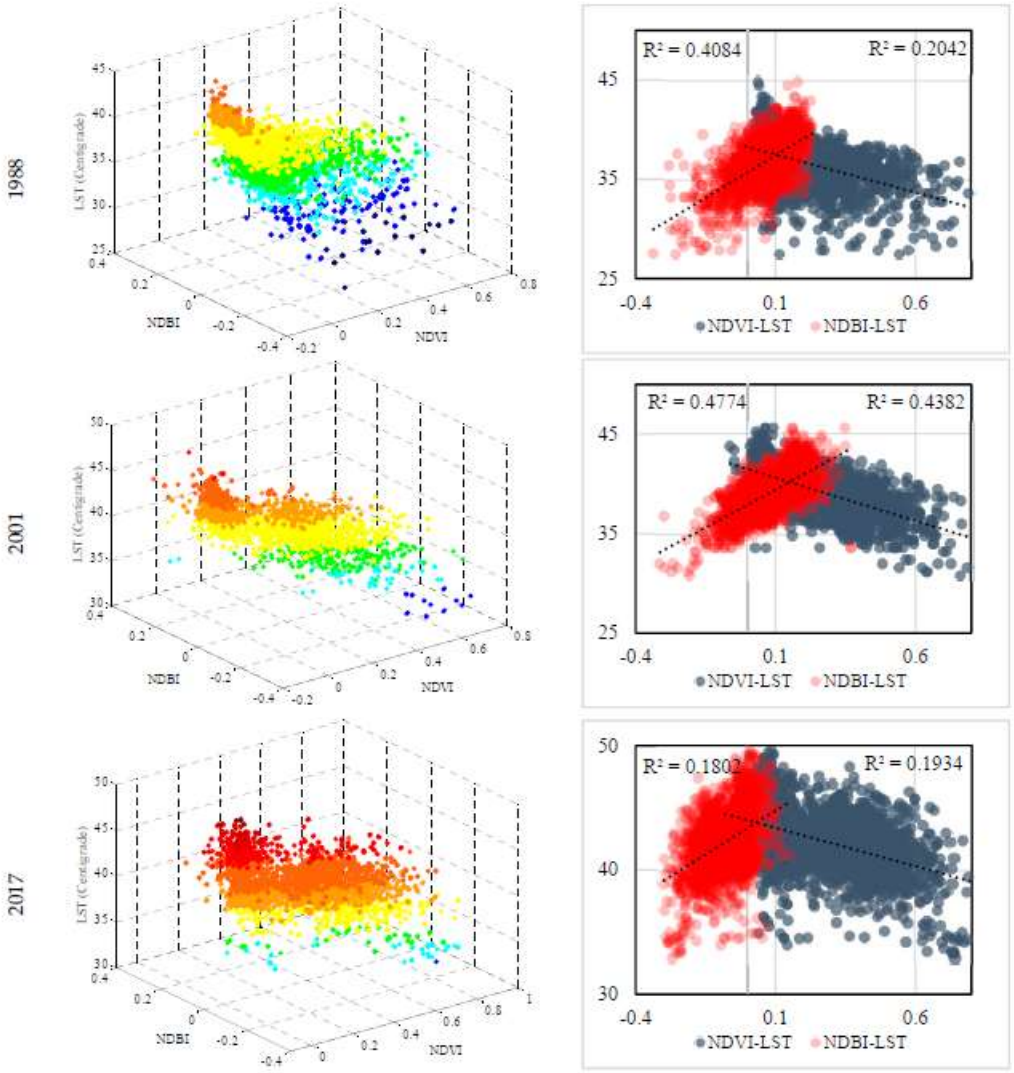
Year	LST			NDVI			NDBI		
	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
1988	23.68274	46.66728	35.85415	−0.02351	0.86358	0.32202	−0.37117	0.40875	0.04971
2001	24.97311	48.84806	38.38122	−0.14442	0.84903	0.24409	−0.41739	0.51931	0.09307
2017	29.40610	51.41578	41.96666	−0.88413	0.96426	0.21902	−0.46967	0.32005	−0.05193

جدول 25: تفاصيل حساب LST و NDVI و NDBI في الأعوام 1988 و 2001 و 2017.

3.4.3.2 الارتباط بين LST و NDVI وNDBI

يُستخدم الانحدار الخطي بشكل شائع لدراسة الارتباط بين LST وكل من NDBI وNDVI [25، 33، 45، 46] مما ينتج عنه معادلات مفيدة. في هذه الدراسة، تم استخدام الانحدار الخطي المتعدد لنمذجة العلاقة بين LST (متغير تابع)، و NDBI و NDVI (متغيرات مستقلة)، وتم تصوير البيانات المستخدمة في نموذج الانحدار في شكل بياني بمساحة ثلاثية الأبعاد في الشكل 8. تم تقسيم نطاق LST في مخطط الانتشار ثلاثي الأبعاد إلى 10 فئات تظهر بألوان مختلفة موضحة في الشكل. يتكون الجزء العلوي من مخطط الانتشار من وحدات بكسل ذات درجات حرارة سطحية عالية، ونباتات قليلة، وخصائص مبنية عالية، بينما يوضح الجزء السفلي وحدات بكسل ذات درجات حرارة سطحية منخفضة، وخصائص مبنية منخفضة، ولكنها ذات غطاء نباتي كثيف. بين عامي 1988 و 2017، زادت الألوان الحمراء، التي تمثل النقاط الأكثر سخونة، بشكل كبير، خاصة من عام 2001 إلى عام 2017. في عام 1988، كان عدد وحدات البكسل ذات درجات حرارة السطح الباردة نسبيًا أكبر بكثير من تلك الموجودة في عام 2001، وتلك الموجودة في عام 2001 أظهرت نقاطًا باردة أكثر من عام 2017. كانت معظم وحدات البكسل المختارة عشوائيًا في عام 2017 في نطاق 37 إلى 52 درجة مئوية، مما يشير إلى الاتجاه المتزايد لدرجة حرارة السطح. ومع ذلك، تم وصف تفاصيل نموذج الانحدار في الجدول ، مع أعلى ارتباط في عام 2001 (0.483) وأدنى ارتباط في عام 2017 .(0.274) من ناحية أخرى، تشير الدراسة إلى أن درجات حرارة السطح التي زادت خلال فترة الدراسة قد تكون مرتبطة باتجاه الاحترار العالمي. ومع ذلك، فإن أكثر وحدات البكسل سخونة في السنوات الثلاث جميعها كانت تنتمي إلى مناطق ذات NDBI يتراوح بين -0.05 و 0.25 و NDVI يتراوح بين 0 و 0.2، مما يظهر في الغالب مناطق مبنية 5. وهذا يعني، بغض النظر عن تأثير الاحترار العالمي على زيادة درجة حرارة

المدن، يمكن للتوسع الحضري أن يزيد من درجة حرارة السطح لأنواع مختلفة من الغطاء الأرضي لأن المواد التي تستخدم عادة في بناء المدن تتميز بانعكاسية وأداء حراري وبصري منخفض.

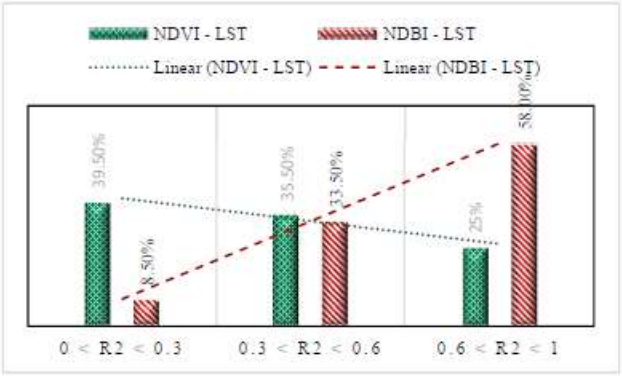


رسم توضيحي 8:مخططات الانتشار ثنائية وثلاثية الأبعاد لعلاقات NDBI-LST و NDVI-LST.

Year	R	R Square	Std. Error of the Estimate	Unstandardized Coefficient	Standardized Coefficient (Beta)
1988	0.680	0.46	1.77	Constant: 36.68 NDVI: −4.25 NDBI: 14.59	NDVI: −0.25 NDBI: 0.55
2001	0.703	0.49	1.54	Constant: 39.21 NDVI: −3.38 NDBI: 10.35	NDVI: −0.26 NDBI: 0.47
2017	0.450	0.20	2.31	Constant: 43.86 NDVI: −4.00 NDBI: 6.04	NDVI: −0.29 NDBI: 0.18

جدول 26: تفاصيل نموذج الانحدار الخطي المتعدد.

تظهر العلاقات الفردية لـــــ LST مع NDVI و NDBI في الشـكل 6 والجدول 6. تباينت معاملات الارتباط في السنوات الثلاث جميعها، حيث كان الارتباط الأعلى في عام 2001 والأدنى في عام 2017، مما يوضح أن نطاقات NDVIو NDBI لأغطية أرضـية معينة يمكن أن تتغير ببسـاطة اعتمادًا على العديد من العوامل بما في ذلك وقت التقاط الصـورة والموسـم .[48] بشـكل عام، كانت معاملات الارتباط لجميع السـنوات الثلاث أقل من 0.5، مما يدل على أن هذه المؤشـــرات لا ترتبط بشـــكل كبير مقارنة بنتائج عدد من الدراســـات الســـابقة [5، 49-51]. قد يكون الارتباط الضـعيف مرتبطًا بالفئة المناخية لمنطقة الدراسـة) قاحلة .(B-هناك العديد من العوامل العشـوائية التي تؤثر على العلاقة بين هذه المؤشـرات ودرجة حرارة السـطح أو الهواء، ومن بينها الظروف المناخية التي لها تأثير كبير. يوضـح الشـكل 9 تفاصـيل عدد من الدراسـات مع فئاتها المناخية حسـب تصـنيف كوبن-جيجر (الجدول 9). أدت المناطق ذات المناخ المعتدل (C) والاســتوائي (A) إلى علاقة أقوى بين LST والمؤشـــرين، بينما أظهرت المدن الواقعة في الفئات القاحلة (B) والباردة (D) معاملات ارتباط أضـــعف، معظمها أقل من 0.5. ظهرت هذه النتيجة أيضًـــا في العمل الذي قام به .[53] Grover and Singh أظهرت نتائجهما أن علاقة LST-NDVI أقوى في مومباي (Am) منها في دلهي.(BSh)



رسم توضيحي 9:. التصنيف الكمي للأعمال السابقة التي تدرس علاقات NDVI-LST و NDBI-LST.

توجد أيضًا استثناءات في كل مجموعة قد تكون مرتبطة بالغطاء الأرضـي وارتفاع منطقة الدراسـة، أو مناخ المناطق المحيطة؛ بمعنى آخر، هناك بعض المناطق التي تنتمي في الغالب إلى فئة مناخية معينة، ولكنها قريبة جدًا من فئات أخرى، على ســـبيل

المثال، خوتاج-أوندور، التي تتمتع بمناخ قاحل وسهوب، محاطة بمناطق باردة، أو شنيانغ التي تقع في منطقة ذات مناخ بارد، وشتاء جاف، وصيف حار، ولكنها قريبة من مناطق ذات مناخ قاحل وسهوب، ومناطق باردة ذات شتاء جاف وصيف دافئ \ وعليه، يمكن أن يكون للمناطق المحيطة تأثير ملحوظ على درجة حرارة السطح والهواء في منطقة معينة، وبالتالي على علاقات درجة الحرارة مع NDVI و .NDBI أوضح Mathew وآخرون أن علاقة LST-NDBI في مواسم الرياح الموسمية أقوى منها في الصيف والشتاء، مما يشير إلى أهمية الظروف الجوية، أو على نطاق أوسع الظروف المناخية، عند تقدير LST ومؤشرات الغطاء النباتي والمباني .ومع ذلك، يمكن أن يكون الارتباط الضعيف في نهاية فترة الدراسة مرتبطًا بارتفاع درجة حرارة السطح. من وجهة نظر مختلفة، يوضح هذا أن علاقات LST مع NDVI و NDBI تكون أقوى عندما يكون السطح مغطى بمزيد من الغطاء النباتي، أو عندما يكون نطاق NDVI و NDBI محدودًا. لذلك، فإن NDVI و NDBI ليسا مؤشرين مناسبين لدراسة LST في المدن المحاطة بتربة جرداء، والتي تمتص كمية كبيرة من الإشعاع الشمسي، مثل مشهد. أوضح Mathew وآخرون أيضًا عدم فعالية NDBI في دراسات SUHI (الجزيرة الحرارية الحضرية السطحية) لأن التربة الجرداء وأغطية النباتات الجافة تظهر انعكاسية طيفية عالية في نطاق SWIR مما يؤدي إلى قيم NDBI موجبة للنباتات الأكثر جفافًا وقيم NDBI أعلى للتربة الجرداء مقارنة بالمناطق المبنية.

الرقم	منطقة الدراسة	المناخ	تاريخ الدراسة	العلاقة بين NDVI وLST	العلاقة بين NDBI و LST
1	**مومباي، الهند**	Am	2010	R2=0.59 مقطع (شمال) R2=0.32 مقطع (وسط) R2=0.46 مقطع (جنوب)	R2=0.63 مقطع (شمال) R2=0.68 مقطع (وسط) R2=0.61 مقطع (جنوب)
2	**جزيرة لانكاوي، قدح، ماليزيا**	Am	2002 2015	مقطع شمال-جنوب R2=0.15 R2=0.5	R2=0.30 R2=0.81 R2=0.84
3	**مومباي، الهند** **دلهي، الهند**	Am BSh	2010 2010	R2=0.36 R2=0.06	-
4	**إدارة بانكوك الحضرية**	Aw-As	2008	R2=0.41	R2=0.73
5	**مدينة سورات**	As-Aw	1990 2009	R=−0.69 R=−0.86	R=0.68 R=0.87
6 درجة حرارة) (الهواء	**سوخباتار** **إنجت تولغوي** **خوتاج-أوندور** **بارون-أورت** **أوندورخان** **خوجيرت** **ساينشاند** **ماندالغوبي** **إهينغول** **دالانزادجاد**	BSk-Dwb BSk-Dwc BSk-Dwb-Dwc BSk BSk BSk BWk BWk BWh BWk	2000-2009	R2=0.79 R2=0.97 R2=0.84 R2=0.78 R2=0.71 R2=0.91 R2=0.03 R2=0.5 R2=0 R2=0.02	-

7	واحة نهري ويغان وكوكا، شينجيانغ، الصين	BWk	1989 2011	R2=0.51 R2=0.76	-
8	أربيل، العراق	Csa-BSh	2003-2014	R2=0.18	-
9	فلورنسا نابولي	Csb Csb	2016 2016	R=−0.71 R=−0.57	R=0.71 R=0.61
10	دلتا نهر اللؤلؤ	Cwa	2000	R20.98	R20.98
11	شنتشن	Cwa	2009-2010	R20.72	R20.51
12	هونغ كونغ	Cwa	2005	R=−0.41	R=0.71
13	قوانغتشو، جنوب الصين	Cwa-Cfa	2000 2008	R2=0.05 R2=0.01	R2=0.78 R2=0.7
14	قوانغتشو، جنوب الصين	Cwa, Cfa	1990	R2=0.37	R2=0.53
15	سكوبيه، مقدونيا	Cfa	2013 2017	R=−0.63 R=−0.59	R=0.67 R=0.64
16	أبر هيل، نيروبي	Cfa	1987 2002 2015 2017	R2=0.26 R2=0.49 R2=0.48 R2=0.16	-
17	مدينة فوتشو	Cfa or Csc	1989 2001	R2=0.29 R2=0.07	R2=0.87 R2=0.74
18	مدينة ووهان	Cfa or Csc	-	R2=0.79	-
19	شنيانغ، الصين	Dwa	2001 2010	R=−0.07 R=−0.85	R=0.9 R=0.91
20	مدينة شيكاغو، الولايات المتحدة الأمريكية	Dfa	2010	R=−0.34	R=0.26
21	منطقة المدن التوأم الحضرية (TCMA)في مينيسوتا.	Dfb	2002 2000 2001	R2=0.09 R2=0.05 R2=0.02 R2=0.11	-

جدول 27: ارتباط علاقات NDVI-LST و NDBI-LST في دراسات حالة سابقة ضمن فئات مناخية مختلفة.

من خلال التصنيف الكمي للدراسات التي تقدم معامل الارتباط لعلاقات NDVI-LST و NDBI-LST في ثلاثة نطاقات مختلفة (من 0 إلى 0.3، ومن 0.3 إلى 0.6، ومن 0.6 إلى 1)، يظهر أن أكثر من 39% من الدراسات أسفرت عن علاقات ضعيفة بين NDVI و LST ($0<R2\leq0.3$) ، بينما أظهر 25% فقط منها ارتباطات قوية ($0.6<R2\leq1$).في المقابل، كان أداء مؤشر NDBI أفضل منNDVI ، حيث أسفر حوالي 58% من الدراسات عن قيم R2أعلى من 0.6، مما يسلط الضوء على الكفاءة الأفضل نسبيًا لـ NDBI مقارنة بـ NDVI في المناطق ذات الظروف المناخية القاسية.

ومع ذلك، فإن حوالي 33% من تقييمات علاقات NDBI-LST أسفرت عن قيمة R2تتراوح بين 0.3 و 0.6، مما يظهر الحاجة إلى مؤشر أكثر دقة في هذه المناطق.

الأول	الثاني	الثالث
أ (مداري)	f (غابة مطيرة) m (موسمي) w (سافانا، رطب) s (سافانا، جاف)	
ب (قاحل/جاف)	W (صحراوي) S (سهوب)	h (حار) k (بارد)
ج (معتدل)	s (صيف جاف) w (شتاء جاف) f (بدون فصل جاف)	a (صيف حار) b (صيف دافئ) c (صيف بارد)
د (بارد (قاري))	s (صيف جاف) w (شتاء جاف) f (بدون فصل جاف)	a (صيف حار) b (صيف دافئ) c (صيف بارد) d (شتاء شديد البرودة)

جدول 28: وصف رموز نظام تصنيف كوبن المناخي

3.4.4 الآثار المترتبة على النتائج

إن عرضنا للتغيرات الزمانية والمكانية للجزيرة الحرارية الحضرية (UHI) في هذه المدينة يوحي بقوة بالحاجة إلى إدراج استراتيجيات التخفيف من آثار الجزيرة الحرارية الحضرية في التخطيط لتقليل الهشاشة في ظل تغير المناخ. في الواقع، تعد التغييرات الحقيقية ضـرورية لجعل المدينة أكثر اسـتدامة ومرونة في المسـتقبل .ترتبط أهم الآثار السـلبية للجزيرة الحرارية الحضـرية بارتفاع درجات الحرارة في البيئات الحضـرية. يمكن أن تؤدي التجمعات الحرارية في هذه المناطق إلى زيادة اسـتهلاك الطاقة، وزيادة التلوث في الهواء والماء، وزيادة معدلات الوفيات والأمراض بين السكان . علاوة على ذلك يمكن أن يؤثر حجم قطعة الأرض وآثار الجزيرة الحرارية الحضرية حتى على اسـتخدام المياه في المنازل؛ لذلك، يجب على منظمي تقسـيم المناطق (zoning regulators) مراعاة تأثير غطاء وحجم مواقف السيارات، خاصـة في مشـهد، وعلى نطاق أوسـع، في المدن القاحلة .بالإضـافة إلى ذلك، كانت المناطق المحاطة بالتربة الجرداء وشـبه الجرداء ذات درجة حرارة أعلى من المناطق الأخرى. لذلك، لا يمكن أن تكون المؤشـرات المتعلقة بالغطاء النباتي والأسـطح المبنية مناسـبة لتحليل الجزيرة الحرارية الحضـرية في مدن مماثلة. في الواقع، هناك حاجة لاستخدام مؤشرات مناسبة فيما يتعلق بالظروف المناخية. وإلا، فسيكون هناك احتمال ارتكاب أخطاء في دراسة الجزيرة الحرارية الحضرية واختيار استراتيجيات تخفيف فعالة ومحتملة لمستقبل المناطق القاحلة وشبه القاحلة .تقدم النتائج معلومات مقنعة حول اختلافات الغطاء الأرضـي في تباينات درجات الحرارة كدالة لنوع غطاء المنطقة المسـتهدفة والمناطق المحيطة بها. وهذا يعني أن دور خصـائص الأسـطح المبنية، مثل عدد الطوابق أو الكثافة السـكانية، أقل تأثيرًا من خصـائص المواد نفسـها. تعطي نتائجنا الأولوية لخصـائص مواد البناء المستخدمة في الأرصـفة والواجهات وأسطح المباني، باعتبارها العوامل الأكثر تأثيرًا التي تساهم في شدة الجزيرة

الحرارية الحضـــرية في المناطق القاحلة. لذلك، يجب على مخططي المدن توفير لوائح تنظيمية لتقليل المناطق الجرداء، وعلى قطاع البناء تقييد استخدام المواد ذات السعة الحرارية العالية والبياض المنخفض(low albedo) ، في المناطق المذكورة.

3.5 الاستنتاجات

تزيد الجزيرة الحرارية الحضـرية من معدلات اسـتهلاك الطاقة. ويمكن أن تُعزى أيضًـا إلى مجموعة من المشـاكل الصـــحية العامة. بالإضـــافة إلى ذلك، حيثما تحدث، تقلل الجزيرة الحرارية الحضـــرية عادةً من مســـتوى الراحة الحضـرية. تعد مشـهد واحدة من أكبر المدن في إيران مع عدد كبير من المهاجرين الذين يسـافرون إلى هذه المدينة لأغراض مختلفة. نتيجة لذلك، زاد عدد سكان المدينة بشكل كبير في السنوات الأخيرة، وتوسعت المدينة في جميع الاتجاهات، مما أدى إلى مواجهة المدينة تحديات بيئية وصـــحية، من بينها ارتفاع درجة حرارة المدينة الذي يحظى بأولوية عالية. وفقًا للحاجة إلى القضاء على الآثار السلبية لهذه الظاهرة في هذه المدينة، قد توفر هذه الدراسة أساسًا ســـليمًا يمكن للمخططين في المدينة والمحليين اتخاذ إجراءات بناءً عليه .تبحث الدراســـة أولاً في التوزيع الزماني والمكاني للجزيرة الحرارية الحضرية في مشهد، التي تقع في فئة مناخية قاحلة وفقًا لتصنيف كوبن-جيجر المناخي، والعلاقات بين LST وكل من NDBI و NDVI باستخدام بيانات مستشعر لاندسات .TM/OLI ثانيًا، تقيّم ارتباط علاقات LST-NDBI و LST-NDVI في الأعمال السابقة من أجل تقييم قابلية تطبيق مؤشرات الاستشعار عن بعد هذه في دراسة LST في مناخات مختلفة. البيان الموجز للنتائج هو كما يلي:

(1) في مشهد، زادت درجة حرارة سطح الأرض على مدى فترة تقارب 30 عامًا، مع وجود ارتباطات ضعيفة بين LST-NDVI وLST-NDBI ؛

(2) كانت أكثر البقع سخونة في مناطق تراوحت فيها قيم NDVI و NDBI بين -0.05 و 0.25 ومن 0 إلى 2 على التوالي؛

(3) كانت أكثر البقع سخونة تقع في مناطق الضواحي؛

(4) زاد الغطاء المبني الإجمالي بينما انخفض الغطاء النباتي بشـــكل كبير، مما أدى إلى توســـع الجزيرة الحرارية الحضرية في جميع أنحاء المدينة في عام 2017، خاصة مع توسع المدينة نحو الشمال؛

(5) وفقًا للدراسة المقارنة، تأثرت العلاقات بين LST أو درجة حرارة الهواء و NDVI و NDBI بشدة بالظروف المناخية، مثل شدة الجفاف والرطوبة وكمية هطول الأمطار الشهرية؛

(6) كانت المناطق المغطاة بالغطاء النباتي في الغالب ذات درجات حرارة أقل من المناطق الأخرى، خاصـــة المناطق المبنية والتربة الجرداء وشبه الجرداء، خاصة في المناطق ذات المناخ القاحل؛

(7) كان الارتباط بين NDVI و NDBI و LST في المناطق ذات الظروف المناخية الشـــديدة (القارية، القاحلة وشبه القاحلة) أضعف منه في المناطق ذات الظروف المعتدلة .تُظهر الدراسة أن للتربة الجرداء وشبه الجرداء تأثيرًا كبيرًا على شـــدة الجزيرة الحرارية الحضـــرية (UHII) في المدن القاحلة وشـــبه القاحلة المحاطة بها، مما يجعل استخدام NDVI و NDBI غير فعال في هذه المناطق. بالإضافة إلى ذلك، فإن هذه المؤشرات، وخاصةNDVI ، ليست مناسبة للاستخدام في مناطق أخرى ذات ظروف مناخية قاسية بناءً على الدراسة المقارنة لنتائج الأعمال السابقة. وعليه، يجب تصنيف تطبيق مؤشرات الاستشعار عن بعد وفقًا للتصنيف المناخي، وهناك حاجة إلى مزيد من الدراسات لتقييم فعالية مختلف المؤشرات أو تطوير مؤشر جديد لدراسة الجزيرة الحرارية الحضرية في المناطق

ذات الظروف المناخية القاسية .فيما يتعلق بالحاجة إلى القضاء على الآثار السلبية للجزيرة الحرارية الحضرية، فإن إحدى أكثر الطرق فعالية للحد من آثارها في مشهد هي استخدام الأرصفة الباردة والذكية، حيث أن أكثر البقع سخونة كانت مخصصة للمناطق المفتوحة المغطاة بالأرصفة الشائعة. وعليه، يجب التركيز على عدة تقييمات أخرى في الدراسات المستقبلية. يجب تقييم ما إذا كانت الأرصفة الذكية والباردة المبتكرة قادرة على تقييد آثار الجزيرة الحرارية الحضرية في مشهد، أو على نطاق أوسع، في المدن المحاطة بالتربة الجرداء. علاوة على ذلك، يجب على مخططي المدن مراعاة التخطيط المناسب لاستخدامات الأراضي إلى جانب التخطيط للمساحات المفتوحة والمساحات الخضراء الحضرية في المدن القاحلة وشبه القاحلة.

3.6 الدروس المستفادة وقابلية التطبيق على دمشق

تقدم الدراسة الشاملة لظاهرة الجزيرة الحرارية الحضرية (UHI) في مدينة مشهد بإيران رؤى بالغة الأهمية وذات صلة وثيقة بمدينة دمشق في سوريا. تشترك المدينتان في خصائص أساسية: فهما مركزان حضريان عريقان يقعان في مناخات قاحلة أو شبه قاحلة، وقد شهدتا نموًا سكانيًا كبيرًا وتوسعًا حضريًا سريعًا وغير منظم في كثير من الأحيان، وتواجهان ضغوطًا بيئية متزايدة، بما في ذلك ندرة المياه وارتفاع درجات الحرارة توفر الدروس المستخلصة من حالة مشهد إطارًا قويًا لفهم وتخفيف آثار الجزيرة الحرارية الحضرية في دمشق.

يتمثل الدرس الأساسي في عدم كفاية مؤشرات الاستشعار عن بعد القياسية، وتحديدًا مؤشر الاختلاف الطبيعي للغطاء النباتي (NDVI) ومؤشر الاختلاف الطبيعي للمناطق المبنية (NDBI)، في التحليل الدقيق لدرجة حرارة سطح الأرض (LST) في المناطق القاحلة. خلصت دراسة مشهد إلى أنه في البيئات المحاطة بتربة جرداء وشبه جرداء واسعة، يكون الارتباط بين هذه المؤشرات ودرجة حرارة سطح الأرض ضعيفًا وغير موثوق به. وهذا اعتبار حاسم بالنسبة لدمشق، التي تحيط بها بالمثل مناظر طبيعية قاحلة. إن تطبيق هذه المؤشرات دون مراعاة التأثير الحراري الكبير للتربة الجرداء قد يؤدي إلى استنتاجات خاطئة واستراتيجيات تخفيف غير فعالة.

علاوة على ذلك، أكد البحث أن التربة الجرداء وشبه الجرداء هي بحد ذاتها من المساهمين الرئيسيين في شدة الجزيرة الحرارية الحضرية، حيث تظهر أحيانًا درجات حرارة سطحية أعلى حتى من المناطق ذات الكثافة البنائية العالي. كما أعطت الدراسة الأولوية للخصائص الحرارية والبصرية لمواد البناء - مثل السعة الحرارية والبياض (albedo) - على مقاييس الشكل الحضري مثل الكثافة البنائية، باعتبارها المحركات الأساسية لشدة الجزيرة الحرارية الحضرية في المناطق القاحلة. وهذا يعني أنه بالنسبة لدمشق، يجب ألا تركز جهود التخفيف على المركز الحضري فحسب، بل يجب أن تركز بشكل حاسم أيضًا على الأطراف الضواحي المتوسعة حيث تتفاعل الإنشاءات الجديدة والبنية التحتية، مثل الطرق الإسفلتية، مع الأراضي الجرداء المحيطة.

3.7 المنهجية المقترحة لدراسة الجزيرة الحرارية الحضرية في دمشق

لتحليل تأثير الجزيرة الحرارية الحضرية في دمشق بفعالية، يُقترح اعتماد منهجية مقتبسة من دراسة مشهد. سيعتمد هذا النهج على تحليل السلاسل الزمنية لصور الأقمار الصناعية لاندسات TM/OLI لرسم خريطة التطور الزماني والمكاني لدرجة حرارة سطح الأرض وتغيرات استخدامات الأراضي والغطاء الأرضي (LULC) على مدى العقود الثلاثة الماضية.

1. **الحصول على البيانات والمعالجة المسبقة:** الحصول على صور لاندسات خالية من السحب لدمشق من بوابة EarthExplorer التابعة لهيئة المسح الجيولوجي الأمريكية لسنوات مختارة (على سبيل المثال، 1990، 2005، 2025). ستكون المعايرة الإشعاعية والتصحيح الجوي باستخدام وحدة FLAASH خطوات أولى أساسية لضمان دقة البيانات.
2. **تصنيف استخدامات الأراضي والغطاء الأرضي (LULC):** استخدام طريقة تصنيف موجهة، مثل نموذج الاحتمالية القصوى، لتصنيف المشهد الطبيعي إلى فئات مميزة وذات صلة بسياق دمشق. بناءً على نتائج مشهد، يجب ألا تشمل الفئات **الأسطح المبنية** و**الغطاء النباتي** فحسب، بل يجب أن تميز بوضوح بين **التربة الجرداء** و**الأسطح الإسفلتية**[23].
3. **استخلاص درجة حرارة سطح الأرض (LST):** حساب LST لكل فترة باستخدام خوارزمية النافذة الأحادية الراسخة، والتي تتطلب قيم الانبعاثية المشتقة من تصنيف LULC.
4. **إعادة تقييم المؤشرات:** على الرغم من أنه سيتم حساب NDVI و NDBI، إلا أن التحليل الأساسي يجب ألا يفترض وجود ارتباط قوي مع LST. بدلاً من ذلك، سيكون التحليل المقارن المباشر بين متوسط LST لكل فئة من فئات LULC أكثر فائدة، لتحديد أنواع الغطاء الأرضي التي تساهم بشكل أساسي في حرارة السطح.
5. **التحليل المكاني:** رسم خرائط لتجمعات الجزيرة الحرارية الحضرية وتوسعها بمرور الوقت، وربط مواقعها بتغيرات محددة في LULC، مثل تحويل الأراضي الزراعية أو التربة الجرداء إلى مناطق سكنية أو صناعية جديدة.

3.8 استراتيجيات التخفيف المحتملة لدمشق

بناءً على استنتاجات دراسة مشهد، تُقترح استراتيجيات التخفيف التالية للنظر فيها من قبل المخططين الحضريين وصناع السياسات في دمشق:

- **إعطاء الأولوية للأرصفة الباردة والذكية:** نظرًا لأن المناطق المفتوحة المغطاة بالأرصفة الشائعة تم تحديدها كنقاط ساخنة، يجب على دمشق تشجيع استخدام الأرصفة الباردة ذات الانعكاسية الشمسية العالية والأرصفة الذكية ذات النفاذية الأعلى في مشاريع البنية التحتية الجديدة، خاصة في مواقف السيارات والطرق الرئيسية.
- **مراجعة قوانين البناء واختيار المواد:** يجب تحديث اللوائح لتشجيع أو فرض استخدام مواد ذات سعة حرارية منخفضة وبياض (albedo) عالٍ للأسطح والواجهات[26]. هذه واحدة من أكثر الاستراتيجيات تأثيرًا في المناطق القاحلة[27].

- **التخضير الحضري الاستراتيجي:** في حين أن زيادة المساحات الخضراء أمر مفيد، يجب أن يكون النهج في مدينة تعاني من ندرة المياه مثل دمشق استراتيجيًا. يشمل ذلك تشجيع النباتات المحلية المقاومة للجفاف، وتنسيق الحدائق الجافة (xeriscaping)، ودمج المساحات الخضراء بطريقة توفر أقصى قدر من الظل والتبريد التبخيري دون إثقال كاهل الموارد المائية.
- **إدارة التربة الجرداء:** تطوير سياسات لإدارة المساحات الشاسعة من الأراضي الجرداء داخل المحيط الحضري وحوله. يمكن أن تشمل الاستراتيجيات زراعة غطاء أرضي متين وقليل استهلاك المياه لتقليل امتصاص الطاقة الشمسية والغبار، أو تخطيط التنمية بطريقة مدمجة تقلل من الأراضي الشاغرة المجزأة والممتصة للحرارة.
- **التخطيط المتكامل لاستخدامات الأراضي:** يجب أن يسترشد التوسع الحضري المستقبلي بتخطيط دقيق يأخذ في الاعتبار التأثير الحراري للتطورات الجديدة. إن تجنب أنماط التوسع الخطي على طول الممرات الإسفلتية المحاطة بالتربة الجرداء وتعزيز التنمية المدمجة متعددة الاستخدامات يمكن أن يساعد في التخفيف من تشكل بؤر جديدة للجزيرة الحرارية الحضرية[28].

3.9 مقدّمة الدراسة العالمية الثانية (إيطاليا) واختيارها كحالة مقارنة

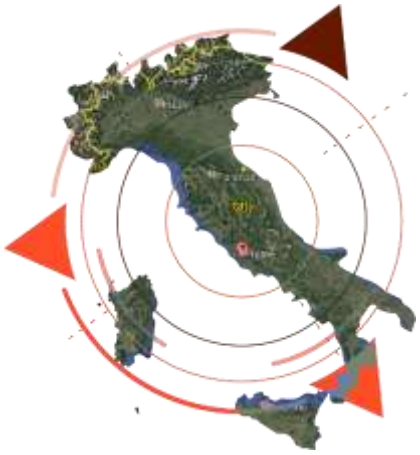
في سياق هذه الرسالة، التي تهدف إلى تحليل ديناميكيات التحوّل الحضري وأثرها المناخي في مدينة دمشق، يبرز من الضروري توسيع نطاق المقارنة العالمية لتشمل نماذج حضرية لا تعتمد فقط على التشابه المناخي كما في حالة مشهد في إيران، بل تمتد أيضًا إلى حالات تُقدِّم تنوّعًا منهجيًا في أدوات تحليل التحضّر الحضري، وبخاصة تلك التي تعتمد على مؤشرات مركّبة وتقنيات استشعار عن بعد متقدّمة. ومن هذا المنطلق، تم اختيار الحالة الصينية لتكون الدراسة العالمية الثانية، نظرًا لما تقدّمه من إطار تحليلي مختلف يقوم على دمج مؤشرات طيفية متعدّدة ضمن مؤشر مركّب مخصّص لرصد الامتداد الحضري، يمثل إضافة نوعية للمقاربة المستخدمة في دراسة دمشق.

ومن الجوانب المهمة التي تجعل هذه الدراسة ذات جدوى في سياق دمشق، هو اعتمادها على نظام Google Earth Engineفي بناء خرائط التحضّر، وهو ما يتيح إمكانية تكرار المنهجية دون الحاجة إلى موارد حاسوبية عالية، مما يجعلها قابلة للتطبيق في البيئات البحثية ذات الإمكانيات المحدودة. كما تُقدِّم الدراسة إطارًا واضحًا لتقييم الدقة من خلال مصفوفات الخطأ، مما يسمح بتحويل نتائج التحليل من مجرّد تفسير بصري إلى تقديرات مساحية موثوقة تُرفَق بفواصل ثقة.

وبناءً على ما تقدَّم، فإن إدراج الحالة الإيطالية لا يرتبط فقط بالرغبة في إضافة مثال عالمي ثانٍ، بل يأتي لتأسيس قاعدة منهجية يمكن اعتمادها لاحقًا في دمشق لتطوير قراءة مركّبة للتحضّر الحضري، قادرة على الربط بين الامتداد المكاني والتأثير الحراري.

3.10 دراسة الحالة العالمية: تطبيقات نظم دعم القرار المكاني متعدد المعايير في التنمية الإقليمية (إيطاليا نموذجاً)

تُعد دراسة الحالة العالمية محطة أساسية للانتقال من الإطار النظري إلى التطبيق العملي، إذ توفر تقييماً صارماً للمنهجيات المبتكرة ومدى قابليتها للتكيف في سياقات مختلفة. يرتكز هذا المبحث على التحليل العميق للأعمال البحثية المنجزة من قِبل الباحثين **باتريزيا لومباردي** و**فالنتينا فيريتي** في إيطاليا، والتي تهدف إلى تطوير **نظم دعم قرار مكاني متعدد المعايير (MC-SDSS)** متقدمة، مستخدمة **عملية الشبكة التحليلية (ANP)**. يمثل هذا التوجه منهجية رائدة في معالجة التحديات المعقدة للتنمية الحضرية والإقليمية المستدامة، الأمر الذي يجعله نقطة ارتكاز منهجية قيمة لسيناريوهات التعافي والتخطيط في السياق السوري.



رسم توضيحي 10: صورة قمر صناعي توضح خارطة إيطاليا - عمل الباحث

3.10.1 مسوّغات اختيار دراسة الحالة الإيطالية وأهميتها البحثية

يكمن المسوّغ الأساسي لاختيار هذه الدراسة في سعي الرسالة لاستخلاص **آليات صنع القرار المنهجية**، بدلاً من مجرد وصف الظواهر العمرانية. فبعد تحليل طبيعة النمو والتغير الحضري في دراسة حالة مشهد، يصبح ضرورياً التعمق في الأدوات التي تضمن قرارات تخطيطية عقلانية في بيئات تتسم بـ**تعددية المعايير والقيود**.

الأهمية المنهجية لنموذج (MC-SDSS) في مواجهة تحديات التنمية المستدامة

تركز الدراسة الإيطالية على تطوير حلول لدعم قرارات التخطيط الإقليمي المتعلقة بـ**الاستدامة**، وهي قرارات تتطلب دمج اعتبارات **اقتصادية واجتماعية وبيئية** متضاربة في كثير من الأحيان. وكما أشار الباحثون في فإن التحدي يكمن في الحاجة إلى **"تقييمات كمية ونوعية للاستراتيجيات والسياسات) "**

يُقدم نموذج MC-SDSS حلاً متكاملاً لتجاوز هذا التعقيد من خلال دمج:

1. **المعالجة المكانية الدقيقة :**باستخدام تقنيات **نظم المعلومات الجغرافية (GIS)** لتمثيل وتحليل البيانات المتعلقة بالموقع وتأثيره.
2. **التحليل التقييمي الشامل :**باستخدام **التحليل متعدد المعايير (MCA)** لتحديد الأوزان والأولويات بين الأهداف المختلفة (مثل: أولوية تقليل البصمة الكربونية مقابل أولوية توفير فرص العمل).

إن هذا التركيز على الشمولية المنهجية هو ما يجعل التجربة قابلة للاستفادة، إذ يواجه التخطيط السوري بعد الحقبة السورية الجديدة تحدياً مماثلاً يتمثل في الموازنة بين سرعة الإعمار، كفاءة الموارد المحدودة، وتلبية الاحتياجات الاجتماعية العاجلة.

أوجه التشابه السياقي بين التخطيط الإقليمي في أوروبا والسياق السوري:

على الرغم من الاختلاف في طبيعة الأحداث، حيث تتعامل إيطاليا مع تحديات **"حدود النمو ""**كفاءة الطاقة" بينما تتعامل سـوريا مع تحديات **التعافي وإعادة البناء**، يوجد تلاقٍ منهجي يتمحور حول **إدارة التغيرات المكانية المعقدة بفاعلية**.

إن الحاجة إلى **تحليل الصور الزمانية(Temporal Image Analysis)** ، التي تشكل جزءاً أساسياً من عمل هذه الرسـالة، تجد توازياً وظيفياً مثالياً في نموذج .**MC-SDSS**حيث يمكن لنتائج تحليل الصـور الزمانية – مثل خرائط التغير في اسـتخدامات الأراضـي، ومناطق التدمير، ومؤشـرات الكثافة السـكانية الناجمة عن النزوح – أن تُوظَّف كـ**معايير إدخال (Input Criteria)** أساسية ضمن نموذج .MC-SDSS وبذلك، يتم تحويل البيانات الوصفية (الناجمة عن رصد التغير) إلى بيانات تقييمية (لتحديد أولويات التدخل)، مما يوفر جسراً منهجياً قوياً بين أدوات رصد التغير التي اعتمدتها الرسالة وبين نموذج اتخاذ القرار الإيطالي.

3.10.2 الإطار النظري والتطبيقي لنظم دعم القرار المكاني متعدد المعايير ومنهجية(ANP)

قام الباحثون الإيطاليون ببناء إطار عمل يعتمد على دمج أدوات مكانية وتحليلية لتجاوز القصـور في النماذج التخطيطية التقليدية التي غالباً ما تعتمد على معيار واحد أو عدد محدود من المعايير.

المبادئ الأساسية لنموذج (MC-SDSS) ودوره في معالجة التعقيد المكاني

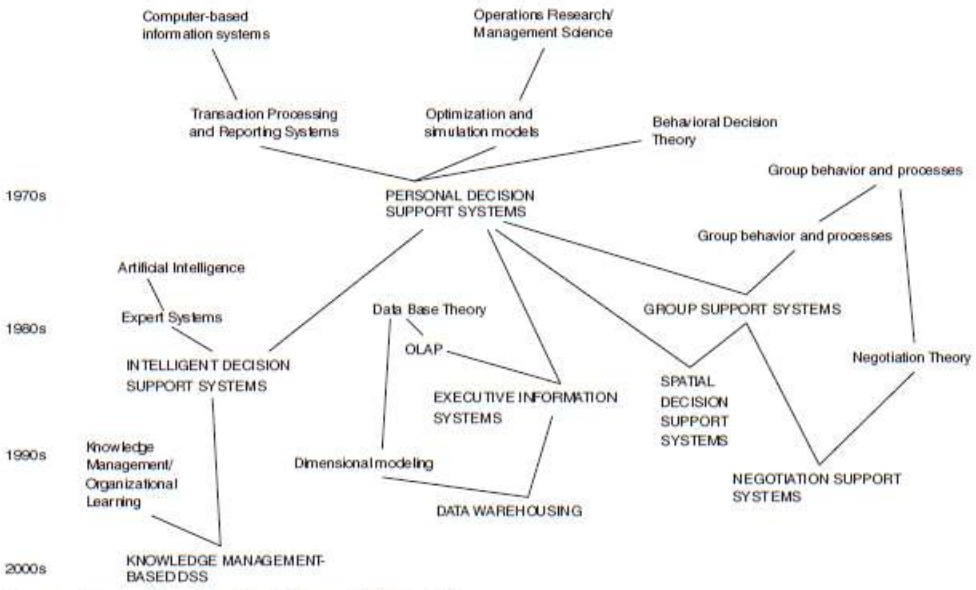
يُعرف (MC-SDSS) في هذا البحث بأنه نظام قائم على الحاسـوب مصـمم لدعم الأفراد أو المجموعات في اتخاذ قرارات شـبه منظمة أو غير منظمة في قضـايا التخطيط، خاصـة تلك التي تنطوي على أبعاد مكانية متعددة. ويسـتند النظام إلى المبادئ التالية:

1. **الدمج الشامل للبيانات :**القدرة على معالجة البيانات المكانية الخام (الخرائط، الصور الجوية) جنباً إلى جنب مع البيانات الوصفية (الإحصائيات، البيانات الاجتماعية، التكاليف الاقتصادية) ضمن بيئة موحدة.
2. **دعم التخطيط التشـاركي :**الهدف من النظام هو توفير الأدوات اللازمة لأصـحاب المصـلحة (الجهات الحكومية، الصـناعة، المدن، والجمهور) لاتخاذ **"القرارات النظامية والفردية المناسـبة "**(الوثيقة المرفقة، الصفحة 2)، مما يضمن شرعية وفعالية القرارات المتخذة.
3. **مرونة تقييم السـيناريوهات :**يوفر النظام إمكانية بناء سـيناريوهات بديلة وتقييمها، مما يسـمح للمخططين بفهم التداعيات الكاملة لكل قرار قبل تنفيذه على أرض الواقع.

توظيف عملية الشبكة التحليلية (ANP) لترجيح المعايير المتضاربة

إن الابتكار المنهجي الأبرز في الدراسـة الإيطالية يكمن في الاعتماد على **عملية الشـبكة التحليلية(ANP)** ، والتي تتجاوز حدود منهجية **التسـلسـل الهرمي التحليلي .(AHP)** ففي المشـكلات التخطيطية الواقعية، نادراً ما تكون العلاقات بين المعايير هرمية بسيطة؛ بل تكون **شبكية** ومعقدة.

- **التعامل مع التبعية والتغذية الراجعة :**تكمن القوة التحليلية لمنهجية ANP في قدرتها على نمذجة **العلاقات المتبادلة (Interdependencies)** و**التغذية الراجعة (Feedback)** بين عناصر النظام التخطيطي. على سـبيل المثال، في التخطيط، قد تؤثر جودة البنية التحتية (معيار) على القيمة الاقتصـادية للأرض (معيار آخر)، وفي الوقت ذاته قد تؤدي القيمة الاقتصادية للأرض إلى زيادة الطلب على تحسين البنية التحتية. تقوم ANPبحساب هذه التأثيرات الثنائية لإنتاج أوزان أكثر دقة وواقعية.
- **بناء الهيكل الشـبكي :**يبدأ العمل ببناء **شـبكة (Network)** بدلاً من هرم(Hierarchy) ، تتكون من مجموعة من **العناقيد(Clusters)** ، يمثل كل عنقود مجموعة من المعايير ذات الصلة، وترتبط هذه العناقيد بعلاقات تبادلية.



Source: Adapted from Arnott and Pervan (2005, p. 69)

رسم توضيحي 11: عناقيد الهيكل الشبكي

3.10.3 استعراض وتحليل تطبيقات البحث الإيطالي(Ferretti & Lombardi)

تجسد الدراسة البحثية القوة التطبيقية لنموذج (MC-SDSS/ANP) من خلال تناول تحديين تخطيطيين رئيسيين في سياق التنمية المستدامة.

تطبيق تقييم ملاءمة الأراضي للممرات الإيكولوجية في إقليم بييمونتي

تعتبر هذه الدراسة مثالاً كلاسيكياً على التخطيط البيئي. هدف الباحثون إلى تحديد المناطق الأكثر ملاءمة لإنشاء **ممرات إيكولوجية** تربط المناطق الطبيعية المحمية، وذلك بهدف تعزيز التنوع البيولوجي وتقليل تجزئة الموائل.

- **المعالجة التطبيقية :**تم استخدام نموذج ANP لترجيح مجموعة واسعة من المعايير المتمثلة في :**المعايير البيئية**)مثل نوع الغطاء النباتي، قرب المياه(، **المعايير الجغرافية** (مثل الانحدار، الارتفاع)، و**المعايير البشرية**)مثل القرب من الطرق والمناطق الحضرية.(
- **العبرة المستخلصة للرسالة :**يُظهر هذا التطبيق كيف يمكن للمنهجية أن تعالج قضايا **تحديد الموقع الأمثل (Optimal Siting).**يمكن بسهولة تكييف هذا الإطار في السياق السوري لتحديد **المواقع الأكثر ملاءمة لإعادة التوطين** أو **إنشاء المرافق المؤقتة**، باستخدام معايير معدّلة تشمل مؤشرات الأمان، القرب من الخدمات، وتجنب المناطق ذات الأنقاض الكثيفة.

تحليل استخدام النظم لدعم قرارات تحديد مواقع المنشآت غير المرغوب فيها

تُعد هذه الدراسة من أكثر التطبيقات أهمية للسياق التخطيطي السوري، حيث عالجت معضلة تحديد مواقع المرافق التي تُعرف بـ"استخدامات الأراضي غير المرغوب فيها محلياً LULU (Locally Unwanted Land Uses -) ، مثل مكبات النفايات أو محطات المعالجة، والتي تثير غالباً اعتراضات مجتمعية كبيرة.

- **المنهجية المتبعة :**تميزت هذه الدراسة بإدخال **تفضيلات أصحاب المصلحة (Stakeholders' Preferences)** كـ**معيار تقييمي** أساسي ضمن نموذج .ANP وبالتالي، لم يقتصر القرار على المعايير التقنية (مثل التكلفة والبعد عن مصادر التلوث) فحسب، بل شمل أيضاً **الأبعاد الاجتماعية والقبول العام.**
- **الأهمية للرسالة :**في مرحلة إعادة الإعمار السورية، تتطلب قرارات مثل **تحديد مواقع تجميع أنقاض المباني** أو **إعادة تخصيص الأراضي المدمرة** حساسية قصوى للبعد الاجتماعي. يوضح النموذج الإيطالي كيف يمكن إضفاء طابع منهجي وموضوعي على هذه العملية، مما يقلل من احتمالية النزاعات المستقبلية ويضمن **العدالة المكانية** في التوزيع.

3.11 تحليل أوجه التشابه والاختلاف بين الإطار المنهجي الإيطالي والسياق التخطيطي السوري

إن الهدف الأسمى من تحليل دراسة الحالة الإيطالية لا يقتصر على استعراض المنهجية المتبعة فحسب، بل يتعداه إلى تحديد النقاط الجوهرية التي يمكن الاستفادة منها وتكييفها لتناسب متطلبات التخطيط الإقليمي في مرحلة التعافي بسوريا. ويتطلب هذا التحليل المقارن تقييماً موضوعياً لأوجه التشابه المنهجي من جهة، وأوجه الاختلاف السياقي والبنيوي من جهة أخرى، لضمان أن تكون التوصيات النهائية للرسالة ذات جدوى تطبيقية وعلمية.

3.11.1 أوجه التشابه المنهجية: توظيف تحليل الصور الزمانية في رصد التغيرات

يتجلى التشابه الأكثر أهمية بين التجربة الإيطالية والسياق السوري ليس في الأهداف التخطيطية النهائية، بل في **الآلية المنهجية لمعالجة التعقيد المكاني والاعتماد على البيانات الموضوعية** لاتخاذ القرارات.

أهمية تحليل التباينات المكانية والزمانية لتحديد مناطق الأولوية للتدخل

يُعد المدخل التحليلي لنموذج **MC-SDSS** في إيطاليا قائماً على بيانات دقيقة حول **التغيرات في استخدامات الأراضي، والضغط البيئي على المناطق الحضرية، وكثافة المباني،** وهي مؤشرات يتم استخلاصها عادةً من تقنيات **الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية**. وهذا يتطابق تماماً مع الأهمية التي توليها هذه الرسالة لـ**تحليل الصور الزمانية (Temporal Image Analysis)**.

في السياق السوري، لا يُستخدم تحليل الصور الزمانية لرصد النمو المستدام، بل لرصد وتقييم التغيرات الكارثية التي حدثت على البنى التحتية، مثل:

1. **قياس نسب التدمير والأضرار الهيكلية (Damage Assessment).**
2. **رصد التوسع العشوائي في الأطراف (Informal Growth) الناتج عن النزوح.**
3. **تحديد التباينات في الكثافة السكانية وتوزيعها بعد موجات النزوح والعودة.**

وبالتالي، يمكن اعتبار مخرجات تحليل الصور الزمانية في الرسالة بمثابة بيانات مكانية موضوعية يمكن إدخالها مباشرة كمعيار أولوية قصوى ضمن نموذج ANP-SDSS، حيث يتم ترجيحها بشكل كبير لتوجيه القرارات نحو المناطق الأكثر تضرراً والأكثر احتياجاً للتدخل الفوري. فالمنهجية الإيطالية توفر إطاراً يضمن دمج هذه البيانات الكمية في عملية تقييم نوعية شاملة، مما يرفع من دقة وشرعية القرارات المتخذة.

إمكانية تكييف مقاييس التنمية المستدامة الأوروبية مع متطلبات التعافي وإعادة الإعمار:

تتركز المنهجية الأوروبية، بما في ذلك الدراسة الإيطالية، على مبدأ **التنمية المستدامة (Sustainability)**، وتهدف إلى تحقيق الكفاءة والاستدامة البيئية. ورغم اختلاف الغايات الظاهرة، فإن المبادئ الأساسية للتنمية المستدامة – وهي **الكفاءة في استخدام الموارد والعدالة بين الأجيال** – هي مبادئ تنطبق بقوة على تحدي إعادة الإعمار.

يمكن تكييف هذه المقاييس على النحو التالي:

- **تحويل معيار "كفاءة استخدام الطاقة"** إلى **معيار "كفاءة استخدام موارد البناء المتاحة"**، لتشجيع استخدام مواد محلية وإعادة تدوير الأنقاض.
- **تحويل معيار "خفض البصمة الكربونية"** إلى **معيار "سرعة ومرونة التعافي"**، مع الأخذ بالاعتبار تقليل التكاليف التشغيلية الطويلة الأمد.

إن إطار **ANP** يتيح هذه المرونة في إعادة تعريف المعايير وإسناد أوزان جديدة تعكس الأولويات الوطنية والاجتماعية الملحة، بدلاً من مجرد تطبيق المعايير الأوروبية بشكل حرفي.

3.11.2 أوجه الاختلاف الرئيسية والتحديات البنيوية في نقل التجربة

على الرغم من التشابه المنهجي، تبرز اختلافات جوهرية تتعلق بالسياق العام، والتي تشكل تحديات بنيوية يجب أخذها بعين الاعتبار عند نقل التجربة وتكييفها في البيئة السورية.

الاختلاف في طبيعة المعايير المعتمدة: التنمية مقابل الاستجابة للأزمة

تعمل التطبيقات الإيطالية في بيئة **مستقرة (Stable)** وهدفها الرئيسي هو **تحسين الأداء (Optimization)**. فالقرار في إيطاليا يدور حول **أفضل** طريقة لتوزيع الممرات الإيكولوجية أو تحديد **أفضل** موقع لمنشأة ما ضمن خيارات قابلة للتحقيق.

في المقابل، يتسم السياق السوري بكونه بيئة **ما بعد النزاع (Post-Conflict)**، حيث يغلب على التخطيط عنصر **الاستجابة للأزمة (Crisis Response)** و**الضرورة القصوى (Urgency)**. وهذا يتطلب إدخال معايير نوعية ذات أوزان مهيمنة غير موجودة في النموذج الإيطالي الأصلي، مثل:

- **المعايير الأمنية:** كمدى استقرار المنطقة، وسهولة الوصول إليها في ظل الظروف الأمنية المتقلبة.
- **معايير الإغاثة الإنسانية:** مثل **القرب من التجمعات السكانية النازحة وتلبية الحد الأدنى من الاحتياجات الأساسية (Minimum Viable Service).**

بالتالي، يجب أن يتم تعديل المصفوفة التحليلية لنموذج **ANP** بحيث تعكس الأولويات القصوى المتمثلة في **"إنقاذ ما يمكن إنقاذه"** و"تمكين العودة الآمنة والمستدامة" قبل الانتقال إلى معايير الكفاءة البيئية أو الاقتصادية.

تحديات حوكمة البيانات ودور المؤسسات في إدارة نظم دعم القرار المكاني

يعد توفر **بنية تحتية قوية للبيانات (Robust Data Infrastructure)** و**إطار مؤسسي مستقر (Stable Institutional Framework)** شرطاً مسبقاً لنجاح أي نظام دعم قرار متطور مثل **MC-SDSS**. وتفترض الدراسة الإيطالية وجود:

1. **بيانات مكانية موثوقة ومُحدّثة** بشكل دوري ودقيق.
2. **إطار تشريعي شفاف** يسمح بدمج تفضيلات أصحاب المصلحة وتطبيق النتائج.
3. **قدرة مؤسسية** عالية لدى المخططين والجهات الحكومية على استخدام الأدوات التحليلية المتقدمة (ANP).

في السياق السوري، تمثل هذه المتطلبات تحديات بنيوية كبرى:

- **ندرة البيانات (Data Scarcity):** الفقدان أو عدم التحديث المستمر للخرائط السجلية والبيانات الإحصائية الرسمية بسبب تلفها ضمن العقد الماضي.
- **القدرة المؤسسية المحدودة:** الحاجة إلى بناء قدرات متخصصة في استخدام الأدوات التحليلية المتقدمة مثل **ANP** والتي تتطلب تدريباً مكثفاً وخبرة رياضية متقدمة.

- **التحدي التشريعي والسياسي:** حالة عدم اليقين السياسي وتعدد الجهات الفاعلة قد يعيق الاتفاق على أوزان المعايير وشفافية عملية اتخاذ القرار، وهي ركائز أساسية لفعالية نظام **SDSS**.

إن هذه التحديات تفرض ضـــرورة تبني نهج تكييفي (Adaptive Approach) يركز على **البســـاطة والتدرج** في التطبيق، واستخدام بيانات الاستشعار عن بعد كـ**مصدر أساسي** لسد فجوة البيانات الرسمية.

3.12 التوصيات لتكييف نموذج SDSS في التخطيط الإقليمي السوري

إن التحدي يكمن في تحويل النموذج المنهجي المتقدم في إيطاليا إلى إطار عمل مرن وواقعي يمكنه خدمة أهداف التعافي في ســـوريا. هذا يتطلب نموذجاً هجيناً (Hybrid Model) يجمع بين قوة **ANP** التحليلية وبين متطلبات السياق الإنساني والمؤسسي السوري.

3.12.1 منظور مقترح لنموذج (ANP-SDSS) يتناسب مع متطلبات التعافي في المدن السورية

لضمان الفعالية والتطبيق العملي، يجب أن يرتكز النموذج المقترح لتكييف نظم دعم القرار المكاني على إعادة صياغة المعايير وتأمين مشاركة فاعلة ومقننة لأصحاب المصلحة.

تصميم معايير التقييم متعدد الأبعاد: دمج الأبعاد الأمنية والاجتماعية والاقتصادية

يتطلب التكييف الناجح استبدال المعايير الأوروبية للتنمية المستدامة (المتعلقة بالكفاءة البيئية والنمو الاقتصادي) بـ**معايير التعافي ثلاثية الأبعاد (Triple-S Dimensions)**:

1. **البعد الأمني/البيئي (Security/Safety):** إعطاء وزن كبير لمعيار **خطر التهديدات غير التقليدية** (مثل الألغام والمتفجرات)، ومعيار **الاستقرار الأمني للمنطقة**.
2. **البعد الاجتماعي/الإغاثي (Social/Relief):** تحديد معايير تتعلق بـ**الكثافة السكانية الحالية للنازحين، ومدى توفر الخدمات الأساسية (مياه، صحة)، والعدالة في توزيع الموارد على الفئات الأكثر ضعفاً**.
3. **البعد الاقتصادي/العمراني (Economic/Urban):** معايير تتعلق بـ**تكلفة إعادة الإعمار لكل وحدة سكنية (Cost-Efficiency)، وتوافر البنية التحتية الأساسية القابلة للترميم، وتسهيل عودة النشاط الاقتصادي المحلي**.

إطار عمل للتخطيط التشاركي (Participatory Planning) لضمان القبول المجتمعي للقرارات المكانية

لقد أثبتت التجربة الإيطالية (في تطبيق تحديد مواقع المنشـــآت غير المرغوب فيها) أهمية دمج تفضـــيلات المجتمع. ولأن القرارات التخطيطية في سوريا قد تكون حساسة ومثيرة للجدل، خاصة ما يتعلق بإعادة توزيع الأراضي، فإن إطاراً تشاركياً متكاملاً يعد ضرورياً:

- **تحديد فئات المشـــاركة:** يجب إشـــراك **المجتمعات المتضـــررة** والجهات الممثلة لهم، إضـــافة إلى **الخبراء التقنيين والجهات الحكومية**.

- **توظيف ANP في التفاعل:** يمكن استخدام عملية **ANP** كوسيلة شفافة لجمع **مقارنات زوجية (Pairwise Comparisons)** من أصحاب المصلحة حول أوزان المعايير، وتوثيق الاختلافات بين الفئات المختلفة (مثلاً، وزن معيار الأمن مقابل وزن معيار التكلفة)، مما يضمن أن تكون القرارات النهائية نتاجاً لعملية تفاوض منظمة ومحسوبة رياضياً.

هذا المنهج المقترح يضمن أقصى استفادة من القوة التحليلية لنموذج ANP-SDSS المكتشف في دراسة الحالة الإيطالية، مع تكييفه ليخدم متطلبات التعافي الأكثر إلحاحاً وتعقيداً في البيئة السورية.

3.13 دمج نظم المعلومات الجغرافية وعملية الشبكة التحليلية(ANP)

إن ما أنجزه الباحثان الإيطاليان، **لومباردي وفيريتي**، يمثل تحولاً نوعياً في منهجيات التخطيط المكاني، حيث لم يقتصر العمل على مجرد استخدام الأدوات، بل قام على **صياغة إطار عمل متكامل** قادر على استيعاب التعقيدات والتفاعلات المتبادلة في الأنظمة الحضرية والإقليمية. ويتمثل هذا الإطار في الدمج المنهجي بين نظم المعلومات الجغرافية (**GIS**) وعملية الشبكة التحليلية.(**ANP**)

3.13.1 الابتكار في استخدام عملية الشبكة التحليلية(ANP)

يكمن جوهر الابتكار في اعتماد **ANP**كأداة رياضية لترجيح المعايير. ففي حين أن منهجية **التسلسل الهرمي التحليلي (AHP)** تفترض علاقات هرمية خطية أحادية الاتجاه، فإن **ANP**تتجاوز هذا القيد لتعالج **العلاقات الشبكية والتبادلية (Interdependencies and Feedback)** بين عناصر القرار. هذا يعني أنه يمكن لـ ANP أن تمثل بدقة أنظمة واقعية معقدة، ففي التخطيط الحضري:

- **عنصر التغذية الراجعة :**قد يؤثر جودة البنية التحتية (معيار تقني) على القبول الاجتماعي للمشروع (معيار اجتماعي)، وفي الوقت ذاته قد يؤدي القبول الاجتماعي العالي إلى توجيه المزيد من الاستثمارات لتحسين البنية التحتية، وهو ما يمثل حلقة تغذية راجعة لا يمكن لـ AHP نمذجتها.
- **هيكلية الشبكة :**يتم تصميم النموذج على شكل **شبكة** تتكون من **عناقيد(Clusters)** ، يمثل كل عنقود مجموعة من المعايير ذات الصلة (مثل العنقود البيئي، العنقود الاقتصادي، العنقود الاجتماعي). يتم بعد ذلك استخدام **المقارنات الزوجية (Pairwise Comparisons)** من قبل مجموعة من الخبراء Focus) (Groupsلتحديد الأوزان النسبية لهذه العلاقات المعقدة.

3.13.2 آلية التكامل المكاني بين ANP وGIS

تُعد آلية دمج الأوزان التحليلية مع الخصائص المكانية الخطوة التنفيذية التي حولت النموذج النظري إلى أداة دعم قرار مكانية فعالة. وتتم هذه الآلية عبر الخطوات التالية:

1. **إنشاء خرائط المعايير :(Criterion Mapping)** يتم تحويل كل معيار تم تحديده وترجيحه بواسطة **ANP**(مثل: البعد عن الطرق، الارتفاع، الكثافة السكانية) إلى **خريطة مكانية** داخل بيئة .**GIS**يتم تكميم

هذه الخرائط بحيث تُعطى لكل بكســل أو وحدة مكانية قيمة ملاءمة تتراوح عادةً بين (0) و (1)، حيث تمثل القيمة الأعلى ملاءمة أكبر.

2. **تطبيق الأوزان الشــبكية (Applying Network Weights):** تُســتخدم الأوزان العالمية (Global Weights) المستخلصة من تحليل **ANP** كمُضاعِف (Multiplier) لخرائط المعايير المقابلة لها.
3. **التجميع المكــاني (Spatial Aggregation):** يتم تجميع الخرائط الموزونــة (Weighted Maps) باســتخدام دالة رياضــية محددة (غالباً ما تكون الجمع الموزون) لإنتاج **خريطة الملاءمة النهائية (Final Suitability Map)**. هذه الخريطة هي نتاج النموذج وتوفر تصنيفاً مكانياً واضحاً للمواقع البديلة.

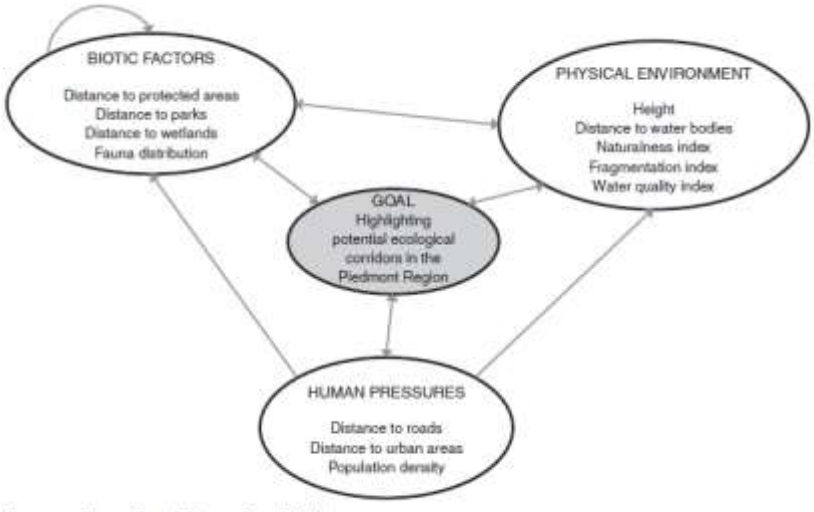
3.14 دراسة الحالة A: تحليل ملاءمة الأراضي للممرات الإيكولوجية في بييمونتي

3.14.1 تفاصيل الأهداف والإجراءات المنجزة

استهدفت هذه الدراسة في إقليم **بييمونتي** تحديد المواقع المثلى لإنشاء **ممرات إيكولوجية** لضمان **الاتصال البيولوجي** والحفاظ على التنوع الحيوي. وقد ركز الباحثان على معالجة المشــكلة التخطيطية المتمثلة في التوفيق بين التنمية البشرية ومتطلبات الحفاظ على البيئة.

- **تصميم النموذج:** تم بناء نموذج **ANP** يشمل ثلاثة عناقيد رئيسية لتقييم ملاءمة الموقع:

1. **البيئة الفيزيائية (Physical Environment):** وتضــمنت معايير الارتفاع والانحدار والبعد عن المسطحات المائية.
2. **الضــغوط البشــرية (Human Pressures):** وتضــمنت معايير البعد عن المناطق الحضــرية والكثافة السكانية والبنية التحتية للطرق.
3. **العوامل الحيوية (Biotic Factors):** وتضمنت معايير نوع الغطاء النباتي والقرب من المناطق المحمية.



Source: Ferretti and Pomarico (2013)

رسم توضيحي 12: خارطة عناصر نموذج ANP

نظرًا للتوزيع المكاني للعناصـر المدروسـة، تم ربط كل معيار بخريطة جغرافية حيث يمتلك كل بكسـل قيمة ملاءمة معينة. وهكذا تُمثّل خريطة المعيار التوزيع المكاني لأداء هذا المعيار في تحقيق الهدف. وقد تم اشـتقاق هذه الخرائط من عمليات نظم المعلومات الجغرافية الأسـاسـية (مثل تراكب الخرائط، إنشـاء مناطق العزل، حسـاب المسـافات، الاستعلامات المكانية، وغيرها)، بالاعتماد على البيانات العامة المتوفرة في قاعدة البيانات الإلكترونية للهيئة الإقليمية.

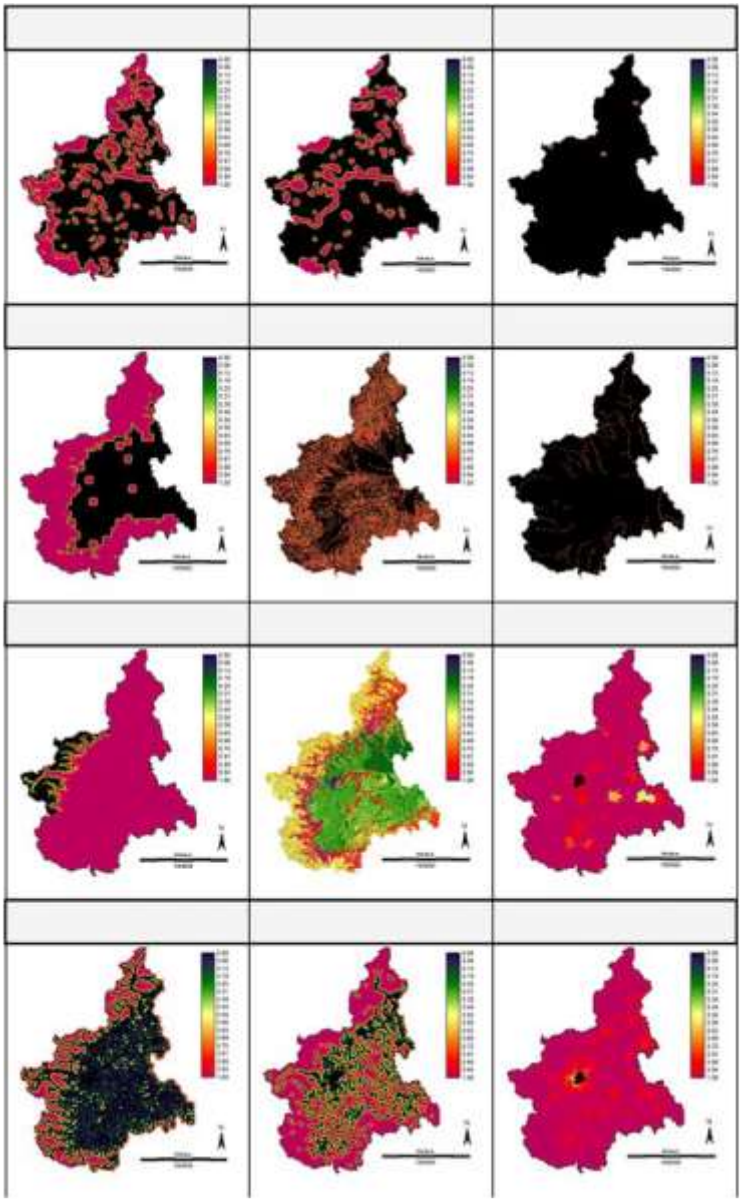
بعد تحديد المعايير ورسـم خرائطها، كان من الضـروري إجراء عملية التوحيد القياسـي (Standardization) لجعل العوامل قابلة للمقارنة، وذلك باسـتخدام دوال القيم؛ أي منحنيات تعبّر عن الدرجة المقابلة للقيمة بالنظر إلى مسـتوى تحقيق الهدف(Beinat ، 1997 .(تعمل هذه العملية على تحويل قيم العوامل في الخرائط الأصـلية إلى نطاق محدد يتراوح بين 0 (أدنى ملاءمة وأقل تحقيق للهدف) و1 (أعلى ملاءمة وأقصى تحقيق للهدف).

في عمليات اتخاذ القرار البيئي المعتمدة على نظم دعم القرار المكاني(SDSS) ، تحدث التفاعلات بين أصـحاب المصـلحة/الخبراء والمحلل بشـكل أسـاسـي خلال مرحلتي تحديد دوال القيم واسـتخلاص الأوزان. بينما تُعد المرحلة الأولى تقنية وتتطلب إشـراك خبراء من مجالات مختلفة، يمكن فتح المرحلة الثانية لمشـاركة فاعلين متعددين من أجل مراعاة وجهات النظر المتنوعة تجاه مشكلة القرار قيد التحليل.

في هذه الدراسة، تم تنفيذ عملية التوحيد القياسي من خلال مجموعة تركيز (Focus Group) من الخبراء، باستخدام كل من الدوال الخطية والدوال السيغمويدية أحادية الاتجاه المتناقصـة(Eastman ، 2006 .(وبهدف بناء فريق متعدد التخصصات قادر على التعامل مع تعقيد المشكلة قيد الدراسة، جمعت مجموعة الخبراء مختصين في مجالات التحليل المكاني، والهندسة البيئية، وتقييم المناظر الطبيعية، وإجراءات تقييم الاستدامة. ناقش الخبراء فيما بينهم للوصـول إلى توافق بشأن كل من توحيد خرائط العوامل وتحديد أوزان العناصر المشاركة في القرار.

تألّفت العملية من ثلاث مراحل متتابعة تم تيسيرها من قبل المحلل:

- في المرحلة الأولى، ناقش الخبراء واعتمدوا دوال التوحيد لكل خريطة عامل.
- في المرحلة الثانية، قام الخبراء بعصـف ذهني جماعي لتحديد الأهمية النسـبية للمجموعات (Clusters) المستخدمة في التحليل.
- وأخيرًا، في المرحلة الثالثة، أجاب كل خبير على اسـتبيان فردي يحدد فيه الأهمية النسـبية للعقد (Nodes) ضمن المجموعة المرتبطة بمجال خبرته.



رسم توضيحي 13: الخرائط الموحّدة لجميع المعايير المعتمدة في النموذج

لقد أبرزت نتائج النهج التشــاركي المعتمد في وزن العناصــر أن أكثر العوامل أهمية في تحديد ملاءمة الأرض لتعمل كممرّات بيئية هما" :**المســافة عن المناطق الحضــرية (0.22)** "في مجموعة **"الضــغوط البشــرية"**، و"الارتفاع" (0.20) في مجموعة **"البيئة الفيزيائية."**

- **نتائج الترجيح :**أظهر تحليل **ANP**تفوقاً واضحاً لوزن **عنقود البيئة الفيزيائية** (بنسبة 54%) يليه **عنقود الضغوط البشرية** (بنسبة 30%) ثم **العوامل الحيوية** (بنسبة 16%). ومن بين المعايير الفردية، كان لمعياري **"الارتفاع** "و"البعد عن المناطق الحضرية" الأولوية القصوى.

	Elements	Weights
Clusters		
Biotic factors (0.16)	Distance to protected areas	0.07
	Distance to parks	0.02
	Distance to wetlands	0.04
	Fauna distribution	0.05
Physical environment (0.54)	Elevation	0.20
	Distance to water bodies	0.03
	Naturalness index	0.10
	Fragmentation index	0.07
	Water quality index	0.06
Human pressures (0.30)	Distance to roads	0.08
	Distance to urban areas	0.22
	Population density	0.06

Table I. Priorities of the elements in the model

جدول 29: الأولويات النهائية للعوامل الناتجة عن التقييم باستخدام عملية الشبكات التحليلية (ANP).

3.14.2 النتائج والدروس المستفادة

بعد الحصول على الخرائط لكل معيار وتحديد الأوزان، تم دمج جميع المعلومات بهدف إنتاج خريطة الملاءمة الشاملة، بالاعتماد على قاعدة التجميع بالجمع الخطي الموزون.(Linear Weighted Combination)

وفي هذه الدراسة، ومن أجل اختبار استقرار النتائج وتعزيز وعي صُنّاع القرار حيال الشكوك والمخاطر المرتبطة بمشكلة القرار، تم إنتاج ثلاث خرائط مختلفة للملاءمة عبر تغيير الأهمية الممنوحة في كل مرة للمجموعات الرئيسية الثلاث الداخلة في القرار. وقد جرى تحديد ومناقشة مجموعة الأوزان الجديدة لكل تجربة خلال اجتماع مجموعة التركيز، حيث طُلب من الخبراء محاكاة وجهات نظر مختلفة بحيث تهيمن مجموعة معيّنة في كل مرة على المجموعات الأخرى.

3.14.3 تعزيز الرسالة: التكييف مع تحديد المواقع المثلى لإعادة التوطين

تُعطي هذه الدراسة مثالاً منهجياً على كيفية تحويل مفهوم التقييم المعقد إلى تصنيف مكاني قابل للتطبيق، وهو ما يمكن تكييفه في رسالة الماجستير لدعم قرارات **إعادة التوطين وإدارة الأنقاض**:

- **تحويل الأولوية :(Priority Transformation)** يتم تحويل هدف **"الاتصال البيولوجي** "إلى **"الاتصال الاجتماعي/الاقتصادي** "في سوريا. حيث يمكن أن يُصبح "الارتفاع" و"البعد عن المناطق الحضرية" الإيطاليان إلى معيارين سوريين هما" :**البعد عن مناطق التهديد الأمني** "و"القرب من البنية التحتية القائمة السليمة."

- **استخدام تحليل الحساسية :(Sensitivity Analysis)** لقد استخدم الباحثون الإيطاليون تحليل **"ماذا لو "** لتقييم تأثير تغيير الأوزان على النتيجة النهائية. هذا التكنيك بالغ الأهمية للسياق السوري لتقييم سيناريوهات مختلفة؛ على سبيل المثال، ماذا لو أعطينا الأولوية القصوى (بوزن 70%) لمعيار **"البنية التحتية السليمة "**مقابل **"توفر الأراضي"**؟ إن نتائج هذا التحليل تزود صانع القرار بمجموعة من الخرائط البديلة التي تُظهر تداعيات كل خيار استراتيجي .

3.15 دراسة الحالة B: استكشاف الفرص ونقاط الضعف في الأنظمة الإقليمية المعقدة(Ormea)

3.15.1. تفاصيل الأهداف والإجراءات المنجزة

ركزت هذه الدراسة على مدينة **أورميا** التي عانت من التدهور الاقتصادي والهجرة، وكان هدفها استباقياً :**تحديد نقاط الضعف (Vulnerabilities) والفرص (Opportunities)** لبلورة استراتيجيات تنمية مستقبلية.

- **الهدف الاستراتيجي :**تم بناء نموذج **ANP**بهدفين فرعيين (الفرص والمخاطر)، حيث تم قياس **الأهمية النسبية** للعناصر المكونة للنظام الإقليمي (الاقتصادي، الطبيعي، التراثي) بالنسبة لكل من الفرص ونقاط الضعف.
- **عناقيد التقييم :**شملت الشبكة أربعة عناقيد رئيسية هي :**المنظور الإقليمي**، و**المنظور الاقتصادي**، و**المنظور الطبيعي**، و**التراث الثقافي والتاريخي**.

3.15.2 الإعداد(Setting)

في سياق النقاش الحالي حول تقييم الاستدامة والمقاربات المتكاملة، تلعب التحليلات المكانية للفرص والهشاشات المرتبطة بالسياق المجالي دورًا حاسمًا في دعم تخطيط واستخدام الأراضي وإدارتها.

يهدف هذا المثال التطبيقي الثالث إلى توضيح إمكانيات منهجية **الـــــ ANP المكانية المتكاملة** في تحديد **الفرص المستقبلية والهشاشات** داخل منطقة جبلية في شمال إيطاليا) يوجد وصف كامل للدراسة.

يتعلق هذا التطبيق بمدينة صغيرة تُدعى **أورميا(Ormea)** ، يبلغ عدد سكانها 1,750 نسمة، تقع ضمن الإقليم الألبي لمنطقة بيدمونت، على الحدود مع إقليم ليغوريا وفرنسا. في الماضي، كانت المدينة تتمتع بأهمية صناعية كبيرة، خصوصًا في إنتاج الصوف والورق، كما اكتسبت مكانة سياحية دولية بفضل وجود الخط الحديدي. أما اليوم، وبسبب التخلي عن المناطق الجبلية، فقد انتقلت العديد من الأنشطة الاقتصادية، وتراجع القطاع السياحي بشكل ملحوظ، مما أدخل المدينة في أزمة عميقة تستوجب استراتيجيات جديدة لتنمية المنطقة

3.15.3 المنهجية(Methods)

انطلاقًا من الهدف العام للتحليل، والمتمثل في تحديد **الفرص والهشاشات** في إقليم أورميا، تم تحديد مجموعة شاملة من معايير التقييم تعكس مختلف الانشغالات المرتبطة بمشكلة القرار، وذلك اعتمادًا على منهج **التفكير القائم على القيم**[40] **(Value-Focused Thinking)**

في هذا السياق، جرى اعتبار **الفرص** بوصفها الجوانب الإيجابية للتحولات طويلة الأمد، و**الهشاشات** بوصفها الجوانب السلبية لها، خاصةً في ظل صعوبة التنبؤ بالمستقبل. وقد استُخلص التوزيع المكاني لكل عنصر من البيانات العمومية المتاحة حول المنطقة محل الدراسة.

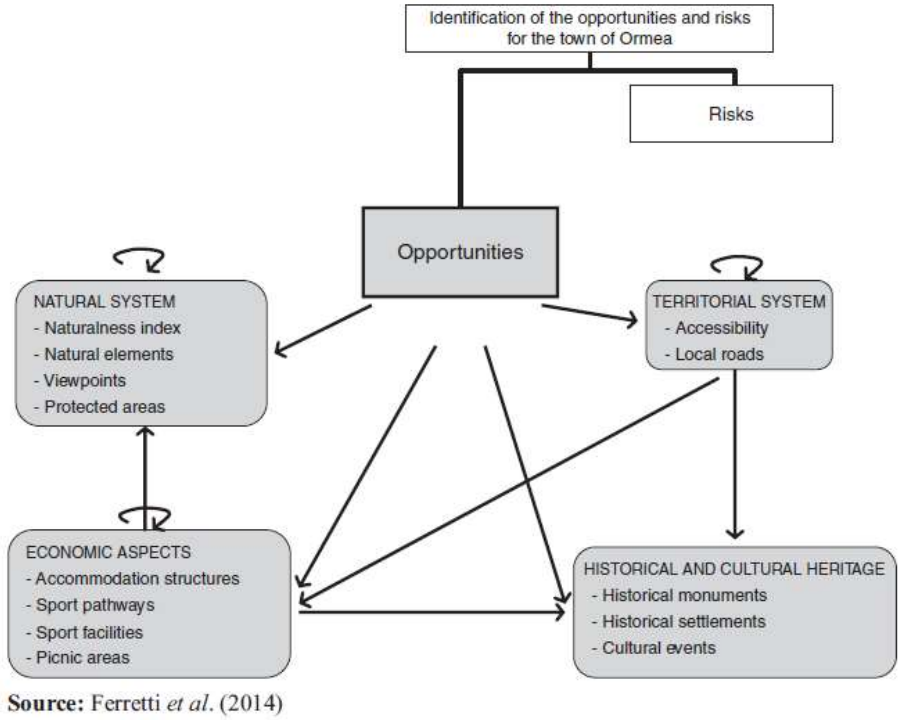


Figure 8. The opportunities sub-network in the ANP model for the problem under analysis

رسم توضيحي 14: نموذج القرار وفق ANP، مع التركيز على الشبكة الفرعية الخاصة بالفرص.

---

[40] Keeney، 1992

تم إجراء **التوحيد (Standardization)** و**تحديد الأوزان (Weighting)** من خلال **مجموعة تركيز** جمعت خبراء من مجالات مختلفة (التقييم الاقتصادي، الهندسة البيئية، الإيكولوجيا المجالية)، إضافةً إلى **أصحاب مصلحة محليين من بلدية أورميا**.

من خلال المشاركة الفاعلة لجميع الخبراء وأصحاب المصلحة، تم تحديد نقاط التحكم الخاصة بتوحيد كل معيار، وتحويل جميع خرائط المعايير إلى نطاق ملاءمة بين 0 و1. وفي المرحلة اللاحقة، تم تنفيذ عملية الوزن على جميع الجوانب المعتمدة.

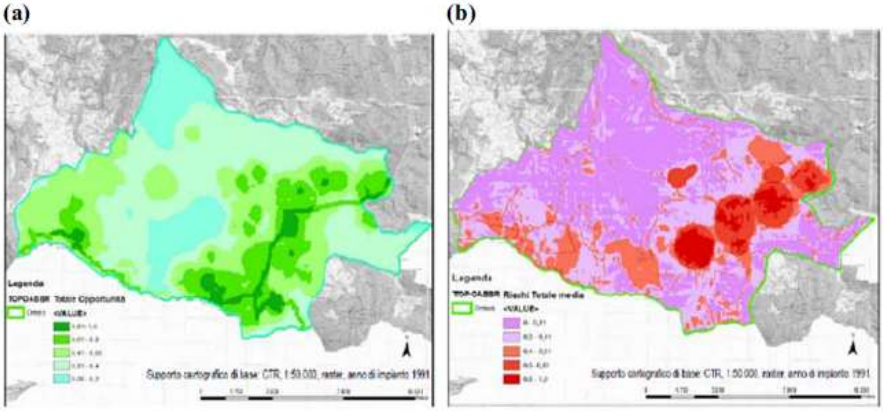
3.15.4 النتائج والدروس المستفادة(Results and Lessons Learned)

تمثلت نتائج الدراسة في خريطتين توضحان التوزيع المكاني لكل من الفرص والهشاشات ضمن المنطقة محل التحليل.
تمثل هاتان الخريطتان أول توليف بصري للجوانب السلبية والإيجابية في الإقليم (الشكل 9أ و9ب على التوالي)، وتسمحان باستخلاص مؤشرات مفيدة تتعلق **بنقاط التحذير** التي تتطلب تدابير تخفيفية أو مراقبة خاصة.

ومن خلال النتائج، يمكن ملاحظة أن كلًا من الفرص والهشاشات يتركزان في **الجزء الجنوبي الشرقي** من المنطقة المدروسة، حيث يقع مركز المدينة.

يمكن تلخيص الاستنتاجات المستخلصة من هذا التطبيق على النحو التالي:

1. **أحد أهم نقاط قوة المنهجية المعتمدة** يكمن في أنها منظّمة في إطار تعلّمي تدريجي. إذ يكتسب صانع القرار وعيًا متزايدًا بالعناصر المطروحة أثناء بناء النموذج (من خلال وظائف التوحيد واستخلاص المفاضلات)، وبالتالي يتعلّم حول المشكلة طوال مسار اتخاذ القرار(Boerboom & Ferretti ، 2014؛ Ferretti وآخرون، 2014.)
2. من خلال تحديد **الفرص والهشاشات** في المنطقة محل الدراسة، يسمح النهج المعتمد باستشراف **استراتيجيات مستقبلية مختلفة (سيناريوهات)** لإدارة الإقليم وتثمينه. وبناءً على ذلك، يمكن دراسة وتقييم سياسات متعددة من أجل اختيار **الأكثر استدامة** بينها.



رسم توضيحي 15:
التوزيع العام للفرص (أ)
والمخاطر / نقاط الضعف (ب)
في المنطقة قيد التحليل

3.15.5 تعزيز الرسالة: التكييف مع التخطيط الاستراتيجي ما بعد النزاع

يُعد هذا النموذج مثالياً للمرحلة الانتقالية في سوريا، حيث يجب أن يتحول التخطيط من مجرد إطفاء الحرائق إلى **بناء استراتيجية طويلة الأمد**:

- **تحديد الاستراتيجية المتوازنة :**يمكن استخدام النموذج لترجمة مخرجات **تحليل الأضرار** (التي تحدد التحديات) و**تحليل الموارد** (التي تحدد نقاط القوة) إلى خريطة استراتيجية.
  - **نقاط الضعف (Vulnerabilities):** تُعتبر مناطق التدمير الشامل والتوسع العشوائي نقاط ضعف حقيقية تتطلب تخصيص موارد لإعادة التخطيط والتدخل المباشر.
  - **الفرص (Opportunities):** تُعتبر الأراضي الزراعية البكر القابلة للاستصلاح السريع، والمواقع التراثية السليمة، والمناطق ذات الكثافة السكانية المنخفضة القابلة للتوسع المخطط، بمثابة فرص يجب توجيه الاستثمار إليها.
- **تكامل البيانات الزمانية :**يمكن استخدام **الخرائط الزمانية لنمو التجمعات العشوائية** كمعيار رئيسي لتغذية عنقود **"نقاط الضعف "**في **ANP**، مما يضمن أن النموذج يركز على التدخل في المناطق التي تعاني من تشوهات هيكلية ناتجة عن النزاع.

3.16 الخاتمة

تناولت هذه الدراسة تنامي الاهتمام في الأدبيات العلمية باستخدام نظم دعم القرار المكانية متعددة المعايير-MC) (SDSS، بوصفها أدوات قادرة على معالجة قضايا التخطيط المعقدة في مجالات استخدامات الأرض، التخطيط الحضري والإقليمي، إدارة الموارد المائية، وحماية البيئة. وتبرز أهمية هذه الأدوات في قدرتها على دمج البيانات

المكانية مع نماذج التحليل الكمي والنوعي، بما يساهم في بناء قرارات مدروسة وشفافة تقوم على تقييم شامل لمجموعة من المؤشرات البيئية والاجتماعية والاقتصادية.

اعتمدت الدراسة على منهجية عملية الشبكات التحليلية(ANP) ، لما تتميز به من قدرة على تمثيل العلاقات التفاعلية غير الخطية بين المعايير والعناصر، بخلاف النماذج الهرمية التقليدية التي تفترض تسلسلاً خطياً من الأعلى إلى الأسفل. ففي نموذج الشبكة، لا تقتصر أهمية المعايير على تحديد أوزان البدائل، بل قد تؤثر البدائل أيضاً في إعادة تحديد أولوية المعايير، مما يعكس الطبيعة الديناميكية لأنظمة اتخاذ القرار في البيئات المعقدة.

أظهرت التطبيقات التي تم تناولها أن منهجية ANP-SDSS تساهم في رفع مستوى الوعي لدى الأطراف المشاركة في عملية اتخاذ القرار، إذ تولد ما يمكن تسميته بـ "أثر التعلم"، وتدعم الفهم التدريجي للمشكلة أثناء بناء النموذج وتحديد الأولويات وإعداد السيناريوهات. ومع ذلك، يبقى التكامل بين نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وأساليب التحليل متعدد المعايير (MCA) أحد التحديات العملية، خصوصاً عند التعامل مع مخرجات متنوعة تجمع بين المعطيات المادية (كالطبوغرافيا واستعمالات الأرض) والمعايير النوعية (كالقبول الاجتماعي أو الحساسية البيئية).

كما يُعدّ جانب المشاركة المجتمعية تحدياً إضافياً، إذ يتطلب هذا النهج دمج أحكام متعددة قد تكون متعارضة أو متباينة بين الخبراء وأصحاب المصلحة، وصياغتها في مخرجات قابلة للاستخدام ضمن سياسات أو خطط مكانية قابلة للتنفيذ .ورغم هذه التحديات، أكدت النتائج المستخلصة من التطبيقات المتعلقة بتحليل الممرات البيئية من جهة، وتحديد الفرص والمخاطر التنموية في المناطق الجبلية من جهة أخرى، أن المنهجية المقترحة تمتلك قدرة واقعية على تمثيل تعقيد الأنظمة المكانية المعاصرة، حيث تتشابك المسارات وتوجد تغذية راجعة بين مكونات النظام، وتصبح البنية المكانية – بحد ذاتها – عنصراً حاسماً في تطوير القرار.

3.16.1 الإسقاط على الحالة السورية

تشكل المنهجية المعتمدة في هذه الدراسة إطاراً قابلاً للتطبيق في السياق السوري، خاصة في مرحلة ما بعد الحقبة السورية الجديدة وما تتطلبه من مقاربات إعادة إعمار وتنمية مكانية مستدامة. ويمكن تحديد مجالات الاستفادة على النحو الآتي:

1. **إعادة بناء الاتصال البيئي والمجالي**

شهدت المدن السورية تدهوراً في البنية البيئية نتيجة التوسع العشوائي، والتعدي على الأودية، وتلاشي المساحات الخضراء. ويسمح استخدام نماذج الممرات البيئية بتحديد المناطق الحرجة واستعادة الترابط الإيكولوجي، بما يساهم في تعزيز قدرة المدن على التعافي البيئي.

2. **تحديد الفرص والمخاطر التنموية**

تتيح النماذج القائمة على تحليل الفرص والمخاطر رسم خريطة للاتجاهات التنموية القابلة للاستثمار، مقابل المناطق المهددة أو ذات الهشاشة العمرانية والاجتماعية. ويعد ذلك أداة استراتيجية لدعم رسم سيناريوهات إعادة الإعمار في المدن المتوسطة والصغرى، والمناطق الريفية.

3. **الانتقال نحو التخطيط التشاركي**

يوفر هذا النهج آلية لإشراك الخبراء والجهات المحلية وأصحاب المصلحة في بناء القرار، وهو ما يُعدّ بديلاً عملياً للنهج المركزي الجامد الذي طالما أثر سلباً على التخطيط السوري، ويساهم في بناء ثقة بين المجتمع المحلي والسلطات التنفيذية.

4. **تحويل الخرائط من وصفية إلى تحليلية**

تقوم معظم الدراسات المحلية حالياً على خرائط وصفية جامدة، بينما تسمح النماذج التحليلية من نوع ANP-SDSSبإنتاج خرائط ديناميكية قابلة للتحديث، والاختبار عبر سيناريوهات "ماذا لو؟"، سواء فيما يتعلق بالنمو العمراني، أو حماية الموارد الطبيعية، أو توجيه الاستثمارات.

التحليل المقارن للتجارب العالمية وتطبيقاتها على حالة دمشق

تمهيد

يهدف هذا الجزء من البحث إلى تقديم تحليل مقارن بين التجربتين العالميتين اللتين تمّ اعتمادهما في إطار هذه الرسالة، وهما دراسة مدينة **مشهد الإيرانية** ودراسة **النموذج الإيطالي** الخاص بنظام دعم القرار المكاني متعدد المعايير القائم على عملية الشبكة التحليلية.(ANP) (MC-SDSS)
وتأتي هذه المقارنة بغية استخلاص الدروس المنهجية والعملية التي يمكن توظيفها في بناء نموذج متكامل لتحليل التحوّلات الحضرية في مدينة **دمشق**، اعتمادًا على مؤشرات مكانية وزمانية قابلة للقياس من جهة، وأدوات صنع قرار مرنة وواقعية من جهة أخرى.
فالتجربتان تمثلان اتجاهين مختلفين في مقاربة العلاقة بين التحضّر والبيئة: الأولى تقنية تحليلية تعتمد على صور الأقمار الصناعية ومؤشرات الغطاء الأرضي والحراري، والثانية مؤسسية تخطيطية تدمج العوامل المكانية والاجتماعية والاقتصادية ضمن منظومة صنع القرار.

مقارنة في المنهجية والمداخل النظرية

تعتمد دراسة مشهد على توظيف أدوات الاستشعار عن بعد في تحليل التغيّرات المكانية والزمانية، من خلال استخدام مؤشرات مثل **NDVI**(مؤشر الغطاء النباتي) و **NDBI**(مؤشر البناء الحضري) و **LST**(درجة حرارة السطح)، وذلك لمتابعة تطوّر الامتداد الحضري والجزيرة الحرارية الحضرية (UHI) عبر فترات زمنية متعاقبة.
تركّز هذه المقاربة على قراءة واقعية رقمية للتغيّر الفيزيائي في الأرض، حيث يمكن تتبّع العلاقة العكسية بين الكتلة النباتية وحرارة السطح، مما يجعلها مفيدة في تحليل التحوّلات البيئية الناجمة عن التحضّر السريع أو عن تدهور الغطاء الأخضر.
وفي المقابل، تقدّم الدراسة الإيطالية منظورًا أكثر تخطيطيةً واستراتيجية، إذ لا تكتفي بتحليل الظواهر المكانية، بل تسعى إلى **دعم عملية اتخاذ القرار** في إدارة الأراضي من خلال دمج المعايير المتعددة، سواء البيئية أو الاجتماعية أو الاقتصادية، عبر نموذج الشبكة التحليلية (ANP) ونظام دعم القرار المكاني.(SDSS)

ويقوم هذا النظام على تحديد المعايير، وتقدير الأوزان النسبية بينها، ثم إنتاج خرائط ملاءمة مكانية تُمكّن صانعي القرار من تحديد البدائل المثلى في توزيع الاستخدامات أو تحديد أولويات التنمية.

وبذلك، يمكن القول إن دراسة مشهد توفّر البنية الرقمية التحليلية اللازمة لفهم التحوّلات المكانية والحرارية، بينما تتيح دراسة إيطاليا الإطار المؤسسي لتوظيف تلك التحليلات ضمن عملية صنع القرار. ومن هنا، يُعَدّ التكامل بينهما خطوة ضرورية لتطوير نموذج سوري متكامل يربط بين **الرصد الفضائي** و**الدعم التخطيطي** في بيئة حضرية معقدة مثل دمشق.

أوجه التشابه

على الرغم من اختلاف البيئات والسياقات الجغرافية بين مشهد وإيطاليا، إلا أن كلتا الدراستين تشتركان في عدد من المبادئ المنهجية الجوهرية .أولها هو **الاعتماد على نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد** كمنصّة تحليلية موحدة تجمع بين البيانات الرقمية والمكانية.وثانيها هو **البحث عن مؤشرات كمية قابلة للقياس** يمكن من خلالها تقييم التحوّلات المكانية أو البيئية.وثالثها هو **التركيز على عنصر التغيير الزمني** باعتباره الأساس لفهم ديناميكيات التحضّر، سواء في صورة خرائط زمنية في مشهد، أو عبر سيناريوهات تحليل الحساسية في النموذج الإيطالي. كما تشترك الدراستان في فكرة **الترابط بين الإنسان والمكان،** حيث يُنظر إلى البيئة الحضرية باعتبارها نظامًا مفتوحًا يتأثر بعوامل اجتماعية واقتصادية ومناخية متداخلة، وهو ما يمثّل جوهر المقاربة المستدامة للتخطيط الحضري.

أوجه الاختلاف

تكمن الفروق الأساسية بين التجربتين في كلٍّ من **نطاق التحليل وأدواته** و**نوعية المخرجات.** ففي حين تُعنى دراسة مشهد بالتحليل الكمي البحت المبني على الصور الفضائية، دون تدخل مباشر من صانع القرار، تُعنى الدراسة الإيطالية بالجانب النوعي والمؤسسي، حيث تُدمج وجهات النظر المختلفة للخبراء والمخططين والمجتمع ضمن عملية اتخاذ القرار .كما أن مشهد تُركّز على البيئة شبه الجافة التي تتأثر بشكل مباشر بالتغيّرات المناخية، بينما تستند الدراسة الإيطالية إلى بيئة معتدلة ذات استقرار مؤسسي وإداري، ما يمنحها قدرة أعلى على اختبار أدوات التخطيط التشاركي .ومنه يمكن القول إن الدراسة الإيرانية تُظهر **القدرة التقنية** على القياس، بينما تُظهر الدراسة الإيطالية **القدرة المنهجية** على التقييم وصنع القرار، وهما معًا يشكّلان طرفي المعادلة التي تحتاجها دمشق في هذه المرحلة من إعادة الإعمار.

الملخّص المقارن

(أ) دراسة مشهد الإيرانية ركّزت على استخراج خرائط LST و NDVI/NDBIوتحليل ديناميكيات UHI عبر الزمن.
(ب) دراسة إيطاليا (MC-SDSS/ANP) التي ركّزت على نظم دعم القرار المكاني متعدد المعايير وتوظيف عملية الشبكة التحليلية لترجيح المعايير واتخاذ قرارات مكانية. الهدف هو:

(1) إبراز أوجه الشبه والاختلاف على مستوى المنهج والنتائج؛
(2) استخلاص دروس تطبيقية قابلة للاعتماد في حالة دمشق؛

(3) اقتراح خطوات لدمج النتائج في نظام دعم القرار عبر .Google Earth Engine

البُعد / المحور	دراسة مشهد(Mashhad)	دراسة إيطاليا(MC-SDSS / ANP)
الهدف الأساسي	رصد التغيّر الزماني والمكاني لغطاء الأرض ودرجة حرارة السطح (LST) وتحليل UHI خلال ~30 سنة .	تطوير منظومة دعم قرار مكاني متعدد المعايير-(MC SDSS)باستخدام ANP لاتخاذ قرارات تخطيطية إقليمية)ملاءمة مواقع، ممرات إيكولوجية، .(LULU
نوع البيانات المستخدمة	صور(NDVI, NDBI ، Landsat (TM/ETM+/OLI، حسابLST ، خرائط LULC وتصنيفات احتمالية .	مزيج من بيانات مكانية (خرائط/مؤشرات بيئية وجغرافية) وبيانات وصفية/اقتصادية واجتماعية؛ لا تقتصر على صورة فضائية وحسب .
النواتج الأساسية	خرائط LULC عبر 2017/2001/1988، خرائطLST ، مؤشرات إحصائية (تغيّر المبني/الغطاء النباتي، معاملات الارتباط). (مثال: النسبة المبنية: 5.11% → 9.85% → 17.29%) .	خرائط أوزان ومعايير فضائية، خرائط أفضليات مكانية (suitability maps)، سيناريوهات بديلة بناءً على تغيّر أوزان المعايير .(sensitivity analysis)
مستوى التحليل	كمّي فراغي وزماني) تحليل سلسلة زمنية، انحدارات ~ LST NDVI/NDBI، مصفوفات إرباك .(	منهجي تقييمي/جزئي كمّي: يدمج نتائج التحليل المكاني كمداخل إلى نموذج اتخاذ القرار؛ يعالج تبعيات المعايير عبر .ANP
قوة المنهج	جودة في رصد التغير الطاقي/السطحي، قياسات رقمية واضحة قابلة للمقارنة زمنياً؛ يُظهر كيف تتصل التغطية الأرضية بارتفاع .LST	قوة في تحويل مؤشرات مكانية ووصفية إلى قرارات عملية منضبطة رياضيًا، مع مرونة في احتساب تبعيات المعايير ودمج أصحاب المصلحة .
ضعف/حدود المنهج	في البيئات القاحلة قد يكون ارتباط NDVI/NDBI بـ LST ضعيفًا بسبب أثر التربة الجرداء؛ الحاجة لمؤشرات أو منهجيات إضافية) مثل NUACI أو تصنيف أكثر دقة .(	يعتمد على توافر بيانات وصفية ومؤسسية stakeholder) inputs، قواعد بيانات(؛ صعوبة التطبيق المباشر في بيئة ما بعد النزاع دون تكييف المعايير والأوزان .
قابلية النقل إلى دمشق	مباشرة للقياسات الزمانيةLST) ، تغيرات(LULC ، لكن تتطلب تعديل في تفسير NDVI/NDBI وإدخال متغيرات للتربة الجرداء والظروف النزاعية .	عالية من منظور دعم القرار (تحديد أولويات إعادة الإعمار، مواقع إعادة التوطين)، لكن بحاجة لتكييف المعايير (أمنية/إغاثية) وتوفر بنية مؤسسية لعمل .ANP

جدول 46: الملخص المقارن للتجارب العالمية والحالات الدراسية

الدروس المستفادة من التجربتين

تُبرز المقارنة بين التجربتين أهمية الجمع بين **التحليل الفضائي الكمي** و**التحليل التخطيطي التشاركي** ضمن منظومة واحدة .فمن الناحية التطبيقية، يمكن اعتماد أدوات دراسة مشهد لتوليد خرائط زمنية دقيقة لتغيّرات استخدامات الأراضي ودرجة الحرارة السطحية في دمشق، باستخدام منصة **Google Earth Engine** ومؤشرات NDVIو NDBIوLST، كما تم تطويره في هذه الرسالة .ثم تُستخدم مخرجات هذه الخرائط كمدخلات في نموذج دعم القرار المحلي المستوحى من التجربة الإيطالية، بحيث تُترجم النتائج المكانية إلى **قرارات عملية** حول مناطق التدخّل والأولويات التنموية، مع إمكانية إدخال معايير جديدة تتناسب مع الواقع السوري مثل الاستقرار الأمني، توافر الخدمات الأساسية، أو الكثافة السكانية بعد النزوح .وبذلك تتحول التجربتان العالميتان إلى **إطار تكاملي واحد** يربط بين الرصد والتحليل والتخطيط.

إمكانيات التطبيق على الحالة السورية

تتميّز مدينة دمشق بأنها تجمع بين تحديات البيئات الحضرية الكثيفة والمناطق شبه الجافة، ما يجعلها بيئة مناسبة لتطبيق منهجية هجينة مستخلصة من التجربتين. فعلى المستوى المكاني، يمكن اعتماد منهجية مشهد في تحليل الغطاء الأرضي والحراري لتقييم أثر التحضّر خلال العقود الماضية، خاصة في المناطق التي شهدت تغيّرات عمرانية واسعة أو تراجعًا في الغطاء النباتي. أما على المستوى التخطيطي، فإن منهجية إيطاليا تُقدّم إطارًا لاتخاذ القرار المكاني عبر نموذج دعم القرار متعدد المعايير(SDSS) ، وهو ما يمكن أن يُستخدم في تخطيط إعادة الإعمار وتحديد مناطق الأولوية وفق معايير بيئية وعمرانية واجتماعية واقتصادية متوازنة .ومن خلال دمج النتائج في نظام موحّد، يمكن توليد نموذج سوري مخصّص، يربط بين المؤشرات الطيفية مثل NDVI و LSTو UHIوبين عملية صنع القرار المكاني، في ما يمكن تسميته بـ **مؤشر دمشق الحضري المركّب (DUCI)** الذي يجمع بين التحليل الطيفي والتحليل التخطيطي لدعم القرارات المستقبلية في مجال التخطيط الحضري المستدام.

حيث يتبيّن من هذا التحليل المقارن أن دراسة مشهد تقدّم الأساس العلمي الكمي لمتابعة التحوّلات البيئية الحضرية، بينما تُقدّم دراسة إيطاليا الهيكل المؤسسي لاتخاذ القرارات المكانية، وأن الجمع بينهما هو الخيار الأمثل لتطوير نموذج سوريّ متكامل يعتمد على مؤشرات مكانية قابلة للقياس، وأدوات قرار قادرة على التكيّف مع الواقع السوري المركّب.
وبالتالي، فإن القيمة الحقيقية لهاتين الدراستين لا تكمن في تطبيق نتائجهما كما هي، بل في تكييف منهجيتهما بما يتناسب مع خصوصية دمشق، لتتحول من مجرد مدينة متأثرة بالتحضّر العشوائي إلى نموذج يمكن رصده وإدارته بفعالية علمية وتخطيطية في آنٍ واحد.

الباب الثاني: الإطار التطبيقي

الفصل الرابع : أداة التحليل الزماني المكاني

التمهيد: من الإطار النظري إلى التطبيق العملي

بعد استعراض الإطار النظري والتجارب العالمية السابقة، ولا سيّما دراستي **مدينة مشهد في إيران والتجربة الإيطالية**، اللتين مثّلتا نموذجين متكاملين في توظيف المؤشرات البيئية والعمرانية في التحليل الحضري، تأتي هذه المرحلة من البحث لتقدّم التطبيق العملي المحلي في **مدينة دمشق** من خلال بناء أداة تحليلية وتخطيطية متكاملة هي **نظام دمشق للمعلومات والتجديد الحضري.(DURIS)**

يُشكّل هذا النظام نتيجة مباشرة للتكامل بين المعرفة الأكاديمية المستخلصة من الدراسات السابقة والخبرة التقنية في استخدام أدوات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، وهو يهدف إلى **تحويل المؤشرات النظرية إلى أداة عملية لدعم القرار الحضري** في بيئة سورية تواجه تحديات بيئية، عمرانية، ومناخية متزايدة.

تمثل مدينة دمشق حالة مثالية لتطبيق هذا النموذج، نظرًا لتنوع أنماط استخدامات الأرض فيها، ووجود مناطق ذات ضـغط عمراني مرتفع مقابل مناطق ذات تدهور بيئي واضـح. ومن هنا كان من الضـروري تطوير أداة قادرة على قياس التحولات المكانية والزمانية ضـمن المدينة بدقة علمية عالية، بما يتيح تقييم الواقع الحالي واسـتشـراف الأولويات المستقبلية للتجديد الحضري.

وبهذا الانتقال من الفصـول النظرية إلى هذا الفصـل التطبيقي، يتحول البحث من **مرحلة تحليل المؤشـرات** إلى **مرحلة بنـاء المنهجيـة العمليـة** التي تجمع بين أدوات **التحليل المكـاني الزمـاني (Spatio-temporal analysis)** ونظـام **دعم القرار الحضـري(Urban Decision Support System)** ، بما يتناسـب مع خصـوصـية مدينة دمشـق ومعطياتها المناخية والجغرافية.

4.1 المقدمة العامة للفصل

تواجه مدينة دمشق اليوم تحديات حضرية وبيئية مركّبة ناتجة عن تراكمات عمرانية سريعة وغير متوازنة، وظروف بيئية متغيرة بفعل التحولات المناخية. في ظل هذه التحديات، برزت الحاجة إلى أدوات تحليل كمية متقدمة قادرة على رصد التغيرات المكانية والزمانية بدقة، وتقديم مخرجات قابلة للاستخدام في عملية اتخاذ القرار الحضري.

انطلاقًا من هذه الحاجة، تم تطوير نظام **DURIS**

(Damascus Urban Renewal and Information System) ليكون أداة محلية مخصـصـة لتحليل البيئة الحضرية في دمشق باستخدام بيانات الأقمار الصناعية ومنصة **.(Google Earth Engine (GEE**صُمّم النظام ليقوم بعمليات تحليل ومقارنة زمنية بين فترتين محددتين وذلك بهدف تقييم التحولات التي طرأت على الغطاء النباتي، الكثافة العمرانية، والحرارة السطحية في المدينة خلال فترة زمنية تمتد لأربعة عشر عامًا.

سوف يتم اختيار التاريخين بدقة بحيث يكونا واقعين ضمن **الفصل الصيفي**، حيث تكون نسبة الغيوم في حدّها الأدنى، ما يضـمن وضـوح المشـاهد الفضـائية ودقتها الإشـعاعية، ويُقلل من التشـويش الناتج عن الغطاء السـحابي أو الرطوبة الجوية، وهي عوامل قد تؤثر سلبًا على الحسابات الطيفية للمؤشرات.

يهدف هذا الفصل إلى **شرح البنية النظرية والتقنية للنظامDURIS** ، بما في ذلك منهجية عمله، المؤشرات المعتمدة فيه، آليات التحليل الزماني والمكاني، وطريقة عرض النتائج على الخريطة التفاعلية. كما يسـعى إلى توضـيح كيف تُترجم نتائج الأداة إلى **قرارات مكانيـة ذات أولويـة**، يمكن من خلالها تحديد مناطق التحسـن أو التدهور في البيئة الحضرية الدمشقية، وصولًا إلى صياغة أساس علمي لاقتراح تدخلات حضرية مستقبلية.

وتنبع أهمية هذا النظام من كونه يمثل تجربة سـورية نوعية في **توطين أدوات التحليل الحضـري البيئي**، إذ يجمع بين التجارب الدولية الناجحة والمنهج المحلي المبني على الواقع السـوري. كما أنه يسـعى لتأسـيس بنية تحليلية يمكن لاحقًا تطويرها لتخدم مدنًا سورية أخرى في سياق إعادة الإعمار والتخطيط المستدام.

4.2 الأسس النظرية لبناء نظام التحليل الزمكاني

يستند بناء نظام **DURIS** إلى مجموعة من المبادئ النظرية والمفاهيم الأكاديمية التي تم تطويرها خلال العقود الأخيرة في مجالات **التحليل المكاني الزماني**، و**الاستشعار عن بعد**، و**نظم دعم القرار الحضري (Urban Decision Support Systems)**.
يهدف هذا القسم إلى توضيح الخلفية العلمية والمنهجية التي بُني عليها النظام، مع التركيز على العلاقات المتبادلة بين المؤشرات البيئية والعمرانية، وكيفية دمجها ضمن إطار واحد قادر على توصيف وتحليل التغيرات الحضرية في مدينة دمشق.

4.2.1 الخلفية المفاهيمية للنظام

أصبح التخطيط الحضري المعاصر يعتمد على تحليل بيانات مكانية متزايدة التعقيد، إذ لم تعد الصور الجوية أو الإحصاءات السكانية كافية لتكوين صورة دقيقة عن التحولات الحضرية. ومن هنا برزت أهمية استخدام **البيانات الزمانية المكانية** المستمدة من الأقمار الصناعية، والتي تتيح تتبع التطور الحضري والبيئي عبر الزمن وبدقة مكانية متجانسة.

تتجلى الفكرة الجوهرية وراء نظام **DURIS** في ربط تلك البيانات الطيفية بالمؤشرات الكمية التي تعكس ديناميكيات المدينة، مثل الغطاء النباتي(NDVI) ، والكثافة العمرانية(NDBI) ، ودرجة حرارة السطح(LST) ، بحيث يصبح بالإمكان تحليل المشهد الحضري ليس فقط من حيث المساحة أو الشكل، بل من حيث **الوظيفة والتغير الزمني** أيضًا.

ويعتمد النظام على مفهوم **التحليل المؤتمت** الذي يقلل الحاجة للتدخل البشري في تفسير الصور الفضائية، عبر خوارزميات مبرمجة تقوم بعمليات المعالجة، والحساب، والمقارنة الزمنية بشكل ديناميكي. وبذلك، يصبح التحليل أكثر موضوعية، ويستند إلى معايير كمية قابلة للتكرار في فترات لاحقة.

إن بناء نظام مثل DURIS يأتي في إطار ما يُعرف بـــ **التحول الرقمي في التخطيط الحضري**، وهو اتجاه عالمي يسعى إلى استبدال أدوات التقييم الوصفي بأدوات كمية مدعومة بالبيانات الضخمة (Big Data) ونظم المعلومات الجغرافية. وتكمن خصوصيته في **تكييف هذه المنهجيات الرقمية مع السياق المحلي السوري**، الذي يتميز بندرة البيانات الميدانية وغياب أنظمة الرصد الحضرية المستمرة.

وبذلك، يمثل النظام خطوة أساسية في إنشاء قاعدة معرفية محلية يمكن الاعتماد عليها مستقبلاً في عمليات الرصد، التخطيط، وإدارة التحول الحضري المستدام في دمشق.

4.2.2التأصيل العلمي لتصميم DURIS

تم تصميم النظام استنادًا إلى التأصيل العلمي الذي يجمع بين المنهج البيئي والمنهج المكاني، عبر ثلاث مراحل رئيسية مترابطة:

أولاً: المرحلة التحليلية البيئية

تأثرت هذه المرحلة بمنهج دراسة مدينة **مشهد الإيرانية** التي ركّزت على تحليل مؤشرات الغطاء النباتي والحرارة السطحية في بيئة جافة وشبه جافة مشابهة لدمشق. اعتمدت هذه التجربة على مؤشرات الطيف النباتي (NDVI) والحراري (LST) لتقييم التدهور البيئي، وقد أظهرت قدرة عالية على تحديد مناطق التغير بدقة زمنية متوسطة (أكثر من عشر سنوات)، وهو ما جعلها مرجعاً علمياً مهماً عند بناء المنهج التحليلي في **DURIS**.

ثانياً: المرحلة التركيبية المركّبة

استفادت من التجربة **الإيرانية** في بناء المؤشر المركّب الذي يجمع بين مؤشرات متعددة(NDVI, NDBI, LST) ، ويُستخدم لتكوين خريطة شاملة تصف الوضع الحضري البيئي في فترة زمنية محددة. وقد تم تكييف هذا المفهوم في نظام **DURIS**من خلال دمج ثلاثة مؤشرات أساسية هي **NDVI، NDBI، LST** في تحليل واحد، يُتيح قراءة العلاقة بين التحضر والتدهور البيئي في مدينة دمشق.

ثالثاً: المرحلة التطبيقية المحلية

تمثل جوهر النظام المقترح، حيث تم تطوير منهجية تحليلية مبرمجة بلغة **JavaScript**ضمن منصة **Google Earth Engine**، بحيث يقوم النظام بمعالجة صور الأقمار الصناعية لفترتين زمنيتين محددتين (2011/08/15 و2025/08/15)، ثم يُنتج خرائط مقارنة للمؤشرات الرئيسية تُظهر اتجاهات التحسن أو التدهور.

ويقوم النظام بعد ذلك بدمج نتائج المؤشرات الثلاثة في طبقة تحليلية واحدة يمكن من خلالها تحديد **مناطق الأولوية الحضرية**، سواء كانت مناطق تحتاج إلى تدخل بيئي (زيادة المساحات الخضراء)، أو تدخل عمراني (ضبط التوسع غير المنظم).

إن القيمة الأكاديمية لهذا التصميم تكمن في **تحويل النموذج النظري العالمي إلى تطبيق محلي عملي**، يأخذ في الاعتبار الخصائص المناخية لمدينة دمشق، وطبيعة نسيجها العمراني الكثيف، وحدود البيانات المتاحة لها.

يُظهر هذا القسم أن بناء **DURIS** لم يكن عملاً تقنياً فقط، بل نتيجة منهجية علمية متكاملة استندت إلى فهم نظري دقيق للعلاقة بين العوامل البيئية والعمرانية، وإلى تكييف الأدوات الرقمية بما يتوافق مع الواقع السوري. فهو يشكل **جسرًا بين المعرفة الأكاديمية والتطبيق العملي**، وبين التجارب الدولية والسياق المحلي، وهو ما يُبرر اعتباره **أحد أول النماذج السورية في التحليل الزماني المكاني باستخدام البيانات الفضائية**.

4.3 الإطار المنهجي للنظام

يستند النظام المحلي **DURIS** إلى منهجية تحليلية متكاملة تجمع بين **البيانات الفضائية، والمنطق التحليلي المكاني الزماني، والمعالجة المؤتمتة** عبر منصة **Google Earth Engine (GEE)**.

يُعَد هذا الإطار المنهجي الركيزة الأساسية التي تحدد نوع البيانات المستخدمة، وطبيعة المعالجات المسبقة، وآليات المقارنة المكانية والزمانية التي تم توظيفها لتحقيق أهداف النظام في تحليل واقع مدينة دمشق بين عامي **2011** و**2025**.

4.3.1 مصادر البيانات الفضائية

تم الاعتماد في بناء النظام على بيانات الأقمار الصناعية من عائلة **Landsat** التابعة لوكالة الفضاء الأمريكية (NASA)وهي من أكثر السلاسل الزمنية المتاحة استقرارًا وموثوقية على المستوى العالمي. تم استخدام المشاهد الملتقطة من الأقمار التالية:

- **Landsat 5 TM** للفترة الزمنية الأولى.(2011)
- **Landsat 8 OLI/TIRS** للفترة الزمنية الثانية.(2025)

وقد تم اختيار هذه السلسلة تحديدًا لأنها توفر توازنًا مثاليًا بين **الدقة المكانية (30 مترًا)** و**التغطية الزمنية المستمرة**، ما يجعلها مناسبة لتحليل التغيرات الحضرية والبيئية على مستوى المدن.

اعتمدت البيانات على القنوات الطيفية التالية:

المؤشر	القنوات المستخدمة	الوظيفة
NDVI	القناة الحمراء (RED) والقريبة من تحت الحمراء(NIR)	قياس الغطاء النباتي
NDBI	القناة تحت الحمراء القريبة (NIR) وتحت الحمراء القصوى(SWIR)	قياس الكثافة العمرانية
LST	القناة الحرارية(TIR)	تحليل حرارة السطح(UHI)

جدول 30: القنوات الطيفية المولدة لبيانات المؤشرات المدروسة

تم استخراج الصور باستخدام واجهات برمجة تطبيقات **Google Earth Engine API**، التي تتيح الوصول المباشر إلى أرشيف صور الأقمار الصناعية وإجراء عمليات المعالجة في بيئة حوسبة سحابية عالية الأداء.

معايير اختيار الصور

لضمان جودة التحليل وموثوقية النتائج، تم تطبيق مجموعة من المعايير أثناء اختيار المشاهد الفضائية:

1. **أن تكون الصورة ملتقطة في فترة الصيف (شهر آب).**
2. **أن لا تتجاوز نسبة الغيوم 10%من إجمالي مساحة المشهد.**
3. **أن تغطي الصورة كامل الحدود الإدارية لمدينة دمشق دون فراغات.**
4. **أن تكون مصححة إشعاعياً وجغرافيًا.(Level 2 Surface Reflectance)**

بعد اختيار الصور الأنسب، تم تنفيذ مجموعة من العمليات التحضيرية (Preprocessing) وهي:

- **تصحيح الانعكاس السطحي** باستخدام المعاملات المرفقة من.NASA
- **إزالة الغيوم والظلال** من خلال قناع الجودة.QA_PIXEL
- **دمج الصور الفضائية المتعددة** ضمن خريطة واحدة عالية الجودة باستخدام خوارزمية **Quality Mosaic**التي تختار البكسلات ذات القيم الأعلى جودةً (الأقل غيمًا والأكثر وضوحًا).

تسمح هذه العملية بإنشاء مشهد سنوي مركّب يمثل بدقة الحالة البيئية للمدينة في التاريخ المحدد

4.4 المنهجية التحليلية للمنصة المكانية ونظام دعم القرار (Spatial Dashboard & SDSS)

4.4.1 المقدمة

تعتمد هذه الدراسة على بناء إطار تحليلي مكاني متكامل يهدف إلى دعم عملية اتخاذ القرار في سياق **إعادة تأهيل المناطق الحضرية المتدهورة بيئياً في مدينة دمشق**، من خلال دمج بيانات الاستشعار عن بُعد (RS) مع نظم المعلومات الجغرافية (GIS) ضمن نظام دعم قرار مكاني.(SDSS) يوضح الشكل (____) البنية المفاهيمية للمنصة المكانية(Spatial Dashboard) ، والتي تمثل تسلسلاً منهجياً يبدأ من **جمع البيانات الفضائية** وينتهي بعملية **اتخاذ القرار وتحديد الأولويات**، مروراً بمراحل التحليل الكمي والمكاني وبناء المؤشرات المركبة.

4.4.2 المرحلة الأولى: مدخلات البيانات الفضائية

تبدأ العملية بجمع البيانات من مصادر متعددة تمثل مدخلات النظام، وتشمل:

- **بيانات الأقمار الصناعية** مثل *Sentinel-2*و*Landsat 8–9*، والتي توفر معلومات طيفية عالية الجودة عن الغطاء النباتي والحراري والعمراني.
- **الصور الفضائية الخام** التي تُستخدم في التحليل البصري لاستخراج مؤشرات التغير المكاني.
- **المؤشرات البيئية (Environmental Indicators)**التي تشمل مؤشرات الغطاء النباتي(NDVI) ، مؤشر الكثافة العمرانية(NDBI) ، ومؤشر درجة حرارة سطح الأرض.(LST)

تُدمج هذه البيانات داخل بيئة **Google Earth Engine (GEE)**باستخدام لغة **JavaScript**لمعالجة الصور وإجراء التصحيحات المكانية والإشعاعية، ثم تُنقل النتائج إلى برامج التحليل المكاني مثل **ArcGIS**لإتمام التحليل الكمي والمكاني.تُعتبر هذه المرحلة بمثابة تأسيس **القاعدة المعرفية الرقمية** اللازمة للتحليل الزمني والمكاني، والتي تتيح تتبع التغيرات البيئية والعمرانية في المدينة بين عامي **2011و2025**

4.4.3 المرحلة الثانية: التحليل الزمني والمكاني

تُمثّل هذه المرحلة جوهر المنهجية، حيث يتم فيها تنفيذ مجموعة من التحليلات المتكاملة تشمل:

- **التحليل الزمني :(Temporal Analysis)** لرصد التطور أو التدهور البيئي عبر الزمن باستخدام مؤشرات NDVI و LSTو.NDBI
- **التحليل المكاني :(Spatial Analysis)** لتحديد الأنماط المكانية لتوزيع المؤشرات داخل أحياء دمشق.
- **التحليل الكمي :(Quantitative Analysis)** الذي يسمح بتحديد القيم الرقمية الدقيقة لكل مؤشر ومقارنتها بين المناطق.
- **طبقات التفاضل :(Differentiation Layers)** التي تُظهر المناطق التي شهدت تغيراً سلبياً أو إيجابياً بين الفترتين الزمنيتين.

يُستفاد من نتائج هذه التحليلات في تحديد **المناطق الأكثر تدهوراً بيئياً وعمرانياً**، وهي الخطوة التمهيدية لتطبيق مؤشر **أولوية التأهيل الحضري(RPI)** ، الذي يُبنى على قياس نسب التغير في مؤشرات الأراضي بين الفترتين.

4.4.4 المرحلة الثالثة: بناء المؤشرات المركبة والترشيح

تطبيع القيم وتحويلها إلى مقياس موحد(Normalization)

بهدف تحقيق المقارنة العادلة بين المؤشرات المختلفة، تُطبّق عملية **تطبيع رياضية للقيم المستخرجة** وفق الصيغ التي طُوّرت في الفصل الثالث من البحث.
تسمح هذه العملية بتحويل القيم إلى **نطاق موحد من 0 إلى 1**، بحيث تعكس القيمة العليا أعلى مستويات التدهور أو الأهمية البيئية.يتيح ذلك دمج المؤشرات المختلفة ضمن نظام حسابي موحد، يمهّد لإنتاج **المؤشر المركّب النهائي للأولوية.RPI**

بعد استخراج المؤشرات الكمية، تأتي مرحلة **الترشيح(Filtering)** ، حيث تُدمج القيم المختلفة في إطار موحّد باستخدام أدوات التحليل المكاني في **ArcGIS**، ويُطبّق من خلالها منهج **التحليل متعدد المعايير (Multi-Criteria Evaluation - MCE)**.

تعتمد هذه العملية على إسناد أوزان نسبية لكل مؤشر حسب أهميته في عملية اتخاذ القرار البيئي والعمراني، وذلك عبر أساليب مثل **الدمج الخطي الموزون (WLC)** أو **عملية التحليل الهرمي.(AHP)** ينتج عن هذه الخطوة مؤشر مركب يعبر عن الحالة العامة لكل منطقة ضمن المدينة، ما يمهد لتحديد ترتيب الأولويات في التأهيل.

4.4.5 المرحلة الرابعة: تحديد الأولويات واتخاذ القرار

تمثل هذه المرحلة المخرج النهائي للنظام، إذ تُحوّل النتائج الرقمية إلى **خرائط مكانية صريحة (Spatially Explicit Maps)** تُظهر مناطق الخطر أو التدهور البيئي وفق مستويات محددة من الأولوية.

يتم تصـنيف المناطق إلى فئات (عالية – متوسـطة – منخفضــة الأولوية) بناءً على **القيم الموزونة للمؤشـر المركب،** وبذلك تتحول البيانات إلى أداة دعم بصـــري وعملي لصـــنّاع القرار، تمكنهم من توجيه الموارد نحو المناطق الأكثر تضرراً أو حساسية بيئية.

في حالة دمشـــق، حيث ترتفع الكثافة الســـكانية وتتقاطع المناطق العمرانية مع بؤر تلوث حراري ونقص في الغطاء النباتي، تُعد هذه الخرائط وسيلة فعالة لرسم سياسة تأهيل بيئي حضـري تستند إلى المعرفة العلمية لا إلى الانطباعات الميدانية.

4.4.6 القيمة الأكاديمية والمنهجية للنموذج

يُمكن اعتبار هذا النموذج المقترح مثالاً على **التكامل بين البيانات الفضـــائية والتحليل الكمي المكاني** في خدمة التخطيط الحضـــري المســتدام .فهو لا يعتمد على البيانات الميدانية فحســب، بل يوظف الإمكانيات الهائلة لمنصـــات التحليل الســـحابية (Cloud-Based Platforms) لتقديم رؤية ديناميكية لتغير البيئة الحضـــرية عبر الزمن. ويمتاز النموذج بما يلي:

1. **الدمج بين الزمن والمكان** في تحليل المؤشرات، مما يتيح فهم دينامية التدهور البيئي بشكل متكامل.
2. **الاعتماد على مصـــادر بيانات مفتوحة) مثل Sentinel و (Landsat**مما يعزز إمكانية إعادة تطبيق النموذج في مدن أخرى.
3. **القابلية للتحليل متعدد المستويات** من مستوى المدينة إلى مستوى الحي أو الكتلة العمرانية.
4. **التوجه نحو الاستدامة البيئية** من خلال التركيز على مؤشرات الغطاء النباتي والحرارة السطحية والكثافة العمرانية.

5. الفصل الخامس:
تطوير مؤشر أولوية إعادة التأهيل (RPI) ضمن بيئة اتخاذ القرار المكاني المتكامل

مقدمة:

يعد التخطيط الحضري الحديث عملية متعددة الأبعاد تجمع بين البيئة، الاقتصاد، والمجتمع، ويواجه تحديات كبيرة في المدن المتقدمة والنامية على حد سواء. وفي سياق المدن التي تعاني من ضغوط بيئية وعمرانية، مثل العاصمة دمشق، يصبح اتخاذ القرار التخطيطي عملية معقدة تتطلب أدوات علمية دقيقة وموضوعية لدعم السياسات التخطيطية الفعّالة. ومن هنا تظهر الحاجة إلى تطوير مؤشرات متكاملة **تعكس واقع المناطق وتتيح للمخططين تقييم أولويات التدخل بطريقة علمية وممنهجة.**

مؤشر أولوية إعادة التأهيل (RPI) يمثل أحد الحلول المنهجية لهذه التحديات، إذ يعمل كجسر بين التحليل البيئي المكاني الناتج عن الاستشعار عن بعد ومرحلة اتخاذ القرار التخطيطي. يهدف هذا المؤشر إلى تحويل الخرائط التحليلية المعقدة، والتي تنتجها أدوات الاستشعار عن بعد مثل) NDVI مؤشر الغطاء النباتي(، NDBI(مؤشر البناء)، و LST(درجة حرارة السطح)، إلى أداة دعم قرار موحدة وشفافة يمكن الاعتماد عليها لتحديد أي المناطق تحتاج لتدخلات عاجلة لإعادة التأهيل أو التطوير.

5.1 أهمية الفصل ضمن الأطروحة

هذا الفصل يمثل **المساهمة المنهجية الأساسية للأطروحة**، حيث يقدّم نموذجاً متكاملاً لتقييم الأولويات باستخدام **التحليل متعدد المعايير المكاني .(Spatial Multi-Criteria Evaluation - MCE)** تكمن أهميته في عدة نقاط رئيسية:

1. **التقليل من الذاتية في اتخاذ القرار:**
غالباً ما يتم اتخاذ القرارات العمرانية وفقاً لخبرة المخطط أو تفضيلات شخصية، مما يؤدي إلى نتائج غير متسقة. يوفر مؤشر RPI عملية منظمة يمكن تتبعها، بحيث يصبح القرار أكثر علمية وشفافية.

2. **دمج مؤشرات متعددة في أداة واحدة:**
المدن الحضرية معقدة ومتغيرة باستمرار، وتتأثر بمجموعة واسعة من العوامل مثل فقدان الغطاء النباتي، ارتفاع درجات الحرارة، وتوسع البيئة المبنية. يسمح المؤشر بدمج هذه المعايير المختلفة في نموذج واحد، مع الأخذ بعين الاعتبار الأهمية النسبية لكل معيار وفقاً للسيناريو التخطيطي المحدد.

3. **إمكانية التخصيص والمرونة:**
يتيح RPI للمخططين إنشاء سيناريوهات متعددة تعكس أولويات مختلفة، مثل التركيز على تعزيز البنية التحتية الخضراء، أو مواجهة ارتفاع درجات الحرارة، أو تحقيق توازن بين العوامل البيئية والعمرانية. يمكن تعديل **أوزان كل معيار** لتوليد خرائط أولوية مخصصة حسب السياسات أو الأهداف الاستراتيجية للمدينة.

4. **تعزيز التواصل والمشاركة المجتمعية:**
يمكن استخدام الخرائط الناتجة من RPI كأداة توضيحية لشرح الأسباب المنهجية وراء تحديد الأولويات للمجتمع المحلي وأصحاب المصلحة، مما يعزز الشفافية والمشاركة المجتمعية في عملية التخطيط.
5. **إمكانية التوسع المستقبلي:**
صُمم المؤشر ليكون قابلاً للتطوير، بحيث يمكن دمج معايير إضافية مستقبلاً، مثل المؤشرات الاجتماعية (كالكثافة السكانية أو الوصول للخدمات)، والمؤشرات الاقتصادية، أو بيانات حديثة من نظم المعلومات المفتوحة) مثل OpenStreetMap وبيانات الأقمار الصناعية فائقة الدقة.

حيث يتناول هذا الفصل عدداً من الأهداف البحثية والتطبيقية، يمكن تلخيصها كما يلي:

- تقديم **تعريف دقيق وشامل لمؤشر RPI** ووضع أطره النظرية والتطبيقية.
- توضيح **مكونات المؤشر** من معايير، درجات موحدة، وأوزان، وعرض الأساس المنطقي للربط بين هذه العناصر.
- شرح **آلية عمل المؤشر خطوة بخطوة** من جمع البيانات الأولية حتى الحصول على الدرجة النهائية لكل قطعة أرض.
- تصميم **سيناريوهات مختلفة لتطبيق المؤشر** بحسب أولويات التخطيط العمراني والبيئي.
- توضيح **عمليات المعادلة (Normalization)** وكيفية توحيد القيم المختلفة للمؤشرات (NDVI, LST, NDBI)لتصبح قابلة للمقارنة.
- عرض **أمثلة تطبيقية على مناطق متعددة**، مع الجداول والرسوم البيانية التوضيحية لكل مرحلة.
- مناقشة **التحقق الميداني ومصداقية النتائج** وكيفية دمج النتائج مع التخطيط الحضري الفعلي.
- تقديم **إمكانيات التوسع المستقبلي**، ودمج المعايير الاجتماعية والاقتصادية، وتوظيف تقنيات متقدمة لتحديد الأوزان مثل.AHP
- شرح **التطبيق العملي في بيئة نظم المعلومات الجغرافية GIS** باستخدام أدوات مثلArcGIS Pro ، Raster Calculator، و.Weighted Overlay

يعتبر هذا الفصل العمود الفقري للأطروحة، **لأنه يحول البيانات المعقدة المستخرجة من الاستشعار عن بعد إلى أداة دعم قرار علمية وموضوعية** يمكن للمخططين والباحثين استخدامها في تقييم أولويات إعادة التأهيل الحضري. ويعد مؤشر RPI أداة مرنة يمكن تعديلها بحسب احتياجات السياسات المختلفة، مما يجعلها مناسبة تماماً للسياقات المعقدة والمتغيرة للمدن العربية، وخاصة تلك التي تواجه تحديات بيئية وعمرانية متشابكة مثل دمشق.

5.2 مكونات مؤشر أولوية إعادة التأهيل (RPI)

يشكل **مؤشر أولوية إعادة التأهيل (Rehabilitation Priority Index – RPI)** أداة أساسية لتحويل البيانات التحليلية المكانية والزمنية إلى أداة عملية لدعم القرار التخطيطي. يعتمد هذا المؤشر على دمج عدة معايير رقمية في معادلة واحدة تتيح ترتيب أولويات التدخل في المناطق الحضرية بشكل موضوعي وشفاف.

5.2.1 المعايير المستخدمة

تشكل **المعايير (Criteria)** البنية الأساسية للمؤشر، إذ تمثل المتغيرات الكمية التي تعكس أبعاد التدهور الحضري المختلفة. في هذا البحث، يتم استخدام خرائط التدهور الناتجة عن التحليل المكاني للبيانات المستمدة من الاستشعار عن بعد، حيث يمثل كل خريطة معيارًا مستقلًا، ويعبر كل بكسل فيها عن أداء المنطقة وفقًا لذلك المعيار. المعايير الأساسية المستخدمة هي:

1. **تدهور الغطاء النباتي :(Vegetation Degradation)** يُقاس عادةً بتغير مؤشرات الغطاء النباتي مثل NDVIو .SAVIيمثل هذا المؤشر أهمية كبيرة في قياس فقدان المساحات الخضراء الحضرية، وارتباطها بجودة الحياة والتخطيط البيئي.
2. **التدهور الحراري الحضري :(Urban Heat Deterioration)** يُقاس من خلال تغير درجات حرارة سطح الأرض(LST) ، ويعكس تأثير الجزر الحرارية على المناطق الحضرية، ما يسهم في تقييم الاستدامة المناخية للمناطق المختلفة.
3. **التوسع العمراني :(Urban Expansion)** يُقاس بمؤشر NDBI أو مؤشرات مشابهة، ويعكس معدل التوسع في البيئة المبنية وزيادة الضغط على الموارد والمساحات الخضراء.

5.2.2 الدرجات الموحدة للمعايير

نظرًا لاختلاف وحدات قياس المعايير) مثلاً NDVI :من 0 إلى 1 و LSTبالدرجة المئوية(، من الضروري تحويلها إلى **مقياس موحد** يمكن مقارنته بين المعايير المختلفة. تسمح هذه الخطوة بتحويل كل معيار إلى **درجة موحدة** تتراوح بين 0 و1، حيث تمثل القيمة 1 أعلى أولوية للتدخل (أي الحالة الأسوأ)، بينما تمثل القيمة 0 أدنى أولوية.

5.2.2.1 معادلة تحويلNDVI

لتحويل التغير في NDVI إلى درجة موحدة

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

:

ولغرض توحيد اتجاه الأولوية، يتم قلب بعض المؤشرات بحيث يصبح الاتجاه موحّدًا = **1 :أعلى أولوية (أسوأ حالة)** و = **0أدنى أولوية (أفضل حالة)** .على سبيل المثال، يُعتبر ارتفاع قيمة NDVI دلالة إيجابية (غطاء نباتي أفضل)، لذا يتم عكسها باستخدام :حيث يتم أولاً تحويل قيمة NDVI الخام إلى مقياس من 0 إلى 1، ثم عكسها لضمان أن المناطق التي شهدت فقدانًا كبيرًا للغطاء النباتي تحصل على أعلى درجة أولوية.

$$NDVI_{norm_inv} = 1 - NDVI_{norm}$$

5.2.2.2 معادلة تحويلLST

لحساب درجة التدهور الحراري لكل قطعة أرض:

$$LST_{prio} = \frac{LST_{raw} - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}}$$

تمثل هذه المعادلة الطريقة القياسية لتحويل درجات الحرارة إلى مقياس موحد من 0 إلى 1. المناطق التي شهدت أكبر زيادة في درجات الحرارة تحصل على أعلى أولوية.

5.2.2.3 معادلة تحويلNDBI

بالنسبة لمؤشر التوسع العمراني، يتم توحيد القيم أيضًا:

$$NDBI_{prio} = \frac{NDBI_{raw} - NDBI_{min}}{NDBI_{max} - NDBI_{min}}$$

- يضمن هذا التوحيد أن المناطق الأكثر توسعًا عمرانيًا (والتي قد تكون بحاجة لتدخل لتخفيف الضغط على الموارد) تحصل على درجات أعلى في المؤشر النهائي.

5.2.3 الأوزان المخصصة لكل معيار

تعكس **الأوزان (Weights)** الأهمية النسبية لكل معيار في السيناريو التخطيطي المختار. يمكن تعديل الأوزان لتوليد سيناريوهات مختلفة وفقًا لأولويات المدينة أو أهداف السياسات البيئية:

- مجموع الأوزان لجميع المعايير يجب أن يكون 1 أو 100%.
- يمثل الوزن السياسة التخطيطية أو الأهمية الاستراتيجية للمعيار.
- مثال توضيحي للسيناريو الخاص بالبنية التحتية الخضراء:

المعيار	الوزن(w)
NDVI	0.6
LST	0.2
NDBI	0.2

جدول 31: مثال توضيحي للسيناريو الخاص بالبنية التحتية الخضراء

في هذا السيناريو، يعطي المؤشر أولوية أكبر لفقدان الغطاء النباتي مقارنة بالمعايير الأخرى.

5.2.4 حساب درجة الأولوية النهائية

بعد توحيد المعايير وتعيين الأوزان، يتم تجميعها في **معادلة التراكب الموزون** للحصـــول على درجة الأولوية لكل منطقة:

$$RPI = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot X_{prio,i}$$

$$(_{NDBI,j}n \times _{NDBI}w) + (_{LST,j}n \times _{LST}w) + (_{NDVI,j}n \times _{NDVI}w) = _{j}RPI$$

$_{j}RPI$ تمثل الدرجة النهائية للمنطقة j.
المناطق التي تحصل على أعلى قيمة RPI تُعتبر ذات أولوية قصوى للتدخل.

5.3 أهمية مؤشرRPI

يتيح مؤشر:RPI

1. **الموضوعية والشفافية :**تحويل القرار التخطيطي من عملية ذاتية إلى عملية علمية قابلة للتتبع والمراجعة.
2. **المرونة :**إمكانية تعديل الأوزان لتوليد سيناريوهات متعددة حسب أولويات المدينة.
3. **التعامل مع التعقيد :**دمج عدة معايير متضاربة في إطار واحد يسهل فهمه.
4. **التواصل والمشاركة :**يمكن استخدام الخرائط الناتجة لتعزيز المشاركة المجتمعية وشرح أساسيات القرار التخطيطي.

5.4 سيناريوهات استخدام مؤشر أولوية إعادة التأهيل(RPI)

يعكس هذا القسم المرونة التحليلية لمؤشرRPI ، حيث يمكن تخصيص الأولويات وفق أهداف التخطيط المختلفة، مما يســـمح بتوليد خرائط أولوية تدخل متعددة الســـيناريوهات لتوجيه صـــانعي القرار بشـــكل علمي وشـــفاف. تعتمد السيناريوهات على **تغيير أوزان المعايير** الرئيسيةNDVI) ، LST، (NDBIوفق التركيز المطلوب لكل هدف.

5.4.1 السيناريو الأول: البنية التحتية الخضراء(Green Infrastructure Priority)

يهدف هذا السيناريو إلى تعزيز الغطاء النباتي وزيادة المساحات الخضراء الحضرية، مع التركيز على الأراضي التي شهدت أكبر قدر من فقدان الغطاء النباتي

- **الأوزان المخصصة للمعايير**:

المعيار	الوزن(w)	المبرر
NDVI	0.60	يمثل الأولوية القصوى لتحديد الأراضي ذات فقدان الغطاء النباتي الكبير
LST	0.20	دعم خفض الحرارة بشكل ثانوي
NDBI	0.20	يأخذ بعين الاعتبار التوسع العمراني لكن بأهمية أقل

جدول 32: الأوزان المخصصة للمعايير ضمن السيناريو الأول

- **منطق السيناريو** :الأراضي التي تظهر انخفاضًا كبيرًا في NDVI تأخذ درجة RPI أعلى، مما يجعلها مناطق التدخل الأولوية لزيادة البنية التحتية الخضراء.
- **التطبيق العملي** :بعد توحيد القيم لكل معيار، يتم ضرب كل قيمة بالوزن المخصص لها، ثم جمع النتائج لإنتاج خريطة RPI النهائية.

5.4.2 السيناريو الثاني: الراحة الحرارية(Thermal Comfort)

هذا السيناريو يركز على تحسين **الراحة الحرارية في المناطق الحضرية** من خلال معالجة ظاهرة الجزر الحرارية، وبالتالي يتم إعطاء **الأولوية الكبرى لمؤشر.LST**

- **الأوزان المخصصة للمعايير**:

المعيار	الوزن(w)	المبرر
NDVI	0.20	تأثير فقدان الغطاء النباتي في الحرارة، لكنه أقل أهمية منLST
LST	0.60	يمثل الأولوية الرئيسية لتحديد المناطق الحارة جدًا
NDBI	0.20	يأخذ بعين الاعتبار تأثير التوسع العمراني على الحرارة

جدول 33: الأوزان المخصصة للمعايير ضمن السيناريو الثاني

- **منطق السيناريو** :الأراضي التي شهدت ارتفاعًا ملحوظًا في LST ستأخذ درجة RPI أعلى، لتوجيه التدخل نحو الحد من الحرارة عبر زراعة أشجار، إنشاء مسطحات مائية، أو مواد بناء عاكسة للحرارة.

- **التطبيق العملي** :بعد تصـــحيح وحدات المعايير وتحويلها إلى نطاق موحد، يتم ضـــرب كل معيار بالوزن المخصص له، ومن ثم جمع القيم لإنتاج خريطة أولوية التدخل الحراري.

5.4.3 السيناريو الثالث: النهج المتوازن(Balanced Approach)

يهدف هذا الســـيناريو إلى تحقيق توازن بين تعزيز البنية الخضـــراء، خفض درجات الحرارة، والتحكم في التوســـع العمراني.

- **الأوزان المخصصة للمعايير**:

المعيار	الوزن(w)	المبرر
NDVI	0.40	توازن بين تعزيز الغطاء النباتي وخفض الحرارة
LST	0.40	معالجة المناطق الحارة دون إهمال الأبعاد البيئية الأخرى
NDBI	0.20	التحكم في التوسع العمراني بشكل معتدل

جدول 34: الأوزان المخصصة للمعايير ضمن السيناريو الثالث

- **منطق الســـيناريو** :يُظهر هذا الســـيناريو المناطق التي تمثل الأولوية المتوســـطة لتدخل متكامل يجمع بين الأبعاد البيئية والمناخية.

5.4.4 مخرجات السيناريوهات

- **خرائط أولوية التدخل** :لكل سيناريو، يتم إنتاج خريطة تظهر المناطق حسبRPI ، مع تصنيفها إلى درجات (قصوى، عالية، متوسطة).
- **القدرة على المقارنة** :يمكن مقارنة النتائج بين الســـيناريوهات لمعرفة كيفية تغير الأولويات حســـب تركيز التخطيط.
- **دعم القرار التخطيطي** :يتيح هذا التقســـيم لصـــانعي القرار اختيار المناطق التي تحتاج إلى تدخل عاجل وفق الأهداف المحددة لكل سيناريو.

5.5 التحقق الميداني ومصداقية النتائج

يعتبر التحقق الميداني (**Ground Truthing**) خطوة مهمة لتعزيز مصـداقية اسـتخدام مؤشـر أولوية إعادة التأهيل (RPI)، ولكن في السياقات الحضرية المعقدة مثل سوريا، حيث تفتقر العديد من المدن إلى مسوحات دورية ومنتظمة، يصبح المؤشر أداة لا غنى عنها لدعم التخطيط العمراني واتخاذ القرارات الاستراتيجية.

5.5.1 أهمية المؤشر في السياق السوري

1. **سد الفجوة المعلوماتية** :في سوريا، غالبًا ما تكون البيانات الميدانية غير متوفرة أو متقطعة زمنياً بسبب الظروف الاقتصادية والسياسية. يوفر مؤشر RPI قدرة فريدة على تقدير أولويات التدخل دون الاعتماد الكامل على المسوحات الميدانية الدورية.
2. **تمكين التخطيط الاستباقي** :من خلال دمج بيانات الاستشعار عن بعد (NDVI, LST, NDBI) في المؤشر، يمكن تحديد المناطق التي تحتاج إلى تدخل عاجل قبل حدوث تدهور أكبر، مما يدعم التخطيط الوقائي والفعّال.
3. **دعم صنع القرار على نطاق وطني** :يسمح المؤشر للجهات الحكومية والمؤسسات التخطيطية بتحديد مناطق إعادة التأهيل الحيوية بكفاءة، حتى في غياب بيانات ميدانية حديثة أو متكاملة.

5.5.2 منهجية تعزيز مصداقية النتائج

نظرًا لقلة البيانات الميدانية، يركز البحث على تعزيز مصداقية المؤشر عبر الإجراءات التالية:

1. **اعتماد مصادر متعددة للتحقق الجزئي** :مثل الصور الفضائية عالية الدقة، الخرائط الطبوغرافية، وبيانات OpenStreetMapلتقليل الاعتماد على البيانات الميدانية الكاملة.
2. **مراجعة التحليلات التاريخية** :مقارنة نتائج RPI مع بيانات سابقة موجودة (إن وجدت) لتقييم الاتجاهات والأنماط الحضرية والتأكد من اتساق المؤشر مع الواقع المعروف.
3. **تصنيف مناطق الثقة** :إنشاء مستويات موثوقية مختلفة للمخرجات وفق مدى توافر البيانات لكل منطقة، بحيث يمكن للمخططين التركيز على المناطق ذات الثقة العالية أولاً.
4. **تحليل حساسيات الأوزان والمعايير** :من خلال إنشاء سيناريوهات مختلفة لتحديد مدى تأثير تغيير الأوزان على النتائج النهائية، مما يزيد من شفافية المؤشر ومصداقيته في سياقات غياب البيانات الكاملة.

5.5.3 الفوائد الاستراتيجية للنهج المعتمد

1. **مرونة عالية للتخطيط** :يمكن للمؤسسات السورية استخدام المؤشر لتوجيه الاستثمارات وإعادة التأهيل في المدن التي تعاني من نقص في البيانات الميدانية.
2. **تعزيز الكفاءة في اتخاذ القرار** :بتقديم خرائط أولويات دقيقة وموثوقة نسبيًا، يتيح المؤشر اتخاذ قرارات فعالة حول توزيع الموارد المحدودة.
3. **إمكانية التطوير المستقبلي** :يسمح المؤشر بإدماج البيانات الميدانية الجديدة كلما توفرت، مما يزيد من دقة النتائج تدريجيًا ويحول المؤشر إلى أداة مستمرة للتخطيط الحضري المستدام.

5.6 إمكانيات التوسع والتطوير المستقبلي

يمثل مؤشـــر أولوية إعادة التأهيل (RPI) أداة قوية لدعم اتخاذ القرار في التخطيط الحضـــري، ولكن قدرته الحقيقية تظهر عند النظر في إمكانيات توســـيعه وتطويره مســـتقبليًا. تهدف هذه الإمكانيات إلى زيادة دقة النموذج، وتعزيز مرونته في مواجهة التغيرات البيئية والاجتماعية والاقتصادية، وكذلك تحسين موثوقية النتائج في السياقات التي تفتقر إلى البيانات الميدانية المنتظمة، كما هو الحال في المدن السورية.

5.6.1 إضافة مؤشرات اجتماعية

1. **الوصـول إلى الخدمات والمرافق** :يمكن إدراج مؤشـرات تمثل القرب من المدارس، المسـتشـفيات، الحدائق العامة، والمراكز التجارية، لتقدير أهمية إعادة التأهيل بالنسبة للسكان.
2. **الكثافة السـكانية والتوزيع السـكاني** :دمج بيانات عدد السـكان وكثافتهم يسـاعد على تحديد المناطق الأكثر تأثيرًا في جودة حياة المواطنين، خاصة في الأحياء المكتظة حيث تكون الحاجة للتدخل أكبر.
3. **المشـــاركة المجتمعية** :إدراج مؤشـــرات تعكس المشـــاركة المجتمعية أو مســـتوى التفاعل المحلي يمكن أن يساعد في توجيه التخطيط ليكون أكثر شمولية واستدامة.

5.6.2 إضافة مؤشرات اقتصادية

1. **قيمة العقارات والأراضي** :إدراج مؤشرات تقيس تأثير إعادة التأهيل على أسعار الأراضـي والممتلكات، ما يساعد على تقدير الفوائد الاقتصادية للمشاريع الحضرية.
2. **التكلفة مقابل الفائدة** :**(Cost-Benefit Analysis)** يمكن تطوير نموذج يربط بين تكلفة التدخل وفوائد تحسين البيئة المبنية والغطاء النباتي وتقليل الحرارة.
3. **دعم الاقتصاد المحلي والزراعة الحضرية** :تضمين مؤشرات مثل استخدام الأراضي للزراعة الحضرية أو المشاريع الاقتصادية الصغيرة، لتعزيز الربط بين التنمية البيئية والاقتصادية.

5.6.3 استخدام تقنيات متقدمة لتحديد الأوزان

1. **عملية التحليل الهرمي** :**(AHP)** اسـتخدام AHP لإشـراك خبراء متعددين لتحديد الأوزان بشـكل أكثر منهجية ودقة، مما يزيد من شفافية المؤشر.
2. **التعلم الآلي والذكاء الاصـطناعي** :يمكن اسـتخدام تقنيات التعلم الآلي لتقدير أوزان المعايير تلقائيًا بناءً على بيانات تاريخية، أو للتنبؤ بأهمية كل معيار في المستقبل.
3. **تحليل الحساسية المتقدم** :فحص تأثير التغيرات في الأوزان والمعايير على النتائج النهائية لضمان استقرار المؤشر وموثوقيته في غياب البيانات الكاملة.

5.6.4 دمج البيانات الحديثة

1. **OpenStreetMapوالبيانات المكانية المفتوحة** :يمكن اسـتخدامها لتعويض نقص البيانات الحكومية أو الميدانية، خاصة في المدن السورية التي تفتقر لمسح حضري دوري.

2. **الصور الفضائية عالية الدقة والاستشعار المتعدد الأطياف** :تحسين دقة المعايير البيئية (NDVI, LST, NDBI)والتوسع في إدراج مؤشرات إضافية مستقبلية.
3. **الطائرات المسيرة (Drones) والبيانات السحابية** :تتيح جمع بيانات ميدانية محددة عند الحاجة، ودعم عمليات التحقق الميداني (Ground Truthing) بشكل أسرع وأكثر فعالية.

5.6.5الفوائد الاستراتيجية لتوسيع المؤشر

1. **مرونة تخطيطية عالية** :يصبح من الممكن إنشاء سيناريوهات متعددة تعكس أولويات بيئية، اجتماعية، واقتصادية مختلفة، مما يجعل RPI أداة ديناميكية قابلة للتخصيص.
2. **تعزيز استدامة القرار** :الربط بين المؤشرات البيئية والاجتماعية والاقتصادية يدعم اتخاذ قرارات أكثر شمولية وتحقيق توازن بين الأبعاد الثلاثة للتنمية المستدامة.
3. **استغلال الموارد المحدودة بكفاءة** :من خلال تحديد الأولويات بدقة أكبر، يمكن توجيه الموارد المالية والفنية نحو المناطق الأكثر حاجة للتدخل، وهو أمر بالغ الأهمية في السياق السوري.

5.7 التطبيق العملي في بيئة نظم المعلومات الجغرافية(GIS)

يهدف هذا القسم إلى تقديم دليل شامل لتطبيق مؤشر أولوية إعادة التأهيل (RPI) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية، مع التركيز على استخدام **ArcGIS Pro** و **QGIS**. يتم خلال هذه العملية تحويل البيانات الخام لكل معيار إلى خريطة نهائية تظهر درجات الأولوية لكل قطعة أرض.

5.7.1 تحضير البيانات المكانية

a) **تجهيز الخرائط:**
   a. NDVI/SAVI، LST، NDBIبصيغة.Raster
   b. التأكد من أن جميع الرسترات تستخدم نفس **نظام الإحداثيات** وحجم البكسل لتفادي أي أخطاء عند التراكب.

1. **تنظيف البيانات:**

a) إزالة القيم المفقودة أو غير الصالحة.
b) إجراء أي تعديل أولي على البيانات مثل تصحيح التشويش أو الضوضاء في الصور الفضائية.

5.7.2 توحيد قيم المعايير(Normalization)

- في:ArcGIS
  - استخدام أداة **Raster Calculator** لتحويل كل معيار إلى مقياس موحد من 0 إلى 1.
  - صياغة المعادلات لكل معيار:
    - NDVI: $_{normalized}NDVI - 1 = {}_{NDVI}m$
    - LST: $(_{min}LST - {}_{max}LST_{min})/(LST - {}_{raw}LST) = {}_{LST}n$
    - NDBI: تحويل إلى نفس المقياس الموحد.
- في:QGIS
  - استخدام أداة **Raster Calculator** أيضًا بنفس المعادلات لتوحيد القيم.

5.7.3 إدخال الأوزان لكل معيار

1. **تحديد السيناريو التخطيطي:**
   - سيناريو زيادة الغطاء النباتي: وزن NDVI أعلى.
   - سيناريو الراحة الحرارية: وزن LST الأعلى.
   - السيناريو المتوازن: توزيع متساوٍ بين المعايير.
2. **تطبيق الأوزان في:ArcGIS**
   - أداة **Weighted Overlay** أو **Weighted Sum**.
   - إدخال الرسترات الموحدة وإسناد الوزن لكل منها حسب السيناريو.

3. **تطبيق الأوزان في:QGIS**

- استخدام **Raster Calculator** أو **r.mapcalc** في GRASS GIS لتطبيق الصيغة:

$$(_{NDBI}m \times {}_{NDBI}w) + (_{LST}n \times {}_{LST}w) + (_{NDVI}m \times {}_{NDVI}w) = RPI$$

5.7.4 التراكب الموزون وحساب RPI النهائي

- كل بكسل في الخريطة النهائية يمثل قطعة الأرض.
- يتم جمع قيم كل معيار بعد ضربها بالأوزان للحصول على **RPI** النهائي.
- النتيجة هي خريطة رستارية واحدة تعرض درجة الأولوية لكل موقع.

5.7.5 تصنيف النتائج وعرض الخرائط

1. **تصنيف الخريطة في:ArcGIS**
   - استخدام أداة **Reclassify**لتقسيم RPI إلى فئات:
     - أولوية قصوى
     - أولوية عالية
     - أولوية متوسطة
     - أولوية منخفضة

2. **تصنيف الخريطة فيQGIS:**

a) استخدام أداة **Raster Layer Properties > Symbology > Graduated**لتطبيق الفئات.

3. **عرض النتائج:**

a) تمكين تفعيل أو إخفاء كل معيار لمقارنة تأثير الأوزان المختلفة.
b) إضافة خرائط القيم الأصلية بجانب الخريطة النهائية لعرض العلاقة بين المعايير والنتائج.

5.7.6 خطوات العملية العملية باختصار

1. استيراد الرستراتNDVI ، LST، NDBIفي.GIS
2. تنظيف البيانات والتأكد من التوافق المكاني.
3. توحيد القيم لكل معيار باستخدام.Raster Calculator
4. تحديد الأوزان وفق السيناريو التخطيطي.
5. تطبيق أداة **Weighted Overlay / Raster Calculator**لحساب RPI النهائي.
6. تصنيف النتائج إلى فئات لسهولة التفسير.
7. عرض الخرائط النهائية بشكل تفاعلي وتحليل السيناريوهات المختلفة.

5.8 التوصيات والتكامل مع التخطيط الحضري

5.8.1 أهمية استخدام الخرائط الناتجة في التخطيط الحضري

تعتبر خرائط مؤشر أولوية إعادة التأهيل (RPI) أداة استراتيجية لتحويل التحليلات المكانية المعقدة إلى قرارات قابلة للتنفيذ. إذ توفر هذه الخرائط تصورًا واضحًا لتوزيع الأولويات، مما يمكن المخططين الحضريين من:

- **تحديد المناطق الأكثر احتياجًا للتدخل** :اســتنادًا إلى درجات الأولوية، يمكن معرفة الأحياء أو المناطق التي تعاني من تدهور بيئي شــديد، ســواء من حيث فقدان الغطاء النباتي، ارتفاع درجات الحرارة، أو التوســع العمراني غير المنضبط.
- **تخصـيص الموارد بكفاءة** :في سـياق محدودية الميزانيات، يمكن توجيه الموارد نحو المناطق ذات الأولوية القصوى، مما يحقق أقصى أثر للتدخلات التخطيطية.
- **تسـهيل التواصـل مع صـناع القرار وأصـحاب المصـلحة** :خرائط RPI تعمل كأداة بصـرية قوية لتوضـيح الأسس المنهجية وراء تحديد الأولويات، وبالتالي تعزيز الشفافية والمصداقية في التخطيط.

5.8.2 الربط بين RPI والمؤشرات البيئية الأخرى

يتيح دمج خرائط RPI مع مؤشرات بيئية إضافية مثل NDVI و LSTو:NDBI

- **تحليل متعدد الأبعاد** :يمكن مقارنة مناطق محددة على أســاس التدهور النباتي مقابل التدهور الحراري أو التوسع العمراني.
- **تقييم المخاطر المتشــابكة** :فهم العلاقة بين العوامل المختلفة يســاعد على تصــميم تدخلات متكاملة، مثل زراعة الأشجار في المناطق الحضرية لتقليل الجزر الحرارية مع تحسين المنظر الحضري.
- **دعم التخطيط الوقائي** :من خلال الربط بين مؤشــرات RPI والمخططات المســتقبلية، يمكن توقع المناطق التي قد تواجه تدهورًا مستقبليًا واتخاذ إجراءات استباقية.

5.8.3 استخدام المؤشر لتحديد أولويات إعادة التأهيل

يعزز مؤشر RPI القدرة على:

- **إنشــاء ســيناريوهات تدخل متعددة** :حســب الأولويات البيئية أو الحرارية أو المتوازنة، يمكن للمخططين تعديل الأوزان وإعادة حساب RPI لتوجيه استراتيجيات التدخل.
- **تحديد المواقع المناسبة للمشاريع الخضراء** :مثل الحدائق، الممرات الخضراء، أو المناطق الحضرية التي تحتاج لإعادة التشجير، مع مراعاة التداخل بين المعايير المختلفة.
- **مراقبة تقدم المشاريع وتحسين الاستراتيجيات** :يمكن استخدام RPI بشكل دوري لتحديث تقييم الأولويات ومقارنة النتائج بعد تنفيذ مشاريع إعادة التأهيل.

5.8.4 دمج RPI في أدوات التخطيط الحضري

- **الربط مع نظم دعم القرار المكاني :(SDSS)** يمكن إدخال نتائج RPI ضمن قواعد بيانات SDSS لتسهيل عمليات المحاكاة والتخطيط متعدد السيناريوهات.
- **التكامل مع التخطيط الهيكلي والإقليمي** :اســتخدام RPI لتحديد المناطق ذات الأولوية في خطط التنمية الحضرية، بما في ذلك توزيع الخدمات والمرافق العامة.
- **إمكانية التوسع نحو التخطيط الذكي** :دمج البيانات الحية من الأقمار الصناعية، أجهزة الاستشعار، والبيانات الاجتماعية والاقتصادية لتحديث خرائط RPI بشكل مستمر ودعم مفهوم المدن الذكية.

5.8.5 توصيات عملية لصناع القرار في السياق السوري

1. **اعتماد RPI كأداة رسمية لتحديد الأولويات البيئية** :نظرًا لغياب المسوحات الدورية في سوريا، يوفر RPIوسيلة علمية لتحديد المناطق الأكثر تدهورًا دون الاعتماد على البيانات التقليدية غير المتوفرة.
2. **المرونة في تخصيص الأوزان حسب السياسات الوطنية والمحلية** :يمكن تعديل أوزان المعايير لتتناسب مع أهداف البنية التحتية الخضراء أو تحسين الراحة الحرارية أو الأولويات الاجتماعية.
3. **دمج RPI مع خرائط الخدمات العامة** :مثل المستشفيات والمدارس والمرافق العامة لتحديد المناطق التي تحتاج للتدخل المتكامل.
4. **إجراء تحديثات دورية** :استخدام صور الأقمار الصناعية الجديدة لتحديث المعايير وتقييم التغيرات على مر الزمن، خصوصًا بعد تنفيذ مشاريع إعادة التأهيل.
5. **تعزيز الشفافية والمشاركة المجتمعية** :مشاركة خرائط RPI مع المجتمع وأصحاب المصلحة لتوضيح أسباب الأولويات، وتشجيع المشاركة في تصميم وتنفيذ المشاريع.

5.8.6 خلاصة التوصيات

- خرائط RPI توفر **أساسًا علميًا ومرئيًا** لدعم القرارات التخطيطية في البيئات المعقدة.
- يمكن **تكاملها مع نظم المعلومات الجغرافية وأدوات SDSS** لتطوير خطط عمرانية مستدامة.
- تعزز **المرونة والتكيف** مع سيناريوهات متعددة، سواء من حيث البيئة، المناخ، أو التخطيط العمراني.
- تعد أداة مثالية في سياق **غياب البيانات الميدانية الدورية**، مثل الحالة السورية، لتقديم تحليل موثوق وقابل للتطبيق.

الفصل السادس: مدينة دمشق كحالة إسقاطية

نظرة تمهيدية

تُعد مدينة دمشـــق، بشـــهادة تاريخية وجغرافية، واحدة من أقدم المدن المأهولة في العالم، وقد نالت أهميتها منذ القدم بفضل موقعها الجغرافي المميز، واحـتوائها لواحة خضراء ـ غُوطة دمشق ـ تربط بين الجبال وجنوب الصحراء. من خلال هذا الموقع، تمكّنت من الارتقاء إلى مركز حضـــاري وتجاري وســـياســـي، وقد ســـاهم في ذلك تطور حضري بطيء ومستمر عبر آلاف السنين، شمل عدة مراحل حضارية بدءاً بـالعهد الآرامي، مروراً بـاليونـاني والرومـاني، ثم العصـــر الأموي، فالعباســـي، وصـــولاً إلى العهود العثمانية ما قبل عام 1918. مُلخّصـــاً، فإن دمشق تشكّل طبقة حضارية متراكمة (urban palimpsest) تُمثّل فيها الطبقات الزمنية اختلاف أشكال النسيج، الوظيفة، والبُنية المكانية.

رسم توضيحي 16: الحدود الإدارية لمدينة دمشق - عمل الباحث

6.1 النطاق الزماني

تم تحديد النطاق الزمني للدراسة بناءً على الاعتبارات العلمية والعملية التالية:

6.1.1 الفترة الأولى: 15 آب/أغسطس 2011

تمثل هذه الفترة الحالة المرجعية الأساسية، حيث كانت البنية الحضرية لمدينة دمشق لا تزال محافظة على استقرارها النســـبي من حيـث التوزيع المكـاني للغطـاء النبـاتي، ومنـاطق الكثـافـة العمرانيـة، والحرارة الســـطحيـة. اعتماد هذا التاريخ يسمح بفهم **الأساس البيئي والعمراني الأولي** الذي يمكن القياس عليه لاحقاً.

6.1.2 الفترة الثانية: 15 آب/أغسطس 2025

تم اختيار هذا التاريخ ليعكس المرحلة الحالية من التحول الحضري والبيئي بعد مرور **أربعة عشر عامًا** من التغيرات المتراكمة في النسيج العمراني والبيئي للمدينة.
ويمثل عام 2025 محطة زمنية مناسبة لإجراء المقارنة مع 2011 نظرًا لتوافر بيانات حديثة وعالية الجودة من أقمار **Landsat 8وLandsat 9**.

6.1.3 مبررات اختيار الشهر (آب/أغسطس)

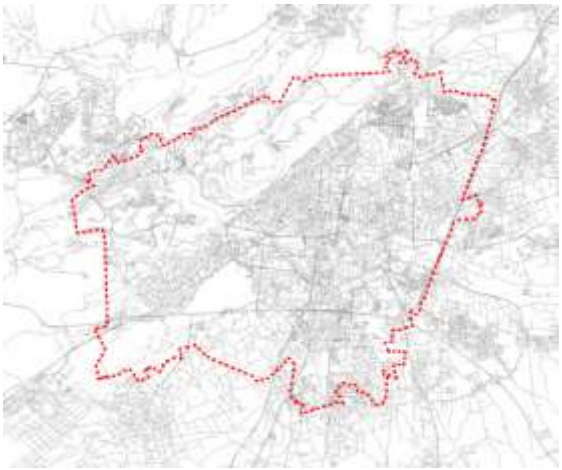
- يعتبر **شـــهر آب** من الفترات ذات الحد الأدنى من الغيوم في مدينة دمشـــق، حيث يتســـم المناخ بالجفاف والاستقرار الحراري.
- خلال هذه الفترة تكون **الغطاءات النباتية في حدها الأدنى الموســـمي**، مما يُســـهّل المقارنة الكمية دون تأثير التغيرات الموسمية.
- يتيح التوقيت الصـــيفي الحصـــول على **أعلى تباين حراري** بين المناطق الحضـــرية والمناطق المفتوحة، ما يعزز دقة تحليل ظاهرة **الجزيرة الحرارية الحضرية (UHI).**

من خلال هذا الاختيار المنهجي، تم تقليل احتمالية التشـويش الناتج عن الظلال أو الرطوبة أو التغيرات الموسـمية المؤقتة، لضـمان أن تكون المقارنة بين الفترتين مبنية على فروق حقيقية في التحول الحضـري لا على عوامل موسمية عابرة

6.2 النطاق المكاني (مدينة دمشق)

اقتصر التحليل المكاني في نظام **DURIS** على الحدود الإدارية **لمدينة دمشق فقط** دون تضمين مناطق ريف دمشق المجاورة، وذلك بهدف التركيز على النواة الحضرية للمدينة التي تشهد أعلى معدلات التحول والتغير المكاني.

خصائص النطاق المكاني:



رسم توضيحي 17: جوار وتخوم مدينة دمشق - عمل الباحث

- **المسـاحة الإجمالية :**نحو 105 كم² وفقًا لتصـنيفات FAO/GAUL.
- **الحدود الجغرافية :**تمتد من منطقة القدم جنوبًا إلى برزة شـمالًا، ومن المزة غربًا إلى جوبر والقابون شرقًا.
- **الطبوغرافيا :**تقع المدينة في منخفض بين جبل قاسيون وسهل الغوطة الشرقية، ما يجعلها عرضة لتجمع الحرارة السطحية.
- **الأنماط الحضـرية :**تتوزع بين نسـيج تاريخي كثيف في المركز، ومناطق توسع حديثة، وأحزمة عشوائية تحيط بها .

تم تحديد النطاق المكاني من خلال تحميل الحدود الرسمية لمدينة دمشق وتطبيقها كقناع مكاني في بيئة Google Earth Engine لتصفية جميع العمليات التحليلية ضمن حدود المدينة فقط.

مبررات حصر الدراسة داخل المدينة الإدارية

1. تمثل دمشق النواة العمرانية الأقدم والأكثر كثافة في سوريا.
2. تحتوي على جميع أنماط الاستخدامات الحضرية (سكني، تجاري، صناعي، تاريخي).
3. وجود بيانات فضائية أكثر استقرارًا وتجانسًا مقارنةً بالمناطق المحيطة.
4. يتيح التركيز داخل حدود المدينة تحقيق دقة مكانية أعلى وتفسيرًا أكثر وضوحًا للنتائج.

من خلال هذا الإطار المنهجي، حُددت جميع أبعاد الدراسة بشكل واضح ودقيق، بما يضمن قابلية المقارنة الزمانية المكانية بين عامي 2011و2025**.**

ويمكن القول إن هذه الخطوات التمهيدية تمثل الأساس العلمي الذي يُبنى عليه عمل المؤشرات التحليلية في النظام DURIS، والتي سيتم تناولها في القسم التالي.

6.3 النشأة والتطور المبكّر للمدينة

لقد قامت دمشق في الأصل على واحة تُروى من نهر بردى ونشأت من تجمعات قرية في شرق السهل، ثم توسعت عبر الأزمنة بفعل موقعها عند مدخل الصحراء الغربية، عبر سهل الغوطة، وعند سفح جبل قاسيون. 2 هذا الواقع الجغرافي أعطى المدينة ميزة مزدوجة: أولاً، توفيراً للموارد المائية والزراعية التي دعمت تجمعاً حضرياً مبكّراً؛ وثانياً، موقعاً تجارياً استراتيجياً على طريق قوافل الحج والطرق بين الشرق والغرب.

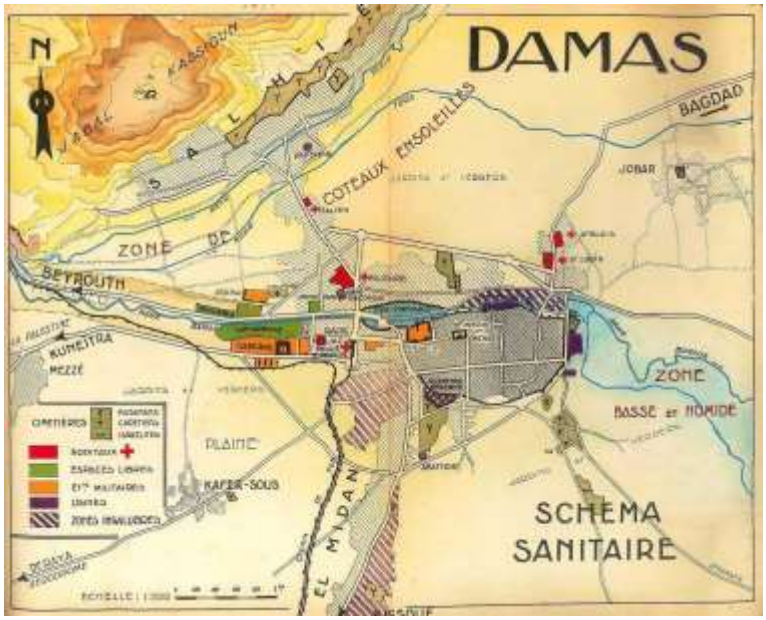
خلال الفترة الكلاسيكية والرومانية، دخلت دمشق في حقل المدن الكبرى، ثم في العصر الأموي أصبحت عاصمة للخلافة، ما أسهم في نموها العمراني والمعماري، وتوسّعها داخل أسوار المدينة البيضوية القديمة. ومع العهد العثماني، خاصة في القرن التاسع عشر، بدأت تظهر بوادر تحويل المدينة نحو نماذج أكثر "عصرية" من حيث الشوارع الواسعة وواجهات المباني الحديثة نسبيّاً.

6.3.1 المخططات التنظيمية في أوائل القرن العشرين: إيكوشار ودانجيه

مع الانتداب الفرنسي على سورية (بعد عام 1920)، دخلت دمشق مرحلة تنظيمية حديثة. ففي عام 1926، وكلّ المندوب السامي الفرنسي هِنْري دي جوفنيل (Henry de Jouvenel) مهندساً لتنظيم مدينة دمشق، مُعطياً أولوية لإعادة إعمار «حيّ الحريق» الذي دُمر بعد حريق 1925. ثم وقع العقد في عام 1929 مع المهندس الفرنسي René Danger لإعداد دراسات تنظيمية لمدن سورية بينها دمشق. وفي عام 1934 عُيّن المهندس الفرنسي Michel Écochard ضمن فريق الأشغال لتنظيم دمشق، وأصدر المخطط النهائي في عام 1936 الذي نُسب إليه.

هذا المخطط – الذي يعمل ضمن إطار "التنظيم الوظيفي – zoning "تضمّن توسيع المدينة غرباً وشمالاً، وفتح شوارع جديدة، وإنشاء أحياء حديثة خارج أسوار المدينة القديمة. وقد ركّز Danger–Écochard على شوارع أشجار، تقاطعات واسعة، وحدائق عامة، وتجميل المناطق الجديدة، مع إهمال نسبي للنسيج العضوي القديم داخل الأسوار القديمة. 5

وبالتالي، يمكن اعتبارَ بداية الثلاثينيات نقطة تحوّل في النمط المعماري والعمراني لدمشق؛ حيث بدأت المدينة تتحول من مدينة ذات نسيج عضوي تقليدي إلى مدينة تخطيطية أكثر تنظيمًا على أسس حديثة، مع مراعاة الحيّز الأثري داخل الأسوار وإدماجه ضمن التخطيط الحضري.



رسم توضيحي 18مخطط مدينة دمشق للمخطط الفرنسي دانجيه 1936

6.4 السياق الحضري والبيئي لمدينة دمشق

تُعدّ مدينة دمشـــق واحدة من أقدم المدن المأهولة في العالم، وتمتاز بموقعها الجغرافي الفريد على حافة الصـــحراء السورية، في واحة خصبة تتغذى من مياه نهر بردى، وتُحيط بها بساتين الغوطة التي شكّلت عبر التاريخ قاعدة الحياة الزراعية والبيئية للمدينة. تقع دمشـق عند سـفح جبل قاسـيون على ارتفاع يقارب **680متراً عن سـطح البحر**، وتبلغ مساحتها الإدارية نحو **105كيلومترات مربعة**، بينما يمتد الامتداد العمراني الحقيقي إلى أكثر من **200كيلومتر مربع** متضمناً الضواحي المتصلة عمرانياً. أما عدد سكانها فيقدّر بحوالي **2.2مليون نسمة داخل الحدود الإدارية**، في حين يصـــل العدد الإجمالي في التجمع الحضـــري المتصـــل إلى ما يزيد عن **4ملايين نســـمة**، مما يجعلها من أكثر المدن العربية كثافةً سكانية نسبةً إلى مساحتها الفعلية.

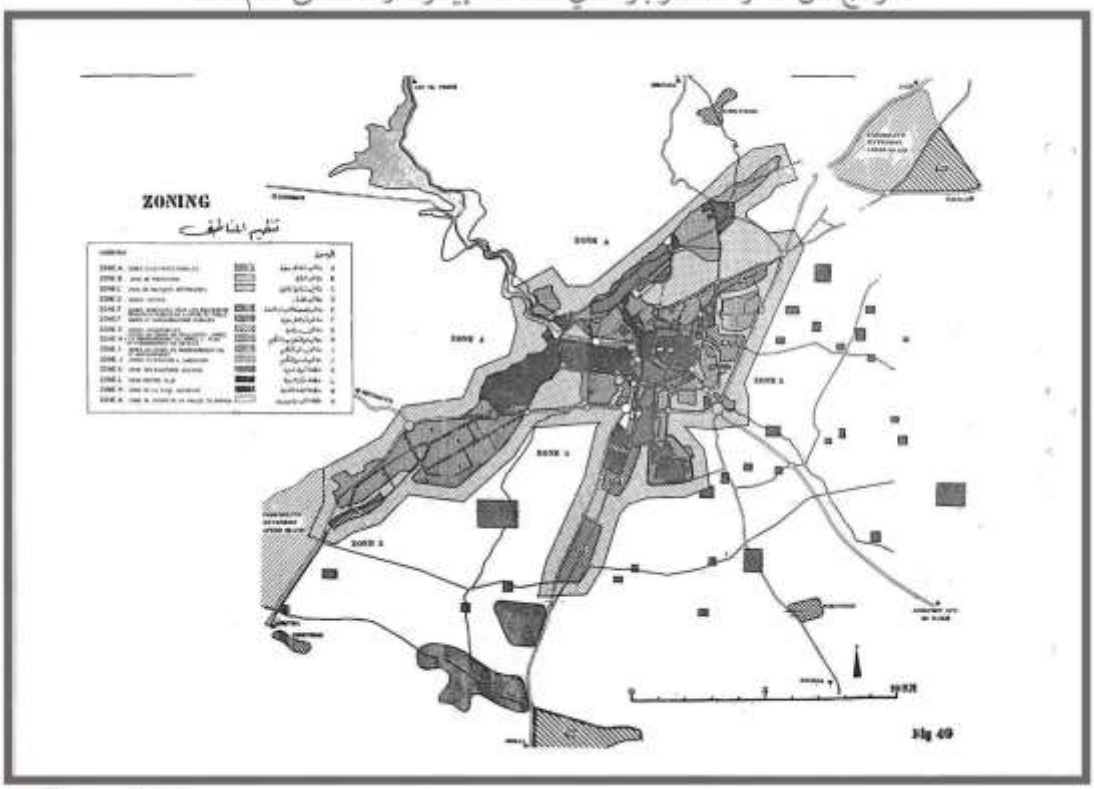
6.4.1 التطور التاريخي والتخطيط الحديث

شـهدت دمشـق تحولات عمرانية متتالية بدأت من النواة التاريخية داخل الأسـوار، حيث تداخلت الحضـارات الآرامية والرومانية والإسلامية في تشكيل نسيجها العمراني الفريد. خلال فترة الانتداب الفرنسي، مثّل **مخطط دانجيه (1936)** أول محاولة لتنظيم المدينة على أسس حديثة مع الحفاظ على الغوطة كحزام أخضر يحدّ التوسع العمراني. لاحقاً، جاء **مخطط ميشـيل إيكوشـار (1937)** ليؤسـس لنهجٍ أكثر تكاملاً، مسـتنداً إلى الفصـل الوظيفي بين الأنشـطة السـكنية والإدارية والتجارية، وإلى رؤيةٍ عمرانية تراعي التدرج الطبوغرافي للمدينة وعلاقتها بالمناطق الزراعية المحيطة. رغم الطابع الحداثي لتلك المخططات، إلا أن معظمها ركّز على الامتداد الأفقي وتسهيل الحركة، دون تأسيس سياسات واضحة للحفاظ على البيئة الطبيعية للغوطة، مما جعلها عرضة لاحقاً للتآكل العمراني المتسارع.

6.4.2 مخطط ايكوشار 1968:

في عام 1968 : تم وضع ا خر مخطط تنظيمي لمدينة دمشق من قبل الفرنسي ميشيل ايكوشار فظهرت الأحياء المنظمة والأبراج السكنية العالية في منطقة التجارة والمزة والعدوي وغيرها من المناطق .

نموذج من الخرائط الموجودة في مخطط إيكوشار لدمشق عام ١٩٦٨



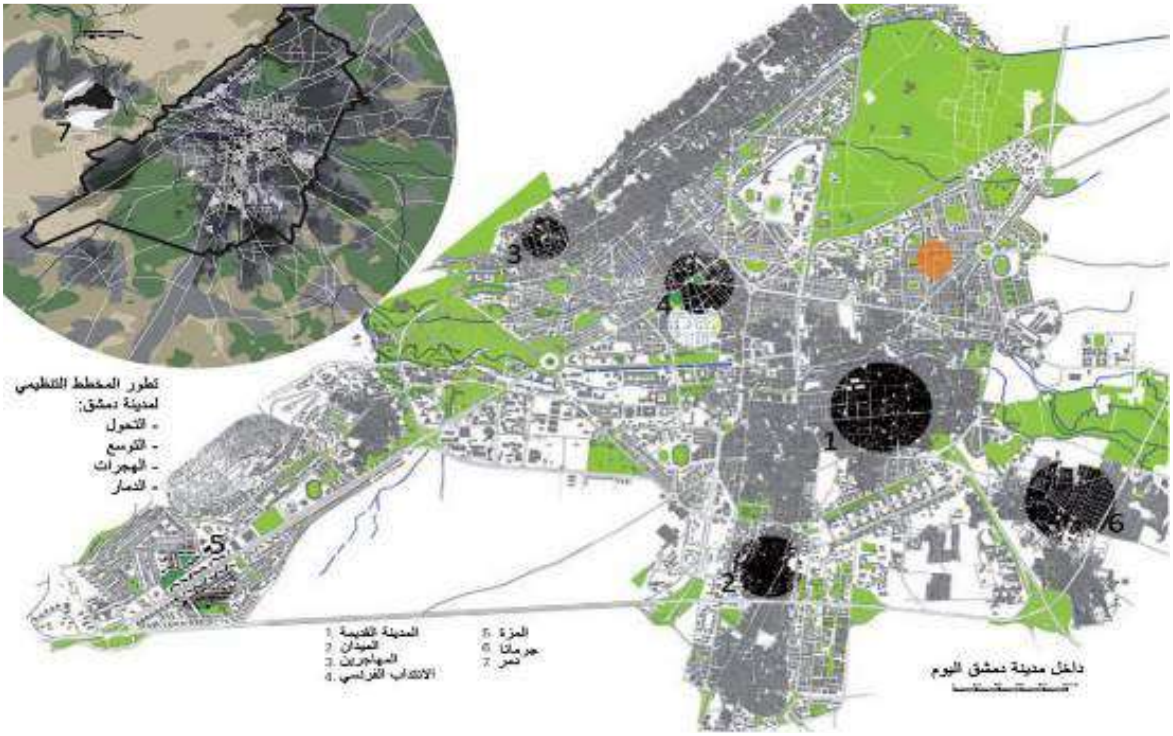
التنظيم الحديث للمدينة (وتدهور بعض المناطق الحضرية):

في **عام 1980** :وبعد دخول المخطط التنظيمي العام لسنة 1968 حيز التطبيق، كان النمو العمراني للمدينة والبلدات المحيطة بها في القرن السابق هائلاً وتجاوز افتراضات النمو التي وضعها مخطط إيكوشار. تم دمج العديد من التجمعات العمرانية، وجرى تحويل بلدات الغوطة وقراها الصغيرة (حرسْتا وجرْمانا) إلى ضواحي كبيرة، فيما أخذت مناطق السكن العشوائي بالتوسع نحو السهل الزراعي وجبل قاسيون. والجنوب، هناك مناطق توسع عشوائي (صناعات وورش عمل) تطورت على طول طريق درعا.

بحلول عام 2000 :كانت معظم المناطق العمرانية قد اندمجت ضمن كيان واحد. وجرى إنشاء مدن تابعة جديدة، مثل توسيع قدسيا وضحية الأسد. وهذا الاتجاه مثبت أيضاً في **عام 2010** (بما أن معظم المدن التابعة قد بنيت إضافة إلى المنطقة السكنية الضخمة في يعفور). وفي الصبورة، هناك موقع تطوير كبير في البوابة النامية قيد الإنشاء على طول طريق بيروت. وإلى

جوارها هناك مشـــروعان تطويريان واســـعا النطاق، ألا وهما حدائق يعفور ودمشـــق الجديدة (المقترحان من ماجد القظيم ويُوصفان على أنهما الأكبر في سوريا).

والنمو مؤخراً هو تعبير عن اندماج البلد في الاقتصـــاد العالمي وانعكاس ســـلســـلة من التدابير المتخذة لتشـــجيع الاســـتثمارات الخاصـــة والأجنبية في قطاعي العقارات والإنشـاءات. ورغم النمو المطرد للسـكان منذ عام 1981، تزايد وتسـارع اسـتهلاك الفرد للمساحة. وفي المقابل شهد سكان **مركز المدينة** تناقصاً. وهذا مؤشر واضح على أن **دمشق هي مدينة حيوية**، لكنه أيضاً علامة على عملية توسـع الضـواحي المتواصـل والذي يتطلب ضـم المزيد من الأراضـي، في حين يصـبح تأمين البنية التحتية وإدارتها أكثر تكلفة من ذي قبل. كما أن النقل والمنشآت التعليمية والمساحات الخضراء الترفيهية والمستشفيات، وحتى الحدود الإدارية لم تسـتطع مواكبة النمو، وهي تشـهد الآن نقصـاً كبيراً. مما يعرض النجاح الإجمالي للمدينة للخطر كمكان جيد للعيش والعمل والاستثمار.



رسم توضيحي 19: مقترح مخطط دمشق لشركة خطيب وعلمي 2010

6.4.3 التوسع العمراني وتدهور الغوطة

منذ خمسـينيات القرن العشـرين وحتى بداية الألفية الجديدة، بدأت الغوطة تفقد تدريجياً مسـاحاتها الزراعية أمام زحف المباني السـكنية والصـناعية، حيث تراجع الغطاء الأخضـر بشـكل حادّ من نحو **22ألف هكتار في منتصـف القرن العشرين** إلى أقل من **6آلاف هكتار بحلول عام 2010** .أدّت هذه التحولات إلى فقدان دمشق لتوازنها البيئي والمناخي، فارتفعت درجات الحرارة الصـــيفية بمعدل 1.5–2 درجة مئوية، وازدادت كثافة الجســـيمات العالقة في الهواء نتيجة ضعف التهوية الطبيعية داخل المدينة المكتظة.

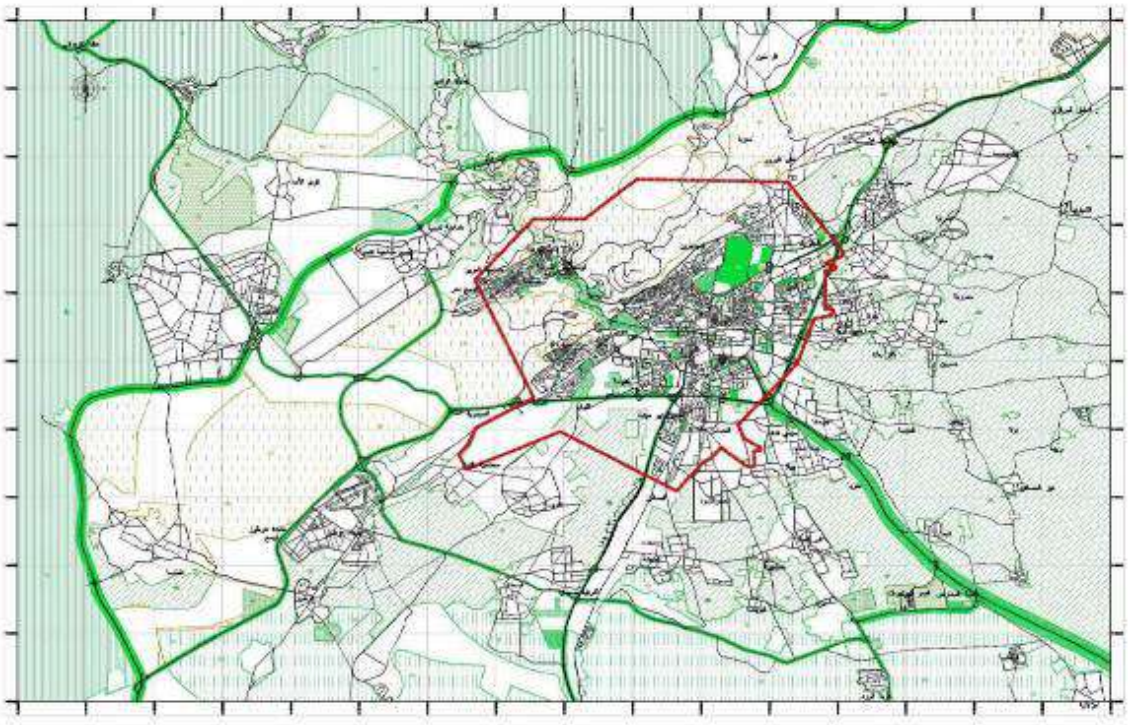
6.4.3.1 التحولات البيئية بين 2011 و2025

عام 2011، شـهدت دمشـق تغيّرات بيئية عميقة. توقفت أنشـطة الصـيانة العامة وشـبكات الري في أجزاء واسـعة من الغوطة، وتعرّضـت البنى التحتية البيئية للتدهور، كما ارتفعت معدلات التلوث الهوائي بسـبب الاعتماد الواسـع على مولدات الوقود وانخفاض جودة الوقود المسـتخدم.بين عامي 2011 و2025، أظهرت تحليلات الاسـتشـعار عن بعد (RS)انخفاضـاً في مؤشـر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) بمعدل تجاوز **40%** في بعض المناطق الشـرقية والجنوبية، مقابل زيادة واضـحة في الأسطح الإسفلتية والخرسانية داخل المدينة. كما زادت الكثافة الحرارية السطحية في مركز المدينة بما يعادل **4–3درجات مئوية** مقارنة بالمناطق الجبلية المحيطة، مما يدل على نشـوء ظاهرة "الجزيرة الحرارية الحضرية" بشكل واضح.

6.5 الخصوصية البيئية والحضرية للحالة الدمشقية

ما يميز دمشق عن سائر المدن السورية هو ارتباطها العضوي بالمورد الطبيعي الوحيد، نهر بردى، الذي يعاني اليوم من انخفاض حاد في منسوب المياه وارتفاع في مستويات التلوث العضوي والصناعي. كما أن التحولات الاجتماعية بعد الحقبة السورية الجديدة ساهمت في زيادة الكثافة السكانية داخل المدينة القديمة وضواحيها، نتيجة النزوح الداخلي، ما ضاعف الضغط على البنى التحتية والمناطق الخضراء القليلة المتبقية.

تُبرز هذه العوامل مجتمعةً الحاجة إلى مقاربةٍ تخطيطية جديدة تُدمج بين **التحليل البيئي المكاني** و**النمذجة الحضـرية** لاستعادة التوازن بين البعد العمراني والبيئي، خصوصاً في ظل التحديات المناخية المستقبلية وندرة الموارد المائية.

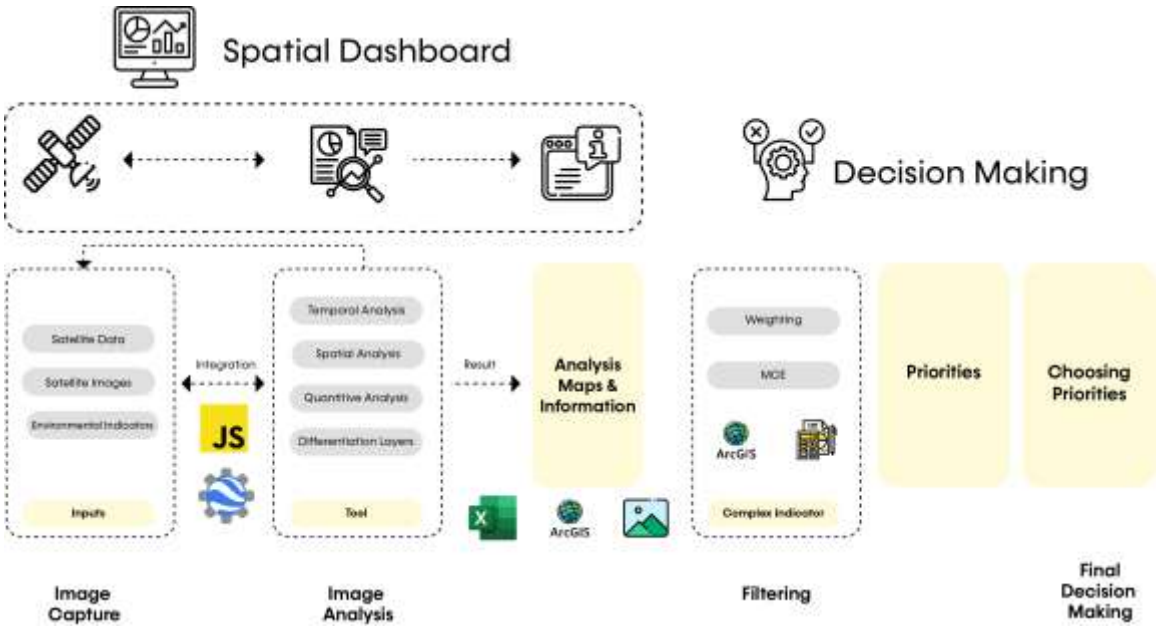


رسم توضيحي 20: مخطط المناطق الخضراء في دمشق – المصور العام لدمشق ومحيطها الحيوي – المصدر: الشركة العامة للدراسات والاستشارات الفنية

6.6 المنهجية المعتمدة في الدراسة

تستند المنهجية العامة لهذا البحث إلى مقاربة تحليلية مكانية – زمنية، تهدف إلى **تحديد أولويات التأهيل العمراني والبيئي في مدينة دمشق** عبر أدوات الاستشعار عن بعد (RS) ونظم المعلومات الجغرافية(GIS) ، من خلال تتبع التغيرات المكانية بين عامي **2011و2025.**

تعتمد المنهجية على سلسلة مترابطة من المراحل التحليلية تبدأ من **استخلاص المؤشرات البيئية** وتنتهي بتوليد **مؤشر مركب للأولوية(RPI)** ، وفق الخطوات التالية:



رسم توضيحي 21: خطوات ومراحل عمل الأداة التحليلية المقترحة - عمل الباحث

6.6.1 استخراج المؤشرات البيئية(NDVI – LST – NDBI)

تبدأ العملية بجمع البيانات من مصادر متعددة تمثل مدخلات النظام، وتشمل:

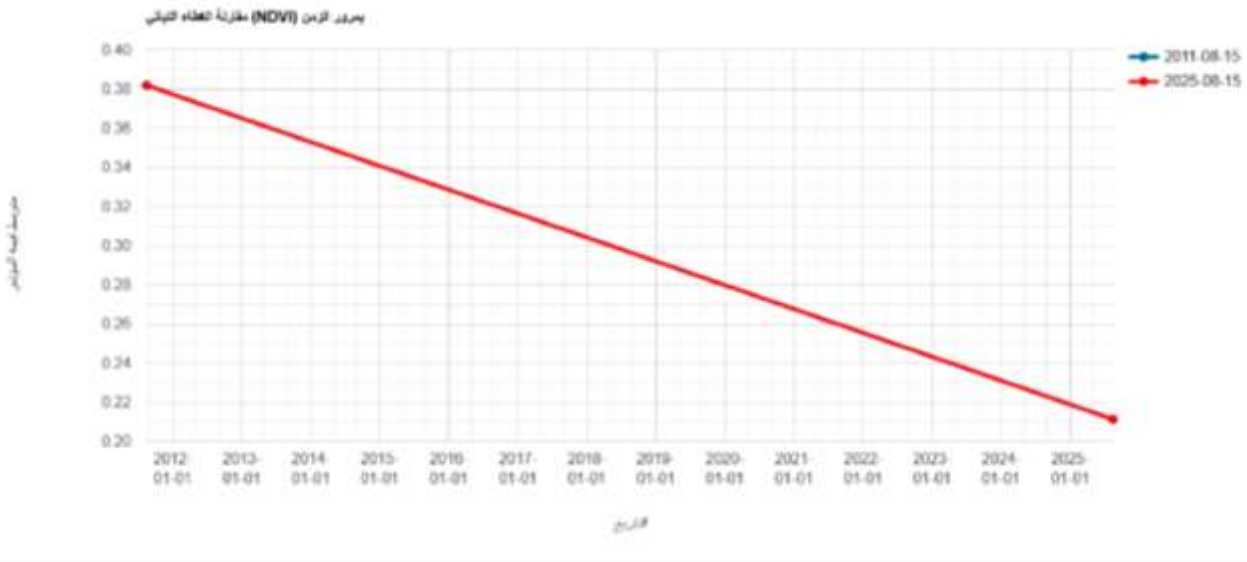
- **بيانات الأقمار الصناعية** مثل *Sentinel-2* و*Landsat 8–9*، والتي توفر معلومات طيفية عالية الجودة عن الغطاء النباتي والحراري والعمراني.
- **الصور الفضائية الخام** التي تُستخدم في التحليل البصري لاستخراج مؤشرات التغير المكاني.
- **المؤشرات البيئية** (Environmental Indicators)التي تشمل مؤشرات الغطاء النباتي(NDVI) ، مؤشر الكثافة العمرانية(NDBI) ، ومؤشر درجة حرارة سطح الأرض.(LST) تُعدّ هذه المؤشرات الركائز البيئية الأساسية التي تُعطي صورة كمية دقيقة عن التحولات المكانية في دمشق، وتشكل المدخل العلمي لتقييم التدهور البيئي والعمراني.

تُدمج هذه البيانات داخل بيئة **Google Earth Engine (GEE)**باستخدام لغة **JavaScript**لمعالجة الصور وإجراء التصحيحات المكانية والإشعاعية، ثم تُنقل النتائج إلى برامج التحليل المكاني مثل **ArcGIS**لإتمام التحليل الكمي والمكاني.
تُعتبر هذه المرحلة بمثابة تأسيس **القاعدة المعرفية الرقمية** اللازمة للتحليل الزمني والمكاني، والتي تتيح تتبع التغيرات البيئية والعمرانية في المدينة بين عامي **2011و2025**.

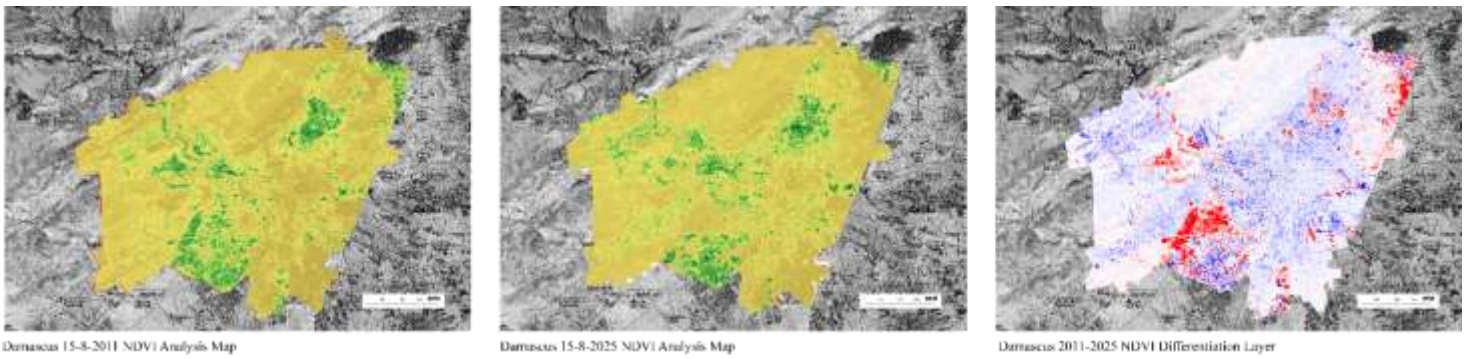
أولاً : نتائج مؤشر NDVI

الملاحظات العامة:

النتائج الكمية العامة ضمن العاميين المرجعيين أظهرت تراجع قيمة مؤشر NDVI من قيمة 0.38 ضمن عام 2011 إلى قيمة تعادل 0.21 ضمن عام **2025** **مما يعكس تدهوراً واضحاً وانخفاض يكاد يقارب النصف من القيمة في العام المرجعي الأول.**



رسم توضيحي 23: : النتيجة الكمية لمؤشر NDVI لمدينة دمشق ورصد تغيراته- عمل الباحث

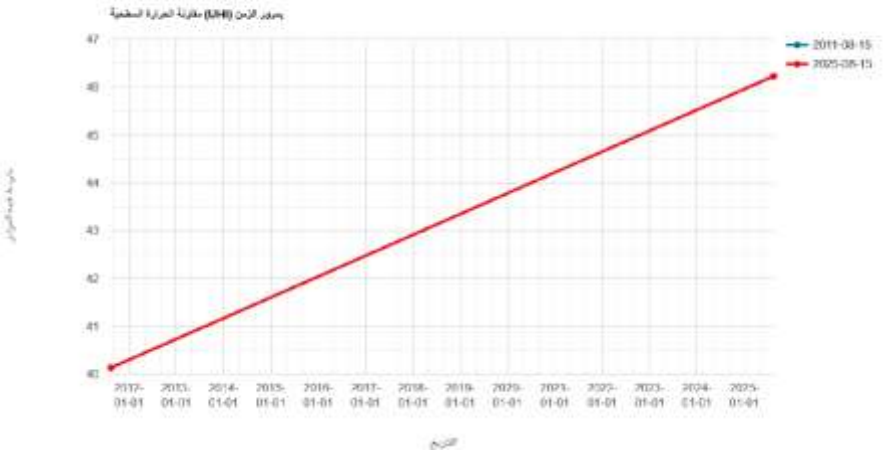


رسم توضيحي 22: المخططات التحليلية لمؤشر NDVI ضمن العامين المرجعيين مع خريطة الفوارق- عمل الباحث

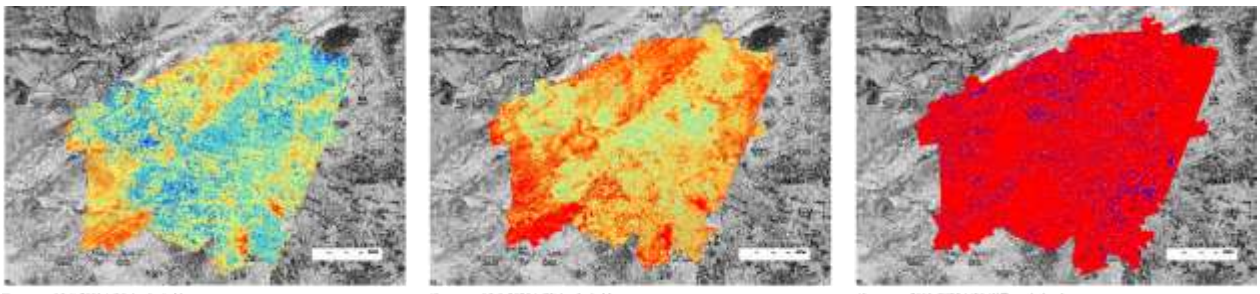
ثانياً : نتائج مؤشر UHI

الملاحظات العامة: النتائج الكمية العامة ضـــمن العاميين المرجعيين أظهرت زيادة قيمة مؤشـــرUHI من قيمة تعادل درجة حرارة 40^{O} مئوية ضمن عام 2011 إلى قيمة تعادل درجة حرارة 46.5^{O} مئوية ضمن عام 2025 مما يعكس تدهوراً واضحاً وازديـاد في متوســـط درجـات الحرارة يكـاد يقـارب 7 درجـات مئويـة على القيمـة في العـام المرجعي الأول

حيث شـــهدت المنطقة، التي كانت تعتبر **منطقة نزاع في أطرافها** خلال الفترة من عام 2011، ارتفاعًا ملحوظًا في درجة حرارة سطح الأرض بين عامي 2011 و2025، حيث سجل مؤشر **LST** قيمة **40°C** في عام 2011 تقريبًا، ليصل إلى نحو **47°C** في عام 2025. يعكس هذا الارتفاع الكبير تدهور البيئة العمرانية والطبيعية نتيجة للمعارك، الذي أدى إلى تدمير البنية التحتية وترك مساحات واسعة من الأرض مكشوفة أو متضررة، بالإضافة إلى قلة الصيانة وإزالة الغطاء النباتي. كما يمكن أن يشير هذا التغير إلى التحول الجزئي للأراضي إلى مناطق مبنية منخفضة الكثافة أو أراضٍ مهجورة تعاني من تراكم مخلفات البناء والحطام، ما ســـاهم في زيادة امتصـــاص وتخزين الحرارة على ســـطح الأرض. يعكس هذا التغير البيئي والاجتماعي آثار النزاع على البيئة الحضـــرية والمناخ المحلي، مؤكدًا الحاجة إلى اســـتراتيجيات إعادة تأهيل حضـــري وبيئي مستدامة لتقليل الحرارة السطحية وإعادة التوازن للمنطقة.



رسم توضيحي 24: النتيجة الكمية لمؤشر UHI لمدينة دمشق- عمل الباحث

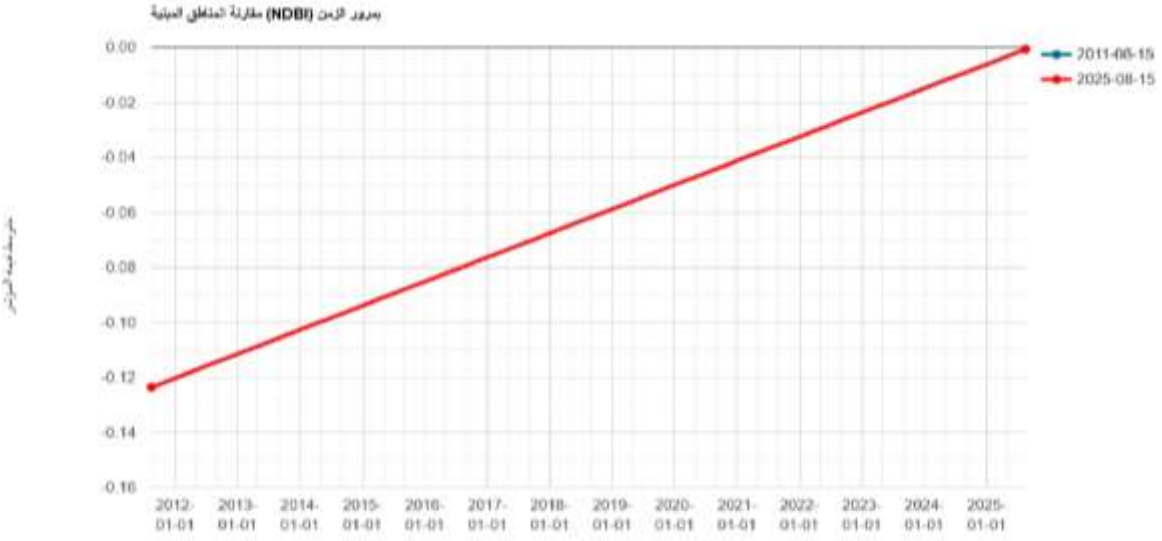


رسم توضيحي 25: المخططات التحليلية لمؤشر UHI-LST ضمن العامين المرجعيين مع خريطة الفوارق- عمل الباحث

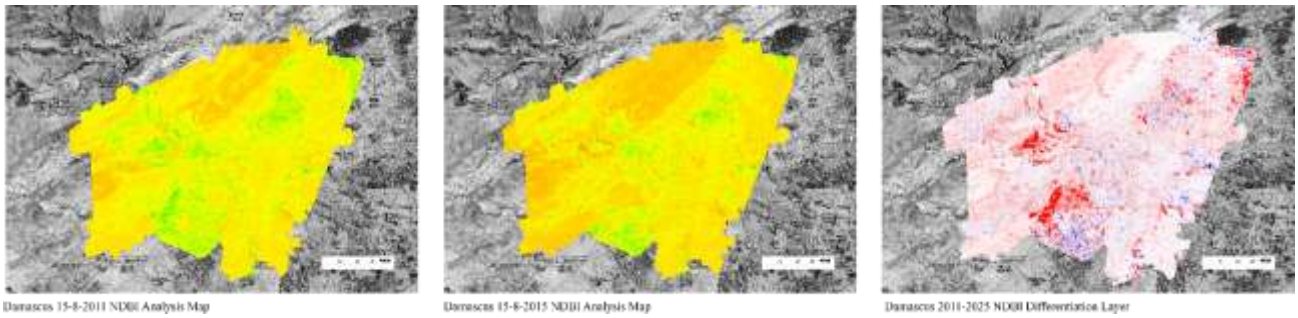
ثالثاً: نتائج مؤشر NDBI

الملاحظات العامة:

شهدت المنطقة المدروسة تحولًا ملحوظًا خلال الفترة الممتدة من عام 2011 حتى عام 2025. ففي عام 2011، كان مؤشر NDBI يساوي 0.12-، مما يشير إلى أن الأرض كانت في الغالب غير مبنية، وتتميز بوجود غطاء نباتي متفرق أو تربة عارية أو أراضٍ طبيعية مع الحد الأدنى من البنية التحتية الحضرية. وبحلول عام 2025، ارتفع مؤشر NDBI ليصل تقريبًا إلى **0**، ما يعكس تحوّلًا نحو مشهد حضري أكثر، إذ يشير هذا التغير إلى ظهور مبانٍ منخفضة الكثافة، مثل وحدات سكنية متفرقة أو منشآت تجارية صغيرة أو تطويرات أولية في البنية التحتية، دون أن يصل بعد إلى مستوى التحضر الكامل. يشير هذا الارتفاع التدريجي في المؤشر إلى عملية **التوسع العمراني التدريجي**، حيث تتحول الأراضي الطبيعية أو غير المطورة إلى استخدامات شبه حضرية، وهو ما قد يكون مدفوعًا بنمو السكان أو البناء العشوائي أو المبادرات التنموية، مما يؤدي إلى تكوين مشهد أرضي متزايد التعددية في الاستخدامات ويشكل بداية لتكثيف العمران.



رسم توضيحي 26: النتيجة الكمية لمؤشر NDBI لمدينة دمشق وازديادها - عمل الباحث

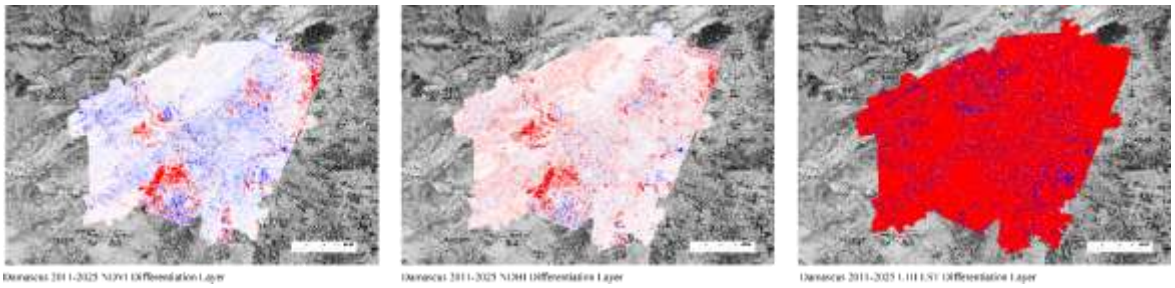


رسم توضيحي 27: : المخططات التحليلية لمؤشر NDBI ضمن العامين المرجعيين مع خريطة الفوارق- عمل الباحث

6.2.2 إنتاج الخرائط وطبقات التمايز الزمني (Differentiation Layers)

في هذه الخطوة، يتم توليد الخرائط تبعاً للمؤشر وتوليد طبقات الفرق الزمني لكل مؤشر على حدة، بحيث تمثل القيمة الموجبة أو السالبة اتجاه التغير بين العامين المرجعيين.**(2011–2025)** من خلال هذه الطبقات يمكن **تحديد المناطق التي شهدت أعلى معدلات تدهور بيئي أو عمراني**، مما يتيح بناء قاعدة بيانات أولية لتصنيف المناطق الحساسة أو المتدهورة، والتي ستُشكّل لاحقاً الأساس في تحديد أولويات التأهيل.

حيث يتم إعطاء اللون الأزرق للمناطق التي شهدت تحسناً عبر العامين المرجعيين بينما يتم إعطاء اللون الأحمر للمناطق التي تدهورت ويمثل اللون الأبيض المناطق التي لم تشهد أي تغير عبر العامين المرجعيين.



رسم توضيحي 28: طبقات التمايز الزمني ضمن الفترتين المرجعيتين في جميع المؤشرات- عمل الباحث

ثانياً: نتائج خرائط الاختلاف والملاحظات الأولية

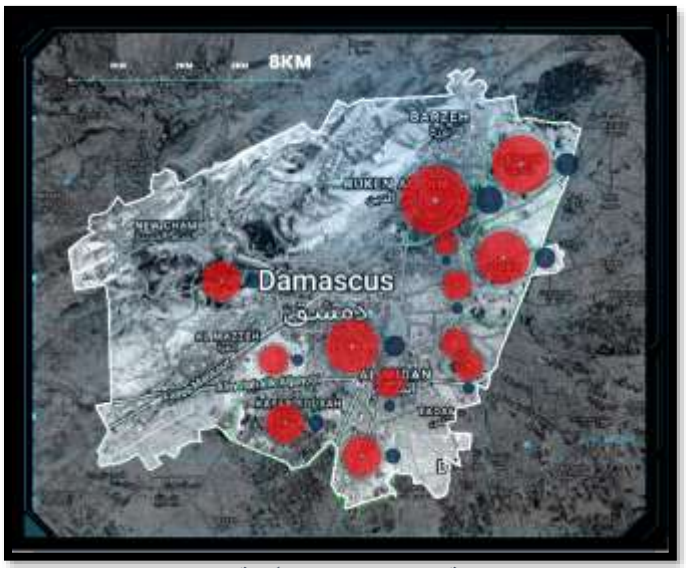
المناطق المرجحة,وعوامل التصفية

الملاحظات الأولية لنتائج التحليل التفاضلي

أظهرت المقارنة المكانية–الزمنية بين عامي **2011و2025**، والمعتمدة على مؤشـــرات **الغطاء النباتي(NDVI)** ، و**البناء(NDBI)** ، و**درجة حرارة الســطح(LST)** ، مجموعة من الملاحظات الأولية التي تُعدّ مدخلاً أســاســياً لفهم الـتـحـولات الـعـمـرانـيـة والـبـيـئـيـة فـي مـديـنـة دمشـــق خـلال فـتـرة الـدراســـة. فمن خلال تحليل الطبقات التفاضلية الناتجة عن دمج المؤشرات، برزت **أنماط متباينة من التدهور والتحسن البيئي** داخل النسيج الحضري للمدينة، يمكن تلخيصها ضمن ثلاثة اتجاهات رئيسية:

أولاً، سُـجلت **مناطق ذات تراجع حاد في مؤشــر الغطاء النباتي(NDVI)** ، تمركزت غالباً في **الأحزمة الخضــراء الـداخليـة** للمـدينـة، مثـل **بســـاتين أبو جرش**، و**بســـاتين الرازي**، و**أطراف حي المزة ودمر الغربيـة**. وقد ترافق ذلك مع **ارتفاع واضــح في مؤشــر البناء(NDBI)** ، مما يشـير إلى **تحول هذه المناطق من فضــاءات خضراء شبه زراعية إلى كتل عمرانية ناشئة**، وهو ما يعكس أحد أبرز مظاهر التحول نتيجة زيادة الضغط السكاني وإعادة توزيع الأنشطة الاقتصادية ضمن النطاق الحضري.

ثانياً، لوحظت **زيادة ملحوظة في القيم الحرارية (LST)** في مناطق **جوبر**، **القدم**، و**القابون**، وهي مناطق كانت خاضـعة لأعمال عسـكرية ودمار واسـع ما أدى إلى **تحول الأســطح إلى مواد صــلبة عالية الانعكاس الحراري** وغياب شبه كامل للغطاء النباتي، مما ســاهم في تشــكّل **جزر حرارية محلية.(Local Hotspots)**



رسم توضيحي 29:خريطة نتائج الملاحظات الأولية لنتائج التحليل التفاضلي- عمل الباحث

أما الاتجاه الثالث فيتمثل في **المناطق ذات التحســن النســبي**، حيث أظهرت بعض الأحياء المركزية مثل **المالكي** و**أبو رمانة** و**الروضــة** اســتقراراً في قيم المؤشــرات البيئية، نتيجة اســتمرار أعمال الصــيانة والخدمات وارتفاع القدرة الاقتصــادية لســكانها، مما جعلها أقل تأثراً بالتحولات السلبية خلال الفترة المدروسة.

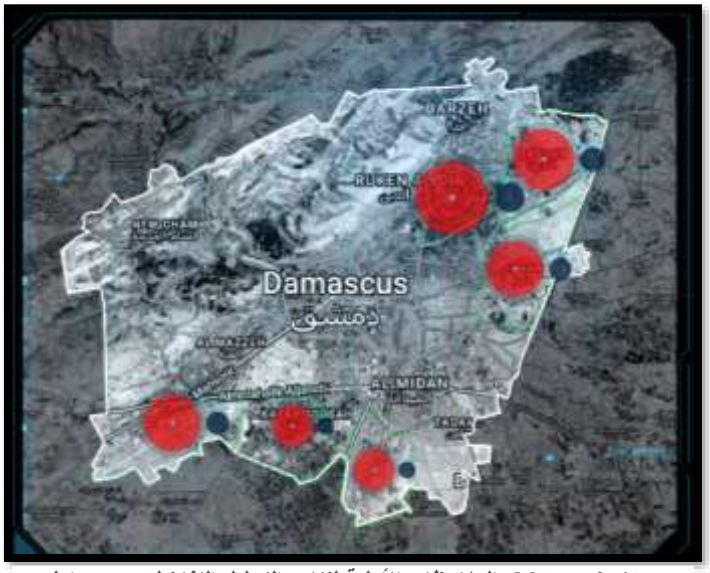
غير أن المراجعة الأولية لهذه النتائج كشــفت أيضاً عن **تباينات ظاهرية غير منطقية في بعض المواقع**، حيث أظهرت مناطق خاضعة لمشاريع تطوير تنظيمي أو مرافق رياضية **قيم تدهورٍ مرتفعة بيئياً** رغم أنها لا تعكس تراجعاً فعلياً، بل **تحولاً مؤقتاً في شكل استعمال الأرض أو مرحلة إنشائية قائمة**.هذا التناقض الظاهري بين القراءة الرقمية والواقع التخطيطي الميداني أظهر الحاجة إلى **مرحلة**

منهجية إضافية لضبط النتائج، تتمثل في **تطبيق عوامل تصفية مكانية** تتيح استبعاد أو تعديل نتائج بعض المناطق وفق مبررات واقعية مدعومة بالمصادر الرسمية وصور الأقمار الصناعية الحديثة.

وبذلك، شكلت هذه الملاحظات الأولية قاعدة معرفية أساسية لتطوير المرحلة التالية من المنهجية، والمتمثلة في **عوامل التصفية(Filtering Factors)** ، التي تهدف إلى رفع موثوقية التحليل وتوجيه نتائج الدراسة نحو **مناطق التدهور الحقيقي** ذات الأولوية في التأهيل البيئي والعمراني.

استندت مرحلة التحليل اللاحقة في هذه الدراسة إلى بناء **طبقات تفاضلية مكانية وزمنية (Spatial–Temporal Differentiation Layers)** لمجموعة من المؤشرات البيئية والعمرانية المنتقاة، وهي: **مؤشر الغطاء النباتي المعياري(NDVI)** ، و**مؤشر البناء المعياري(NDBI)** ، و**مؤشر الجزر الحرارية الحضرية.(UHI)** تمثل هذه الطبقات أداة تحليلية أساسية لفهم التغيرات المكانية بين عامي **2011** و**2025**، حيث تم حساب الفرق المكاني لكل مؤشر بين التاريخين المرجعيين وإنتاج خرائط تفاضلية تعكس الاتجاه العام للتحول في الغطاء النباتي، والكثافة العمرانية، ودرجة الحرارة السطحية.

أظهرت هذه الخرائط في نتائجها الأولية **تباينات مكانية واسعة داخل حدود مدينة دمشق،** حيث برزت مناطق ذات مؤشرات تدهور مرتفعة بيئياً، وأخرى أظهرت تحسناً في البنية العمرانية أو عودة تدريجية للحياة. لكن وبالرغم من دقة التحليل الرقمي، كشفت المقارنة الميدانية والمرجعية وجود **تأثيرات جانبية ناتجة عن طبيعة الاستعمالات الخاصة أو عن المشاريع التنظيمية الحديثة،** مما قد يؤدي إلى **تضخيمٍ غير واقعي لقيم التدهور** في بعض المواقع أو إلى **استبعادٍ غير مبرر لتحسينات حقيقية** في مناطق أخرى.لهذا السبب، كان من الضروري إدراج مرحلة **»عوامل التصفية** «ضمن المنهجية التحليلية، بوصفها خطوة منهجية لضبط النتائج وتحسين دقتها قبل احتساب **مؤشر أولوية التأهيل الحضري.(RPI)**



رسم توضيحي 30: الملاحظات الأولية لنتائج التحليل التفاضلي مع عوامل التصفية- عمل الباحث

منهجية بناء عوامل التصفية

تمثل عملية التصفية المكانية (Spatial Filtering) **آلية تقييم نوعي وكمي متقدمة** تهدف إلى مراجعة نتائج التحليل التفاضلي استناداً إلى معايير عمرانية، سياسية، وبيئية.
اعتمدت الدراسة في هذه المرحلة على **التحقق المتقاطع** بين مخرجات التحليل الرقمي (RS/GIS) وبين المعطيات التخطيطية والتنظيمية الرسمية لمدينة دمشق، مع مراجعة صور الأقمار الصناعية عالية الدقة لعامي 2024 و2025،

لتحديد المواقع التي ينبغي **استبعادها أو إضافتها** من التحليل النهائي.
تضمنت هذه العملية نوعين رئيسيين من العوامل:

- **عامل الاستبعاد :(Exclusion Factor)** يستهدف إزالة المناطق التي لا تعكس مؤشرات التدهور فيها واقعاً بيئياً أو عمرانياً فعلياً.
- **عامل الإضافة :(Inclusion Factor)** يهدف إلى إدراج مواقع جديدة اكتسبت أهمية بيئية أو تخطيطية نتيجة تحولات سياسية أو مكانية حديثة.

عامل الاستبعاد(Exclusion Factor)

أظهرت نتائج الخرائط التفاضلية أن بعض المناطق داخل دمشق، وخاصة ذات الكثافة العمرانية المرتفعة أو الخاضعة لتطوير تنظيمي، سجّلت **قيم تدهور سلبية حادة** على مؤشرات NDVI وNDBI، إلا أن هذه القيم **ليست انعكاساً لتدهور فعلي** بل لعمليات **هدم أو إعادة إعمار جارية**.

من أبرز الأمثلة على ذلك:

- **منطقة بساتين الرازي** الواقعة في الجهة الجنوبية الغربية من المدينة، والتي يجري تطويرها حالياً ضمن مشروع **ماروتا سيتي** بموجب **المرسوم التشريعي رقم 66 لعام 2012.** تُظهر الخرائط التفاضلية لهذه المنطقة تراجعاً شبه كامل في مؤشر NDVI نتيجة إزالة الغطاء النباتي القديم، لكن هذا التراجع لا يُعتبر تدهوراً بيئياً بالمعنى السلبي، بل يمثل مرحلة انتقالية ضمن مشروع إعادة التنظيم العمراني .كما أن الارتفاع في مؤشر NDBI ضمنها ناتج عن إنشاء البنية التحتية الجديدة، ما يفرض استبعادها من التحليل النهائي لتجنب تشويش النتائج.
- **مدينة الفيحاء الرياضية ومدينة الجلاء الرياضية وملعب العباسيين** أظهرت أيضاً قيماً متدهورة نتيجة قلة الصيانة خلال فترة المعارك، غير أن طبيعة هذه المنشآت الرياضية، ومساحاتها المفتوحة، تجعلها خارج نطاق التحليل العمراني البيئي المباشر.

- كذلك تم استبعاد **المساحات المزروعة المحيطة بقصر الشعب في دمر الغربية**، إذ ظهرت بانخفاض نسبي في الغطاء النباتي خلال الفترة المدروسة، لكن ذلك مرتبط بأساليب الإدارة الموسمية للمناطق الخضراء المحيطة بالمناطق الرئاسية، وليس ناتجاً عن تدهور بيئي مستمر.

رسم توضيحي 31: الشرائح الرياضية المغنية ضمن تراجع مؤشر NDVI - عمل الباحث

تهدف هذه المرحلة من التصفية إلى ضبط التحيز المكاني الذي قد ينتج عن التحولات التنفيذية أو الإدارية، مما يضمن أن المناطق المندرجة في التحليل النهائي تمثل فعلاً مناطق تدهور بيئي أو عمراني حقيقي ضمن النسيج الحضري الدمشقي.

عامل الإضافة(Inclusion Factor)

على الجانب الآخر، تم خلال عام 2025 تحديد **مواقع جديدة اكتسبت أهمية مكانية واستراتيجية** نتيجة **التحولات السياسية والإدارية الكبرى في البلاد.**
فبعد **سقوط النظام السوري** وما تبعه من إعادة توزيع للوظائف العسكرية والمدنية داخل العاصمة، برزت **فرص عمرانية غير مسبوقة** لإعادة توظيف بعض الأراضي ذات الاستخدام العسكري أو الأمني.

رسم توضيحي 32: حدود مطار المزة العسكري - عمل الباحث

يأتي في مقدمة هذه المواقع **مطار المزة العسكري**، الذي يشغل موقعاً محورياً غرب العاصمة ويمتد على مساحة تقارب **250هكتاراً**.

تُظهر تحليلات المؤشرات أن هذا الموقع، رغم استقراره النسبي خلال العقد الماضي، يمثل **أحد أهم الفراغات الحضرية الكبرى** القابلة للتحول إلى مركز تنموي بيئي وعمراني متكامل، خصوصاً مع اتصاله المباشر بشبكات الطرق الحيوية مثل **أوتوستراد المزة** و**المتحلق الجنوبي**.
بناءً على ذلك، تم إدراج المطار ضمن المناطق المضافة للتحليل باعتباره **منطقة محتملة لإعادة التنمية الخضراء** تسهم في إعادة التوازن البيئي للمدينة وتحقيق الامتداد الحضري المستدام غرب دمشق.

القيمة العلمية لعوامل التصفية

من الناحية العلمية، تمثل هذه المرحلة أحد أهم مراحل ضبط الجودة المنهجية في التحليل المكاني باستخدام الاستشعار عن بعد، إذ تتيح:

- **تحقيق الاتساق بين المؤشرات الرقمية والواقع الميداني،**
- **استبعاد التشويش الناتج عن المشاريع المؤقتة أو القرارات السياسية،**
- و**تحسين موثوقية مؤشر أولوية التأهيل الحضري (RPI)** ليعكس بصورة دقيقة أولويات التدخل البيئي والعمراني الفعلية.

وبذلك، تُعد **عوامل التصفية المكانية** مرحلة ضرورية لضمان أن تكون نتائج الدراسة ناتجة عن **تدهور حقيقي ذي بعد بيئي وإنساني**، لا عن تقلبات تنفيذية أو إدارية عابرة، مما يمنح المنهجية قوة تفسيرية ومصداقية تحليلية عالية على مستوى الدراسات الحضرية والبيئية لمدن ما بعد النزاع.

تحديد القيم التحليلية لكل منطقة لعام 2025

بعد تحديد المناطق الأكثر تأثراً، يتم استخراج القيم الرقمية لمؤشرات NDVI و LSTو NDBIلكل منطقة ضمن نطاق مدينة دمشق لعام 2025.
يُعدّ هذا العام المرجعي مؤشراً للحالة الراهنة التي ستُبنى عليها قرارات التدخل المستقبلية، حيث تُستخدم هذه القيم في احتساب **درجة التدهور البيئي** لكل منطقة بناءً على وزن كل مؤشر في التأثير على جودة البيئة الحضرية.

رسم توضيحي 33: خريطة المناطق الأكثر تأثرا ضمن حدود مدينة دمشقْ - عمل الباحث

النتائج التفصيلية للمناطق المرجحة

اسم المنطقة	نتيجة مؤشر NDVI	نتيجة مؤشر UHI	نتيجة مؤشرNDBI
مطار المزة العسكري	0.10	59 ^{O} C	0.079
كفرسوسة اللوان	0.30	44 ^{O} C	0.053-
القدم	0.10	47 ^{O} C	0.029
جوبر	0.10	44 ^{O} C	0.049
القابون	0.11	46 ^{O} C	0.046
بساتين أبو جرش	0.34	40 ^{O} C	0.054-

جدول 35: النتائج التفصيلية للمناطق المرجحة

تطبيع القيم وتحويلها إلى مقياس موحد(Normalization)

بهدف تحقيق المقارنة العادلة بين المؤشرات المختلفة، تُطبّق عملية **تطبيع رياضية للقيم المستخرجة** وفق الصيغ التي طُوّرت في الفصـــل الثالث من البحث .تســـمح هذه العملية بتحويل القيم إلى **نطاق موحد من 0 إلى 1**، بحيث تعكس القيمة العليا أعلى مستويات التدهور أو الأهمية البيئية.يتيح ذلك دمج المؤشـرات المختلفة ضـمن نظام حسـابي موحد، يمهّد لإنتاج **المؤشر المركّب النهائي للأولوية.RPI**

معادلة الأرقام وتوحيد عملية القياس

استندت عملية المعالجة المكانية الكمية إلى تطبيع القيم الأصلية لمؤشرات الغطاء النباتي(NDVI) ، وجزر الحرارة الحضرية (UHI)، ومؤشر البناء(NDBI) ، بحيث يتم تحويل جميع القيم إلى مجال عددي موحد يتراوح بين
(0 – 1).
يتيح هذا التطبيع إمكانية المقارنة المتكافئة بين المناطق المختلفة على الرغم من اختلاف نطاقات القيم الأصلية لكل مؤشر حيث.تم اعتماد **معادلة التطبيع العامة** التالية:

$$\frac{{}_{min}X - X}{{}_{min}X_{max} - X} = {}_{norm}X$$

حيث:

- X: القيمة الأصلية للمؤشر في المنطقة.
- ${}_{min}X$: أدنى قيمة مسجلة للمؤشر على مستوى المدينة.
- ${}_{max}X$: أعلى قيمة مسجلة للمؤشر.
- ${}_{norm}X$: القيمة المعيارية (المنظمة) الناتجة بين 0 و1.

اعتمدت القيم الحدّية التالية لكل مؤشر:

- **NDVI** من 0 إلى 1
- **UHI** من 27 إلى 60 درجة مئوية
- **NDBI** من -1 إلى +1

أما بالنسبة لمؤشر NDVI ، ونظراً لكون **القيم المنخفضة منه تعكس تدهوراً بيئياً وضعفاً في الغطاء النباتي**، تم عكس الاتجاه الإيجابي للمؤشر بعد التطبيع بحيث يصبح الناتج النهائي وفق المعادلة:

$$_{final}NDVI = 1 - {}_{norm}NDVI$$

وبذلك تمثل القيم الأعلى في Final NDVI مستويات أعلى من الضرر البيئي أو التدهور في الغطاء النباتي

تحليل النتائج وتفسيرها :

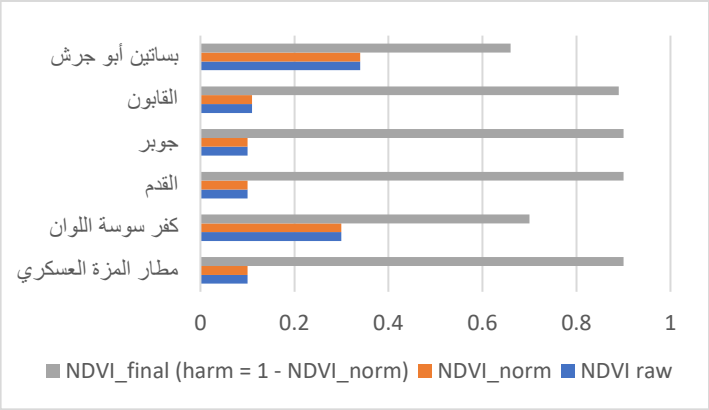
1. تحليل مؤشر NDVI الغطاء النباتي

أظهرت نتائج التطبيع أن معظم المناطق المدروسة تمتلك **قيم NDVI منخفضة جداً** (0.10–0.11)مما يشير إلى **ندرة الغطاء النباتي** وارتفاع مستويات الضرر البيئي .بعد عكس القيم، اتضحت الصورة التالية:

المنطقة	NDVI raw	NDVI_norm	NDVI_final (harm = 1 - NDVI_norm)
مطار المزة العسكري	0.10	0.1000	**0.9000**
كفرسوسة اللوان	0.30	0.3000	**0.7000**
القدم	0.10	0.1000	**0.9000**
جوبر	0.10	0.1000	**0.9000**
القابون	0.11	0.1100	**0.8900**
بساتين أبو جرش	0.34	0.3400	**0.6600**

جدول 36: قيم مؤشر NDVI شاملة القيم بعد عملية المعادلة والعكس

- **مطار المزة العسكري، القدم، جوبر، القابون** سجلت جميعها نتائج مرتفعة في مؤشر الضرر (0.89–0.90≈)، ما يعكس **تدهوراً واضحاً في الغطاء النباتي** نتيجة الأنشطة العسكرية أو الدمار العمراني خلال العقد الماضي.
- **كفرسوسة اللوان** حققت قيمة متوسطة (0.70)، ما يدل على وجود **غطاء نباتي محدود جزئياً** أو تحسن نسبي بعد إعادة الإعمار الجزئي.
- **بساتين أبو جرش** تميزت بأقل ضرر نسبي (0.66) مما يشير إلى **بقاء أجزاء من الغطاء الزراعي القديم** في المنطقة.



رسم توضيحي 34: مخطط قيم NDVI قبل وبعد المعادلة مع القيم النهائية للمناطق المدروسة

إجمالاً، تُظهر النتائج أن المؤشر النباتي يؤكد **الطابع شبه الجاف المتدهور** للأحياء المدروسة، مع تركز الضرر البيئي الأكبر في المناطق ذات الكثافة البنائية العالية.

2. تحليل مؤشرUHI الجزيرة الحرارية الحضرية

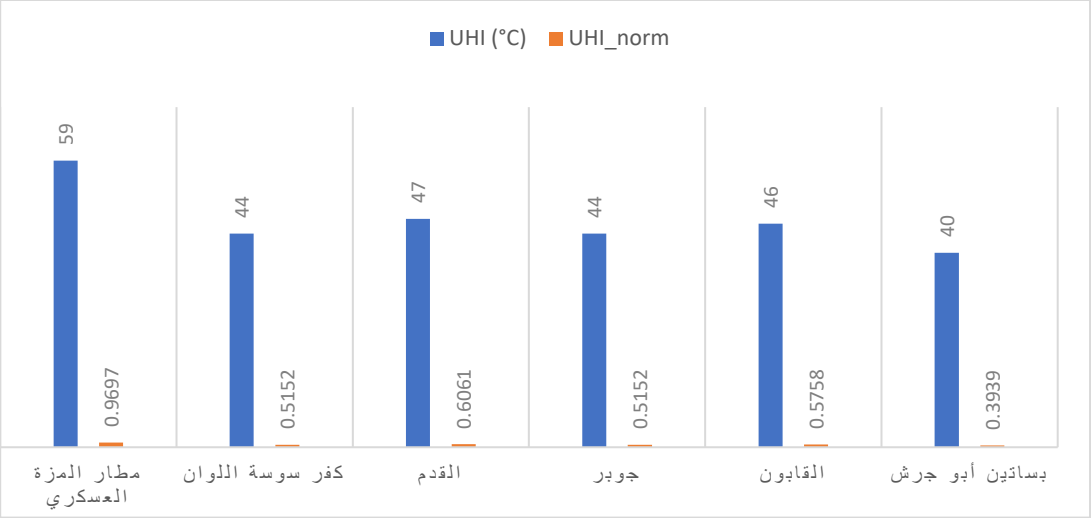
اعتمدت قيم مؤشر UHI على درجات الحرارة السطحية.(27–60°C) بعد التطبيع، تبين أن:

- **مطار المزة العسكري** سجل أعلى قيمة (0.97)، ما يشير إلى **ذروة التأثر الحراري** نتيجة الأسطح الإسفلتية والمباني غير المشجرة.
- **القدم، القابون، وجوبر** تقع ضـــمن النطاق المتوســـط (0.51–0.60)، مما يعكس **تأثرها الحراري المرتفع ولكن الأقل حدة** من المطار.
- **كفرسوسة اللوان** أظهرت نتيجة متوسطة (0.51) تدل على **تحسن نسبي في البيئة الحرارية** نتيجة بعض المناطق المفتوحة.
- **بســـاتين أبو جرش** أظهرت أقل القيم (0.39)، وهو ما يتطابق مع طبيعتها الزراعية الســـابقة التي تقلل من امتصاص الحرارة وتزيد التبخر.

بذلك يؤكد تحليل مؤشـــر UHI أن المناطق التي فقدت غطاءها النباتي أو تحتوي على كثافة بنائية مرتفعة هي الأكثر عرضـــة **للاحتباس الحراري الحضري**.

المنطقة	UHI (°C)	UHI_norm
مطار المزة العسكري	59.0	**0.9697**
كفرسوسة اللوان	44.0	**0.5152**
القدم	47.0	**0.6061**
جوبر	44.0	**0.5152**
القابون	46.0	**0.5758**
بساتين أبو جرش	40.0	**0.3939**

جدول 37 : قيم مؤشر LST شاملة القيم بعد عملية المعادلة



رسم توضيحي 35: قيم مؤشر LST شاملة القيم بعد عملية المعادلة

3. تحليل مؤشر NDBI مؤشر البناء الحضري

يشير مؤشر NDBI إلى مدى تحوّل السطوح إلى مواد بنائية (خرسانة، إسفلت...).
القيم الموجبة العالية تعني زيادة في البنية الصلبة مقابل تراجع في الغطاء الطبيعي.

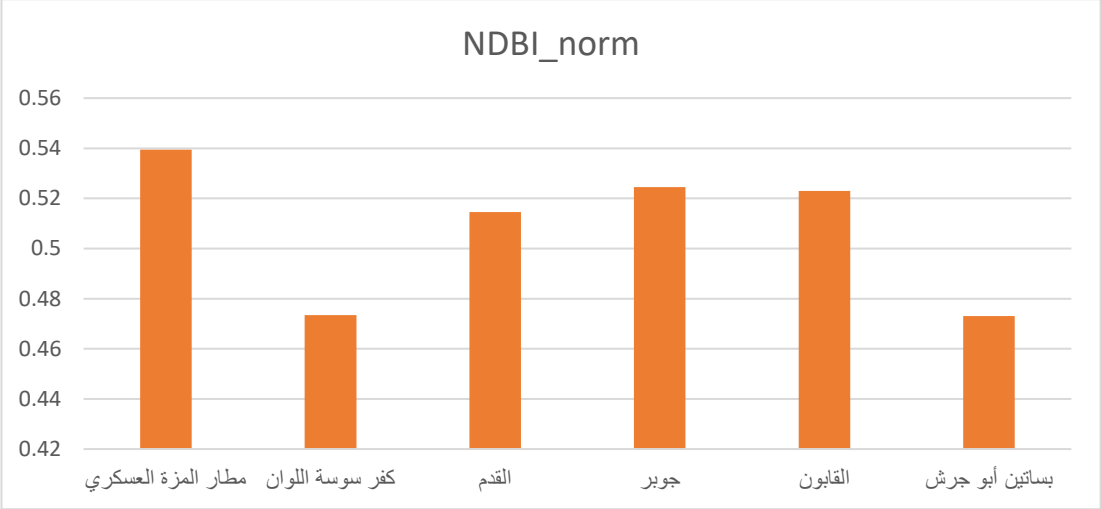
- **مطار المزة العسكري** يمتلك أعلى قيمة (0.54)، ما يعكس **هيمنة السطوح الصلبة والمنشآت العسكرية**.
- **جوبر، القابون، القدم** سجلت نتائج بين (0.51–0.52)، وهي قيم مرتفعة تؤكد **الطابع العمراني الكثيف والمناطق المتضررة والمكتظة**.
- **كفرسوسة اللوان وبساتين أبو جرش** سجّلتا أدنى القيم (0.47)، ما يشير إلى **وجود مزيج عمراني–زراعي** أو إلى مناطق ما زالت في طور إعادة الإعمار.

يشير ذلك إلى أن مؤشر NDBI يتوافق بشدة مع كل من NDVI وUHI، حيث **تتطابق المناطق ذات البناء الكثيف مع ضعف الغطاء النباتي وارتفاع الحرارة السطحية**.

المنطقة	NDBI raw	NDBI_norm
مطار المزة العسكري	0.079	**0.5395**
كفر سوسة اللوان	-0.053	**0.4735**
القدم	0.029	**0.5145**
جوبر	0.049	**0.5245**
القابون	0.046	**0.5230**

المنطقة	NDBI raw	NDBI_norm
بساتين أبو جرش	-0.054	**0.4730**

جدول 38: قيم مؤشر NDBI شاملة القيم بعد عملية المعادلة

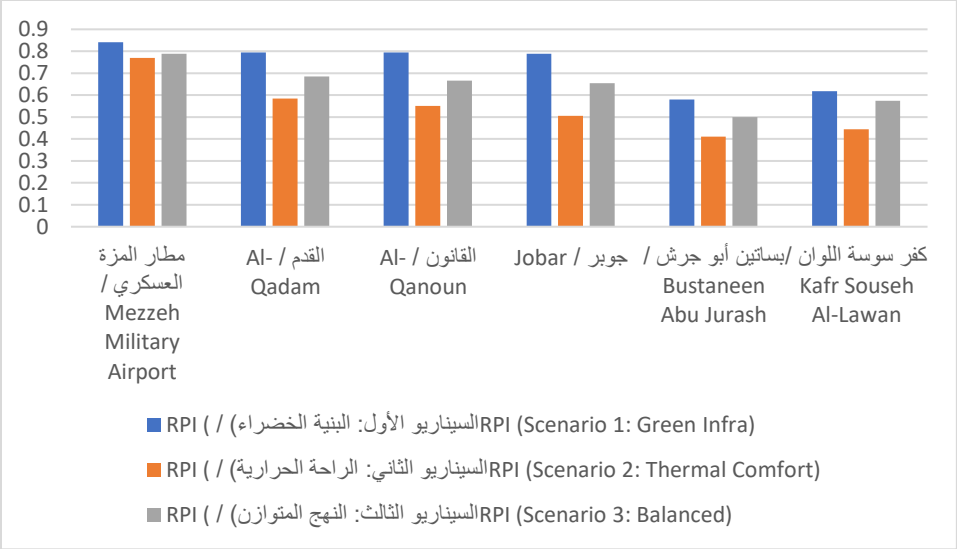


رسم توضيحي 36: قيم مؤشر NDBI بعد عملية المعادلة

4. الاستنتاج العام

تكشف الجداول المعيارية أن المناطق المدروسة في دمشق تشهد تبايناً واضحاً في حالتها البيئية والعمرانية:

- مناطق مثل **المزة العسكرية، جوبر، القدم، القابون** تمثل بؤراً عمرانية ساخنة منخفضة الغطاء النباتي، تحتاج إلى **أولوية في برامج التأهيل البيئي.**
- بينما **كفرسوسة اللوان وبساتين أبو جرش** تظهر بوادر استقرار نسبي، يمكن اعتبارها **مناطق داعمة للتوازن الحراري والبيئي** ضمن النسيج الحضري.



رسم توضيحي 37: توضيح قيم الشرائح المدروسة النهائية وفقاً لكل سيناريو

التحليل النهائي وتحديد الأولويات
(Final RPI Calculation & Prioritization)

في المرحلة الختامية، تُدمج القيم المعيارية والوزنية للمؤشرات ضمن معادلة **مؤشر الأولوية المركّب (RPI)** التي طُوّرت خصيصاً لهذا البحث، لإنتاج **خريطة مكانية صريحة للأولويات الحضرية**. تمثل هذه الخريطة الناتج التطبيقي الأهم للدراسة، إذ تُظهر **الدرجات المكانية للأولوية** على مستوى المدينة، وتُتيح تصنيف الأراضي إلى فئات:

- مناطق حرجة تحتاج لتدخل عاجل.
- مناطق متوسطة الأولوية.
- مناطق مستقرة نسبياً يمكن مراقبتها دون تدخل مباشر.

يُستكمل هذا التحليل بمناقشةٍ تفسيرية للنتائج في الفصل اللاحق، تُظهر العلاقة بين المؤشرات البيئية والسياق العمراني والاجتماعي، وتُسهم في بناء توصيات عملية موجهة لصنّاع القرار الحضري في دمشق.

نتائج مؤشر RPI للمناطق المرجحة لعام 2025 وفقاً للسيناريوهات:

السيناريو الأول: البنية التحتية الخضراء(Green Infrastructure Priority)

يهدف هذا السيناريو إلى تعزيز الغطاء النباتي، مع إعطاء الأولوية القصوى لمؤشر **NDVI**الوزن: 0.60

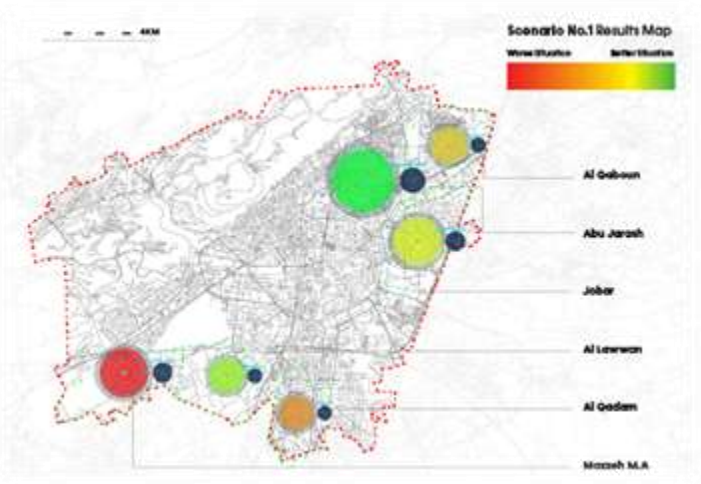
الأوزان المعتمدة wNDVI=0.60 :، wUHI=0.20، wNDBI=0.20

المنطقة	المعادلة بالتفصيل	RPIالنهائي	الترتيب
مطار المزة العسكري	(0.9000×0.60)+(0.9697×0.20)+(0.5395×0.20)	**0.8418**	**1**
كفرسوسة اللوان	(0.7000×0.60)+(0.5152×0.20)+(0.4735×0.20)	**0.6177**	**6**
القدم	(0.9000×0.60)+(0.6061×0.20)+(0.5145×0.20)	**0.7941**	**2**
جوبر	(0.9000×0.60)+(0.5152×0.20)+(0.5245×0.20)	**0.7879**	**4**
القابون	(0.8900×0.60)+(0.5758×0.20)+(0.5230×0.20)	**0.7938**	**3**
بساتين أبو جرش	(0.6600×0.60)+(0.3939×0.20)+(0.4730×0.20)	**0.5794**	**5**

جدول 39: نتائج مؤشر RPI للمناطق المرجحة لعام 2025 وفقاً للسيناريو الأول

ملخص السيناريو الأول

يركز هذا السيناريو على **فقدان الغطاء النباتي** .تتصدر **مطار المزة العسكري** المرتبة الأولى، تليها **القدم** و **القابون**، نظراً لارتفاع قيم **NDVI final (harm)** فيها. هذا الترتيب يحدد المناطق التي تحتاج إلى **أولوية عاجلة** لإنشاء البنية التحتية الخضراء.



رسم توضيحي 38: خريطة ترتيب نتائج السيناريو اللأول وفقاً لموقع كل شريحة

السيناريو الثاني: الراحة الحرارية(Thermal Comfort)

يركز هذا السيناريو على تحسين الراحة الحرارية، مع إعطاء الأولوية الرئيسية لمؤشر **UHI**الوزن: 0.60

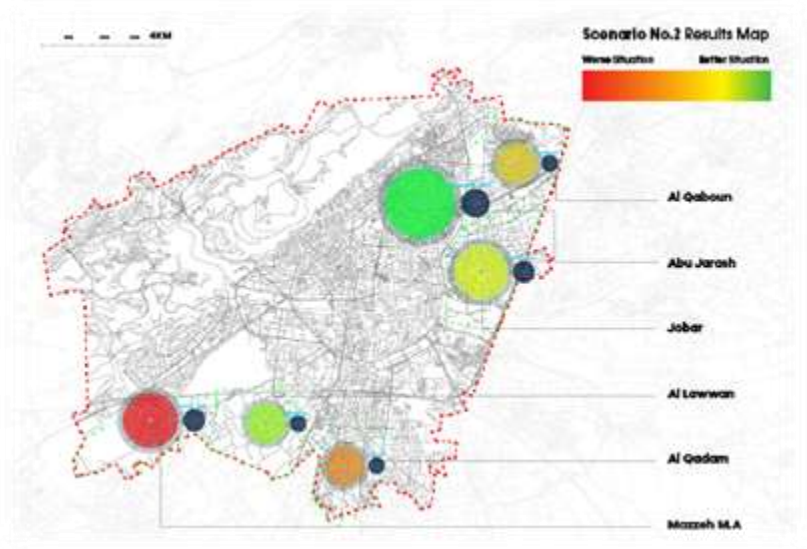
الأوزان المعتمدة wNDVI=0.20 :، wUHI=0.60، wNDBI=0.20

المنطقة	المعادلة بالتفصيل	RPIالنهائي	الترتيب
مطار المزة العسكري	(0.9000×0.20)+(0.9697×0.60)+(0.5395×0.20)	**0.7697**	**1**
كفرسوسة اللوان	(0.7000×0.20)+(0.5152×0.60)+(0.4735×0.20)	**0.4437**	**5**
القدم	(0.9000×0.20)+(0.6061×0.60)+(0.5145×0.20)	**0.5846**	**2**
جوبر	(0.9000×0.20)+(0.5152×0.60)+(0.5245×0.20)	**0.5059**	**4**
القابون	(0.8900×0.20)+(0.5758×0.60)+(0.5230×0.20)	**0.5511**	**3**
بساتين أبو جرش	(0.6600×0.20)+(0.3939×0.60)+(0.4730×0.20)	**0.4109**	**6**

جدول 40: : نتائج مؤشر RPI للمناطق المرجحة لعام 2025 وفقاً للسيناريو الثاني

ملخص السيناريو الثاني

يهدف هذا السيناريو إلى **مكافحة الجزر الحرارية** . تحافظ **مطار المزة العسكري** على المركز الأول بفارق كبير، نظراً لقيمة **UHI المعيارية العالية جداً (0.9697)**. هذا يحددها كأعلى أولوية للتدخل الذي يركز على خفض الحرارة. وتأتي **القدم** في المركز الثاني .



رسم توضيحي 41: خريطة ترتيب نتائج السيناريو الثاني وفقاً لموقع كل شريحة

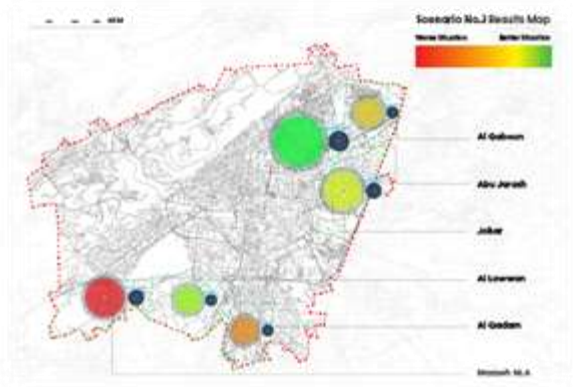
السيناريو الثالث: النهج المتوازن (Balanced Approach)

يهدف هذا السيناريو إلى تحقيق توازن بين تعزيز الغطاء الأخضر وخفض الحرارة، مع إعطاء وزن متساوٍ تقريباً للمؤشرين الرئيسيين.

الأوزان المعتمدة wNDVI=0.40 :، wUHI=0.40، wNDBI=0.20

المنطقة	المعادلة بالتفصيل	RPIالنهائي	الترتيب
مطار المزة العسكري	(0.9000×0.40)+(0.9697×0.40)+(0.5395×0.20)	**0.7879**	**1**
كفرسوسة اللوان	(0.7000×0.40)+(0.5152×0.40)+(0.4735×0.20)	**0.5737**	**5**
القدم	(0.9000×0.40)+(0.6061×0.40)+(0.5145×0.20)	**0.6853**	**2**
جوبر	(0.9000×0.40)+(0.5152×0.40)+(0.5245×0.20)	**0.6539**	**4**
القابون	(0.8900×0.40)+(0.5758×0.40)+(0.5230×0.20)	**0.6654**	**3**
بساتين أبو جرش	(0.6600×0.40)+(0.3939×0.40)+(0.4730×0.20)	**0.4994**	**6**

جدول 41: : نتائج مؤشر RPI للمناطق المرجحة لعام 2025 وفقاً للسيناريو الثالث



ملخص السيناريو الثالث

يعكس هذا الســيناريو **النهج المتكامل** الذي يوازن بين الحاجة للغطاء النباتي وخفض الحرارة. تتصــدر **مطار المزة العســكري** المرتبة الأولى، حيث تجمع بين أعلى مستويات الضرر في كلا المؤشرين الرئيسيين. وتليها **القدم** و**القابون** كأولويات للتدخل المتوازن.

رسم توضيحي44 : خريطة ترتيب نتائج السيناريو الثالث وفقاً لموقع كل شريحة

ملخص مقارن نهائي للنتائج وترتيب الأولويات

يوضح الجدول التالي نتائج مؤشر RPIوالترتيب النهائي لكل منطقة عبر السيناريوهات الثلاثة

المنطقة	السيناريو	الترتيب(Rank 1)	السيناريو 2	الترتيب(Rank 2)	السيناريو 3	الترتيب(Rank 3)
مطار المزة العسكري	**0.8418**	**1**	**0.7697**	**1**	**0.7879**	**1**
القدم	0.7941	2	0.5846	2	0.6853	2
القابون	0.7938	3	0.5511	3	0.6654	3
جوبر	0.7879	4	0.5059	4	0.6539	4
كفرسوسة اللوان	0.6177	6	0.4437	5	0.5737	5
بساتين أبو جرش	0.5794	5	0.4109	6	0.4994	6

جدول 42: نتائج مؤشر RPI والترتيب النهائي لكل منطقة عبر السيناريوهات الثلاثة

الاستنتاج العام للتحليل

- **الأولوية المطلقة للتدخل :**تُعتبر **مطار المزة العسكري** هي المنطقة ذات الأولوية المطلقة (المرتبة الأولى في جميع السيناريوهات)، مما يشير إلى أن تدهورها البيئي والمناخي هو الأشد، ويتطلب تدخلاً عاجلاً ومتكاملاً بغض النظر عن التركيز المعتمد.
- **ثبات الأولوية :**تحافظ كل من **القدم** و **القابون** على مراكز متقدمة (المرتبة الثانية والثالثة) في جميع السيناريوهات، مما يجعلهما منطقتين ذات أولوية عالية مستمرة للتدخل.
- **التأثير الموزون :**على الرغم من تبدل الترتيب بين **جوبر** و **بساتين أبو جرش** و **كفر سوسة اللوان**، إلا أن المناطق الأربع الأولى (مطار المزة، القدم، القابون، جوبر) **تبقى هي الأكثر تضرراً وتستحوذ على أعلى قيم RPI، ما يؤكد ضرورة توجيه أغلب الموارد إليها أولاً .**

رسم توضيحي 45: حدود مطار المزة العسكري - عمل الباحث

الفصل السابع: تحليل النتائج والتوصيات

7.1 تحليل النتائج العامة

يهدف هذا الفصل إلى تقديم قراءة تحليلية معمّقة للنتائج المستخلصة من الحالة الإسقاطية ضمن مدينة دمشق، وذلك من خلال دراسة الأثر المحتمل لتحويل **مطار المزة العسكري** إلى مساحة خضراء كبرى تشكّل "رئة حضرية" للمدينة، وانعكاس ذلك على المؤشرات البيئية الكمية، وبشكل خاص على **مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI)** لعام 2025.

تُظهر نتائج التحليل أن القيمة العامة لمؤشر NDVI لمدينة دمشق في عام 2025 تبلغ حوالي **0.21**فقط، وهو رقم منخفض يعكس التدهور الكبير في الغطاء النباتي نتيجة النمو العمراني غير المنظم وامتداد المناطق الإسمنتية خلال سنوات الصراع .في المقابل، تبلغ مساحة مطار المزة العسكري نحو **490هكتاراً**، أي ما يعادل **4.66%تقريباً من إجمالي مساحة المدينة** المقدّرة بـ **10,500هكتار**، وهو موقع شبه خالٍ من السكن، ما يجعله من **أنسب المواقع لإعادة التأهيل البيئي** دون أي تعارض اجتماعي أو سكني.

7.2 الأثر الكمي لتحويل مطار المزة إلى رئة خضراء

أولاً: المعطيات الحسابية الأساسية

- مساحة مدينة دمشق: 10.500 هكتار
- مساحة مطار المزة العسكري: 490 هكتار
- NDVIالعام لدمشق عام 2025: 0.21
- NDVIالحالي لمطار المزة: 0.10
- القيم المستهدفة بعد التحويل إلى مساحة خضراء 0.70 – 0.65.

ثانياً: معادلة التغيير في NDVI العام للمدينة

$$NDVI_{new} = ((A_city * NDVI_city_current) - (A_mazzeh * NDVI_mazzeh_current) + (A_mazzeh * NDVI_mazzeh_future)) / A_city$$

- A_city المساحة الكلية لمدينة دمشق (هكتار)
- A_mazzeh مساحة مطار المزة (هكتار)
- $NDVI_city_current$: قيمة NDVI الحالية للمدينة
- $NDVI_mazzeh_current$) قيمة NDVI الحالية للمطار
- $NDVI_mazzeh_{future}$ القيمة المستهدفة بعد تحويل المطار إلى رئة خضراء
- $NDVI_{new}$ القيمة الجديدة لمؤشر NDVI العام لمدينة دمشق بعد التحويل

ثالثاً: النتائج العددية

الحالة	القيمة المستهدفة لـ NDVI في المطار	NDVIالعام الجديد لدمشق	الزيادة المطلقة	نسبة التحسن
الحالة الحالية (قبل التحويل)	**0.10**	**0.210**	—	—
بعد التحويل إلى 0.65	**0.65**	**0.236**	+0.026	**+12.3%**
بعد التحويل إلى 0.70	**0.70**	**0.239**	+0.029	**+13.8%**

جدول 43: جدول يوضح نسبة التحسن باختلاف قيمة NDVI

تحليل النتائج

- تُظهر النتائج أن **رفع NDVI لمطار المزة من 0.10 إلى 0.65 فقط** يؤدي إلى ارتفاع متوسط NDVI العام لمدينة دمشق من **0.21إلى نحو 0.236**، أي **تحسن نسبي يقارب 12 %**في المؤشر العام للغطاء النباتي للمدينة.

رسم توضيحي 46: تصور محاكاة تحويل مطار المزة العسكري لرئة خضراء لمدينة دمشق -عمل الباحث

- وإذا تم رفعه إلى **0.70**، فإن المتوسط الكلي يرتفع إلى **0.239**، أي بزيادة نسبية تبلغ نحو **13.8%**، وهو أثر بيئي كبير ينتج عن **موقع واحد فقط** ضمن نسيج المدينة.

هذه النتيجة الكمية تبيّن أن التأثير المحتمل لتحويل المطار إلى مساحة خضراء واسعة لا يقتصر على قيم المؤشر فحسب، بل يمتد إلى تحسين جودة الهواء، خفض درجات الحرارة السطحية(UHI) ، وتحقيق توازن بيئي جديد ضمن النسيج الحضري.

7.3 التفسير البيئي والمكاني للنتائج

يشكّل **مطار المزة العسكري** موقعًا استراتيجيًا ضمن البنية المكانية لدمشق، إذ يقع على تقاطع محورين حيويين: الأول هو **محور وادي بردى غربًا**، والثاني هو **المحور الجنوبي لمدينة كفرسوسة والميدان شرقًا**.
تحويل هذا الموقع إلى **رئة خضراء مركزية** سيسمح بما يلي:

رسم توضيحي 49: تصور محاكاة تحويل مطار المزة العسكري لرئة خضراء لمدينة دمشق ضمن السياق - عمل الباحث

1. **تحسين التهوية الطبيعية للمدينة** عبر تدفق الرياح الغربية والجنوبية الغربية نحو المركز، وبالتالي تقليل الجزر الحرارية الحضرية التي ترتفع حاليًا بمعدل يتجاوز 47 درجة مئوية في بعض النقاط عام 2025 مقارنة بـ 40 درجة عام 2011.
2. **إعادة توزيع التوازن الإيكولوجي** بين الجهة الغربية والوسطى للمدينة، عبر خلق محور بيئي جديد يربط بين نهر بردى وحدائق كفرسوسة.
3. **رفع الكفاءة البيئية للمدينة ككل**، إذ أن هذا الموقع الكبير الخالي من المساكن يتيح إنشاء منظومة خضراء شجرية مستمرة دون الحاجة إلى إزالة أو تعويض سكني، مما يجعله المشروع الأقل كلفة والأكثر قابلية للتنفيذ.
4. **تحقيق أثر بصري ونفسي واجتماعي إيجابي** في وسط المدينة المكتظ، عبر توفير مساحة ترفيهية وتنفس حضري تقلّص الضغط البيئي والاجتماعي على المناطق المجاورة.

7.4 التحليل المقارن لخيارات التدخل

استنادًا إلى السيناريوهات الثلاثة التي تم تحليلها ضمن الفصل الرابع لمؤشر أولوية إعادة التأهيل**(RPI)** ، يتضح أن **السيناريو الأول – سيناريو البنية التحتية الخضراء** هو الأكثر ارتباطًا بتحسين مؤشرات المدينة بشكل مباشر. وذلك لأن **جميع المؤشرات البيئية (NDVI, NDBI, UHI)** ترتبط ارتباطًا وثيقًا بمساحات الغطاء النباتي، أي أن زيادة المساحات الخضراء تؤدي تلقائيًا إلى:

- **خفض درجات حرارة السطح (UHI)،**
- **تقليل الكثافة البنائية غير المنفذة للمياه (NDBI)،**

- **تحسين مؤشر الغطاء النباتي(NDVI)** ،
- **تحسين الراحة الحرارية والجودة الميكرو-مناخية** للمناطق الحضرية.

من هذا المنطلق، يُعتبر **السيناريو الأول هو الخيار الأمثل والأقل كلفة والأسرع تنفيذاً**، لكونه لا يتطلب أعمال بنية تحتية معقدة أو تدخلات عمرانية كبرى، بل يركّز على استثمار الأراضي القابلة للتحويل مباشرة إلى وظائف بيئية.

7.5 التوصيات النهائية

1. **اعتماد تحويل مطار المزة العسكري كأولوية استراتيجية بيئية لدمشق**، إذ يُظهر التحليل الكمي أنه وحده قادر على رفع قيمة NDVI للمدينة بنسبة تتراوح بين **12–14%**، وهو تحسن كبير على مستوى مؤشّر مدينة كاملة.
2. **تصميم مشروع "رئة دمشق الخضراء "**كمجال بيئي متكامل يشمل غطاءً نباتياً كثيفاً وممرات تهوية حضرية، ومناطق استراحة عامة وحدائق ترفيهية، مع ربطه بمحاور نهر بردى وكفرسوسة لتعزيز الاتصال الإيكولوجي.
3. **دمج نتائج هذا التحليل في منظومة دعم القرار البلدي (SDSS)** لتكون نواةً لبرنامج إعادة تأهيل شامل لبقية الأراضي المتروكة، مع متابعة دورية لمؤشرات NDVI و UHIبشكل سنوي باستخدام صور الأقمار الصناعية.
4. **اعتبار هذا الموقع نقطة انطلاق لمشروعات البنية التحتية الخضراء** المستقبلية في دمشق، مع ضمان أن يبقى التركيز على الأراضي الخالية أو غير المأهولة لتجنّب التعارضات الاجتماعية والملكية.

7.6 الخلاصة التحليلية

يُظهر هذا التحليل أن التحوّل المقترح في مطار المزة العسكري من أرض منخفضة الغطاء النباتي إلى **رئة خضراء حضرية** يمكن أن يغيّر البصمة البيئية لمدينة دمشق على مستوى المدينة بأكملها، ليس فقط من حيث قيم NDVI بل من حيث التوازن الحراري، والراحة البيئية، وجودة الحياة. وتبرز أهميته في كونه **الموقع الوحيد القابل للتحويل الكامل دون آثار اجتماعية أو إسكانية سلبية**، مما يجعل هذا الخيار **الأقل كلفة، والأكثر جدوى، والأسرع أثراً** ضمن جميع المواقع المدروسة.

وبذلك، يشكّل هذا المشروع المقترح **نقطة ارتكاز لتخطيط بنية تحتية خضراء مستدامة** في دمشق، قادرة على استعادة التوازن البيئي المفقود، ورفع مؤشرات المرونة الحضرية ضمن مسار طويل الأمد لإعادة بناء المدينة بطريقة أكثر صحة واستدامة.

الخاتمة

تشكل هذه الأطروحة محاولة علمية جادة لإعادة تعريف مفهوم **الأراضي الحضرية المتروكة** في مدينة دمشق، من مجرد فراغات فقدت وظيفتها إلى **مخزون مكاني استراتيجي** يمكن أن يشكّل رافعة أساسية في عملية التعافي البيئي والاجتماعي ما بعد الصراع. وقد سعت الدراسة من خلال منهجيتها الجيومكانية متعددة المعايير إلى تقديم نموذج تحليلي وعملي متكامل يربط بين **التحليل المكاني الكمي** و**اتخاذ القرار التخطيطي المستند إلى الأدلة**، في إطار رؤية أوسع تستهدف بناء مدينة أكثر استدامة وإنصافًا.

أثبتت النتائج المستخلصة من تطبيق المنهجية على مدينة دمشق بين عامي **2011** و**2025** قدرة **نموذج التقييم متعدد المعايير (MCE)** على دمج المؤشرات البيئية(NDVI) ، NDBI، (UHIضمن منظومة تحليلية واحدة قادرة على تشخيص أنماط التدهور البيئي والعمراني بدقة مكانية وزمنية عالية. وقد أظهرت مخرجات **مؤشر أولوية إعادة التأهيل (RPI)** أن بعض المناطق الحضرية – وفي مقدمتها **مطار المزة العسكري** –تمثل نقاط تحوّل حاسمة يمكن أن تسهم إعادة تأهيلها في تحسين مؤشرات البيئة الحضرية ورفع متوسط الغطاء النباتي وتقليص شدّة الجزر الحرارية. إن هذا التحليل الكمي يؤكد أن **إعادة تأهيل الأراضي المتروكة** ليست مجرد خيار جمالي أو عمراني، بل ضرورة بيئية استراتيجية تمسّ جودة الحياة واستدامة المدينة على المدى الطويل.

من الناحية المنهجية، أبرزت الدراسة أن **دمج أدوات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في إطار نظم دعم القرار المكاني (SDSS)** يمثل نقلة نوعية في آليات التخطيط الحضري في البيئات محدودة البيانات، مثل السياق السوري. فقد أتاحت هذه المنهجية تجاوز العقبات التقليدية المرتبطة بندرة المعلومات الميدانية، عبر بناء قاعدة بيانات مكانية موثوقة وقابلة للتحديث، مما يمكّن من **تحليل التغيرات الحضرية** ورصد التحولات البيئية بموضوعية ودقة غير مسبوقة. كما أثبتت التجربة البحثية أنّ **التحليل الجيومكاني متعدد المعايير** يمكن أن يتحول إلى أداة تخطيطية عملية لدعم اتخاذ القرار، خصوصًا عندما يُربط بمفاهيم العدالة المكانية والاستدامة البيئية.

وعلى المستوى النظري، ساهمت الأطروحة في إثراء الأدبيات العلمية من خلال طرح مفهوم »**التحليل الجيومكاني للتعافي الحضري** «كإطار فكري جديد يجمع بين تقنيات التحليل المكاني وفلسفة التخطيط المستدام. ويُعدّ هذا المفهوم محاولة لتجاوز الفجوة بين المعرفة التقنية والتخطيط الإنساني، إذ يسعى إلى توظيف البيانات المفتوحة في خدمة أهداف العدالة البيئية والاجتماعية، وتحويل أدوات العلم من مجرد أدوات قياس إلى **وسائل توجيه للسياسات الحضرية**.

أما من الناحية التطبيقية، فإن المنهجية المقترحة تفتح آفاقًا جديدة أمام **المؤسسات التخطيطية والبحثية في سوريا** لتطوير أنظمة دعم قرار وطنية تعتمد على البيانات الجيومكانية المفتوحة، وتعمل على توجيه الموارد نحو المناطق ذات الأولوية القصوى بيئيًا واجتماعيًا. إن تطبيق هذا النموذج بشكل موسّع يمكن أن يوفّر **مرجعية كمية** لتخطيط برامج إعادة الإعمار، ولتقييم أثر المشاريع على البيئة الحضرية والمجتمع المحلي، بما يضمن تحقيق التكامل بين **التحليل العلمي** و**الرؤية التنموية**.

كما تؤكد الدراسة أنّ تحقيق التحول نحو مدينة أكثر مرونة واستدامة لا يمكن أن يتم بمعزل عن **تبني نهج تشاركي متعدد المستويات**، يجمع بين الباحثين، والسلطات المحلية، والمجتمع المدني، ومطوري السياسات. فالبيانات الجيومكانية لا تكتسب قيمتها إلا حين تتحول إلى **معرفة تشاركية** تُستخدم في صنع القرار على نحو شفاف ومنصف.

وبذلك تضـع الأطروحة الأسـاس لبناء نموذج تخطيطي جديد لدمشـق، يعتمد على العلم والعدالة كركيزتين متكاملتين لإعادة تشكيل المدينة على نحو مستدام.

وفي المحصـلة، تبرهن هذه الأطروحة أن **المعرفة المكانية قادرة على إحداث أثر فعلي في عملية التعافي الحضـري**، حين تُوظّف ضـمن إطار اسـتراتيجي قائم على المنهجية، والكم، والرؤية البيئية. فدمشـق، كما تصـوّرها هذه الدراسـة، ليست مدينة تتعافى عمرانيًا فحسب، بل **مدينة تُشفى بيئيًا واجتماعيًا** عبر إعادة توظيف مساحاتها المنسية، وتحويل جروحها الحضرية إلى **شبكة خضراء نابضة بالحياة**. وبذلك، لا تنتهي هذه الأطروحة بنتائجها الكمية فحسب، بل **تفتح أفقًا فكريًا جديدًا** نحو إعادة صياغة العلاقة بين البيئة والعمران، بين الذاكرة والمستقبل، وبين العلم والسياسة، لتصبح **المدينة أداة للشفاء لا للحصار**، ومختبرًا حيًا لتجسيد مفاهيم العدالة المكانية والاستدامة في قلب الواقع السوري.

المراجع

أولاً: المراجع العربية

1. أبو ديب، نسرين .(2018) *التخطيط المستدام للمدن العربية: مقاربات بيئية واجتماعية جديدة* .دمشق: الهيئة العامة للتخطيط الإقليمي.
2. عبد الكريم، وسيم .(2020) *تحليل استخدامات الأراضي في المدن السورية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية* .جامعة دمشق – كلية الهندسة المعمارية.
3. الحمصي، خالد .(2017) *مدخل إلى نظم دعم القرار المكاني: المفهوم والتطبيقات* .مجلة جامعة دمشق للهندسة المعمارية، المجلد 33، العدد 2.
4. القادري، ناصر .(2016) *البيئة الحضرية في سوريا بعد الأزمة: مشكلات وحلول مستدامة* .المركز العربي للدراسات المستقبلية.
5. شحادة، رانيا .(2021) *تحليل التغيرات المكانية في الغطاء النباتي باستخدام بيانات الأقمار الصناعية – دراسة حالة: الغوطة الشرقية* .جامعة البعث.
6. خليل، أحمد .(2019) *التحول العمراني في المدن السورية: قراءة في آثار الصراع على البنية المكانية* . مجلة عمران، المركز العربي للأبحاث ودراسة السياسات.
7. الزعبي، علاء .(2015) *تطبيق نظم المعلومات الجغرافية في تحليل الظواهر البيئية في المدن العربية* . جامعة تشرين – قسم الجغرافيا.
8. وزارة الإدارة المحلية والبيئة .(2022) *الإستراتيجية الوطنية لإعادة الإعمار والتنمية المستدامة في سوريا* . دمشق.
9. برنامج الأمم المتحدة الإنمائي – مكتب دمشق .(2023) *دليل التنمية الحضرية المستدامة في البيئات المتأثرة بالأزمات* .ترجمة خاصة.
10. سلامة، مهند .(2014) *البنية التحتية الخضراء في المدن العربية: المفهوم والتطبيق* .المعهد العربي للتخطيط – الكويت.
11. بربور، ليلى .(2020) *إعادة تأهيل المناطق المتدهورة حضرياً: إطار مقترح للمدن السورية بعد الحرب* . جامعة حلب.
12. مركز الدراسات العمرانية بجامعة دمشق .(2024) *رؤية دمشق 2040: نحو مدينة خضراء مرنة ومستدامة* .دمشق.
13. الريس، منى (2019) دور شبكات المدن الثانوية في التنمية الإقليمية – (حالة دراسية إقليم القلمون)
14. العذبة، محمد (2018) استراتيجيات رفع أداء البيئات المكانية للمدن من خلال مفهوم الممرات الإيكولوجية

ثانياً: المراجع الأجنبية:

1. Abubakar, I., & Aina, Y. A. (2016). The role of GIS in sustainable urban development in the MENA region. *Habitat International*, 56, 81–92.
2. Ahern, J. (2007). Green infrastructure for cities: The spatial dimension. In V. Novotny & P. Brown (Eds.), *Cities of the Future: Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management* (pp. 267–283). IWA Publishing.
3. Ahern, J. (2013). Urban Landscape Sustainability and Resilience: The Promise and Challenges of Integrating Ecology with Urban Planning. *Landscape Ecology*, 28(6), 1203–1212.
4. Alawadi, K. (2017). Rethinking Urban Vacant Lands: The Role of Urban Design in Sustainable Redevelopment. *Journal of Urban Design*, 22(2), 155–175.
5. Al-Hathloul, S., & Mughal, M. (2004). *Urban Development in Saudi Arabia: Challenges and Opportunities.* Ministry of Municipal and Rural Affairs.
6. Alshuwaikhat, H. M., & Mohammed, I. (2017). Sustainability assessment of urban development in Arab cities. *Sustainability*, 9(2), 327.
7. Batty, M. (2008). The size, scale, and shape of cities. *Science*, 319(5864), 769–771.
8. Batty, M. (2013). *The New Science of Cities.* MIT Press.
9. Beatley, T. (2011). *Biophilic Cities: Integrating Nature into Urban Design and Planning.* Island Press.
10. Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2002). Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century. *Renewable Resources Journal*, 20(3), 12–17.
11. Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities.* Island Press.
12. Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293–301.
13. Breuste, J., Qureshi, S., & Li, J. (2013). Urban Ecosystem Services on the Local Level: Urban Green Spaces as Providers. *Ecological Indicators*, 42, 123–131.
14. Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247–261.
15. Davies, C., & Lafortezza, R. (2017). Transitional pathways to sustainable urban development through green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*, 26, 1–6.

16. Elgazzar, R. F., & Rashed, T. (2019). Using remote sensing for urban environmental indicators in Arab cities. *Journal of Urban Management*, 8(3), 410–423.
17. Esri. (2021). *GIS for Urban and Regional Planning.* Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
18. European Commission. (2013). *Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe's Natural Capital.* Publications Office of the European Union.
19. European Environment Agency. (2020). *Urban Sustainability and Green Infrastructure in Europe: State and Outlook 2020.* Copenhagen.
20. Foley, J. A., et al. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570–574.
21. Forman, R. T. T. (2016). *Urban Ecology: Science of Cities.* Cambridge University Press.
22. Gao, B., & Zhang, L. (2019). Application of Multi-Criteria Evaluation and Remote Sensing in Urban Brownfield Redevelopment Prioritization. *Cities*, 85, 123–134.
23. Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235–245.
24. Google Earth Engine Team. (2023). *Remote Sensing Data for Environmental Change Analysis.* Google Developers Documentation.
25. Grimmond, S. (2007). Urbanization and Global Environmental Change: Local Effects of Urban Warming. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364, 1983–2000.
26. Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning. *Ambio*, 43(4), 516–529.
27. Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective.* 4th ed. Pearson Education.
28. Konijnendijk, C. C., Annerstedt, M., Nielsen, A. B., & Maruthaveeran, S. (2013). *Benefits of Urban Parks: A Systematic Review.* IFPRA World.
29. Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation.* 7th ed. Wiley.
30. Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., & Li, S. (2017). A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168, 94–116.
31. McDonald, R. I., & Marcotullio, P. (2011). *Global Urban Growth and the Geography of Sustainability.* Washington, D.C.: The Nature Conservancy.

32. McHarg, I. (1969). *Design with Nature.* New York: Doubleday.
33. Mell, I. C. (2010). *Green Infrastructure: Concepts, Perceptions and its Use in Spatial Planning.* University of Newcastle.
34. Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3–4), 115–123.
35. OECD. (2018). *Green Growth Indicators 2018.* Organisation for Economic Co-operation and Development.
36. Rawat, J., & Kumar, M. (2015). Monitoring Land Use/Cover Change Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of District Dehradun, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 6(1), 1–8.
37. Saaty, T. L. (2008). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
38. Silva, E. A., & Clarke, K. C. (2002). Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), 525–552.
39. Singh, P., & Sharma, R. (2020). Evaluating Urban Heat Islands Using Landsat Data: A Spatio-Temporal Analysis. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100–238.
40. Talen, E. (2019). Social Equity and Urban Form: An Integrated Framework for Urban Design. *Urban Studies*, 56(8), 1568–1585.
41. Tzoulas, K., et al. (2007). Promoting Ecosystem and Human Health in Urban Areas Using Green Infrastructure: A Literature Review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167–178.
42. UN-Habitat. (2016). *World Cities Report 2016: Urbanization and Development – Emerging Futures.* United Nations Human Settlements Programme.
43. UN-Habitat. (2020). *State of Arab Cities Report 2020: Towards Sustainable Urban Transitions.* Nairobi: UN-Habitat.
44. United Nations. (2023). *Sustainable Urban Futures: Integrating Evidence-Based Planning in the Global South.* UN-Habitat Series.
45. United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). *Green Infrastructure and Climate Resilience in the Middle East.* Geneva.
46. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). (2021). *Urban Recovery Framework for Post-Conflict Cities.* Nairobi.
47. Verburg, P. H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V., & Mastura, S. S. (2002). Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, 30(3), 391–405.
48. Weng, Q. (2012). *Remote Sensing of Impervious Surfaces.* CRC Press.

49. World Bank. (2019). *Urban Sustainability Framework.* Washington, D.C.: World Bank.
50. World Bank. (2022). *Spatial Development and Urban Regeneration in Post-Conflict Contexts: Lessons from Global Practices.* Washington, D.C.
51. Wright, H. (2011). Understanding Green Infrastructure: The Development of a Contested Concept in England. *Local Environment*, 16(10), 1003–1019.
52. Yin, C., & Liu, Y. (2021). *Data-Driven Urban Regeneration: Spatial Decision Support Models for Sustainable Development.* Elsevier.
53. Zhang, Y., & Li, X. (2022). *Integrating GIS and Remote Sensing in Urban Environmental Planning.* Springer Nature.
54. Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167–178.

ثالثاً: مراجع إلكترونية ومصادر بيانات

1. **Google Earth Engine Data Catalog** – Landsat 8, Sentinel-2 datasets. https://earthengine.google.com/datasets/.
2. **NASA Earth Observatory** – Urban Heat Island and NDVI Data Resources. https://earthobservatory.nasa.gov
3. **Copernicus Open Access Hub** – Sentinel-2 MSI imagery. https://scihub.copernicus.eu
4. **United Nations Data Portal for SDG 11 (Sustainable Cities and Communities).** https://unstats.un.org/sdgs
5. **Global Human Settlement Layer (GHSL)** – Built-up and population datasets. https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/

results demonstrated the effectiveness of the methodology in overcoming the constraints of **data-scarce environments** that characterize the Syrian context, as the model was able to reveal fine-grained degradation patterns and areas where surface temperatures increased or vegetation cover declined—insights unattainable through traditional tools. Findings also showed that converting certain high-priority areas—most notably the **Al-Mezzeh Military Airport**—into an **urban green lung** could raise the city's overall NDVI average from a low value in 2011 to higher levels by 2025, marking a significant quantitative improvement accompanied by a decrease in average **Land Surface Temperature (LST)**, thereby confirming the anticipated positive impacts of green infrastructure projects on local climate and quality of life.

The significance of this thesis lies in its **dual scientific and methodological value**: on one hand, it presents a comprehensive scientific model for spatial evaluation applicable to developing or crisis-affected cities; on the other, it enriches Syrian planning thought by introducing the concept of **"Geo-spatial Analysis for Urban Recovery"** as a tool to guide reconstruction and planning decisions toward projects with demonstrable environmental and social returns.
The proposed methodology also constitutes a foundational step toward establishing **national decision-support systems** capable of utilizing open-source data to assess **spatial justice** and distribute environmental opportunities, thereby linking science, policy, and planning within a sustainable and equitable framework.

The core added value of this study lies in its capacity to transform **spatial data into applicable planning knowledge**, redefining abandoned lands as active components of urban recovery. Thus, the thesis does not merely present an analytical model—it articulates a strategic vision for the **future Damascus**: a city that heals environmentally and socially through scientific tools, transforming its spatial scars into a **vibrant green network** that embodies spatial justice in its finest form and lays the foundations for evidence-based and equitable sustainable planning

Abstract

This thesis seeks to develop a **geo-spatial, multi-criteria methodology** for evaluating and scheduling the priorities of **rehabilitating derelict urban lands** in the city of Damascus, viewing them as one of the most neglected spatial resources capable of reconstructing the city's environmental and social fabric in a post-crisis context.
The research stems from the structural shift in contemporary planning thought toward **evidence-based planning** and **dynamic spatial analysis**, moving beyond traditional approaches that regarded abandoned lands as marginal voids or visual nuisances. Instead, it proposes a scientific framework that views these lands as **"urban wounds" capable of healing**, capable of transforming into functional elements within the **green infrastructure network** that strengthen the city's resilience and enhance its environmental and social sustainability.

The thesis integrates **Remote Sensing (RS)** and **Geographic Information Systems (GIS)** within a **Spatial Decision Support System (SDSS)** framework to construct a quantitative and objective knowledge base, enabling the monitoring of temporal and environmental transformations in the urban fabric.
Open-source satellite data from **Landsat** and **Sentinel** were employed via the **Google Earth Engine** platform to process and analyze key environmental indicators, including the **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)**, the **Normalized Difference Built-up Index (NDBI)**, and the **Urban Heat Island (UHI)** index, in order to monitor the dynamics of environmental degradation in the city between **2011 and 2025**.
Through normalization and spatio-temporal analysis processes, these indicators were integrated within a **Multi-Criteria Evaluation (MCE)** model to develop the **Rehabilitation Priority Index (RPI)**, which represents a methodological innovation in urban environmental planning within the Syrian context.

The proposed index produces a **Spatially Explicit Map** that identifies the sites most in need and of highest priority for rehabilitation through three planning scenarios. The

La valeur ajoutée essentielle de cette étude réside dans sa capacité à transformer les **données spatiales en savoir urbanistique opérationnel**, redéfinissant les terrains abandonnés comme des composantes actives de la reconstruction urbaine. Ainsi, la thèse ne se limite pas à un modèle analytique : elle propose une **vision stratégique pour la Damas de demain**, une ville se régénérant écologiquement et socialement grâce aux outils scientifiques, transformant ses cicatrices spatiales en **réseau vert vivant**, incarnation de la justice spatiale et fondement d'une planification durable, équitable et fondée sur les preuves.

de priorité de réhabilitation (RPI), représentant une innovation méthodologique majeure dans le domaine de la planification environnementale urbaine en Syrie.

L'indice proposé produit une **carte spatiale explicite** identifiant les sites les plus vulnérables et prioritaires à la réhabilitation selon trois scénarios de planification. Les résultats démontrent l'efficacité de la méthodologie à surmonter les contraintes des **environnements à données limitées**, caractéristiques du contexte syrien, le modèle ayant révélé des schémas précis de dégradation et des zones où la température de surface a augmenté ou où la couverture végétale a diminué — des constats inaccessibles par les méthodes conventionnelles.
Les résultats ont également montré que la conversion de certaines zones prioritaires — notamment **l'aéroport militaire de Mezza** — en **poumon vert urbain** pourrait accroître la moyenne globale du NDVI de la ville, passant d'une valeur faible en 2011 à des niveaux supérieurs en 2025, traduisant une amélioration quantitative significative accompagnée d'une baisse de la **température de surface (LST)**. Cela confirme les effets positifs attendus des projets d'infrastructure verte sur le climat local et la qualité de vie.

L'importance de cette thèse réside dans sa **double valeur scientifique et méthodologique** : d'une part, elle propose un modèle scientifique complet d'évaluation spatiale applicable aux villes en développement ou touchées par des crises ; d'autre part, elle enrichit la pensée urbanistique syrienne en introduisant le concept d'**« analyse géospatiale pour la reconstruction urbaine »** comme outil d'orientation des décisions d'aménagement vers des projets à rendement environnemental et social quantifiable.
La méthodologie proposée constitue également une étape fondatrice vers la création de **systèmes nationaux d'aide à la décision** capables d'utiliser les données en libre accès pour évaluer la **justice spatiale** et répartir équitablement les opportunités environnementales, reliant ainsi science, politique et planification dans un cadre durable et équitable.

Résumé /Abstract

Cette thèse vise à développer une **méthodologie géospatiale multicritère** pour l'évaluation et la hiérarchisation des priorités de **réhabilitation des terrains urbains délaissés** dans la ville de Damas, considérés comme l'une des ressources spatiales les plus négligées, capables de reconstruire le tissu environnemental et social de la ville dans un contexte post-crise.

La recherche s'inscrit dans le cadre du tournant structurel que connaît la pensée urbanistique contemporaine vers une **planification fondée sur les preuves** et une **analyse spatiale dynamique**, dépassant les approches traditionnelles qui percevaient les terrains abandonnés comme des vides marginaux ou des nuisances visuelles. Elle propose au contraire un cadre scientifique qui considère ces terrains comme des **« blessures urbaines » susceptibles de guérison**, pouvant devenir des éléments fonctionnels d'un **réseau d'infrastructures vertes** contribuant à renforcer la résilience de la ville et à améliorer sa durabilité environnementale et sociale.

La thèse intègre les outils de **télédétection (Remote Sensing)** et de **systèmes d'information géographique (SIG)** au sein d'un cadre de **système d'aide à la décision spatiale (SDSS)**, afin de construire une base de connaissances quantitative et objective permettant de suivre les transformations temporelles et environnementales du tissu urbain.

Les données satellitaires en accès libre provenant de **Landsat** et **Sentinel**, traitées via la plateforme **Google Earth Engine**, ont permis d'analyser plusieurs indicateurs environnementaux majeurs : l'**indice de végétation normalisé (NDVI)**, l'**indice de construction normalisé (NDBI)** et l'**indice d'îlot de chaleur urbain (UHI)**, afin d'observer la dynamique de dégradation environnementale de Damas entre **2011 et 2025**. Grâce aux processus de normalisation et d'analyse spatio-temporelle, ces indicateurs ont été intégrés dans un modèle **d'évaluation multicritère (MCE)** pour développer l'**indice**

Syrian Arab Republic
Damascus University
Higher Institute for Regional Planning

الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
المعهد العالي للتخطيط الإقليمي

A Multi-Criteria Geospatial Methodology for Assessing and Prioritizing the Rehabilitation of Derelict Urban Land as Green Infrastructure.

(Damascus City As A Case Study)

A Study Submitted For Obtaining The Master's Degree in the Department of Urban Engineering and Sustainable Urban Development.

A Thesis By: Eng. Mohammed Saleh

Thesis Advisors:

Prof. Hayyan Saffour **Prof. Natalia Atfeh**