البنية التحتية للزراعة الذكية: من المستشعرات إلى السحابة

الحبيب بن سي قدور
باحث بمركز تطوير الأقمار الصناعية، وهران
bensikaddour.elhabib@gmail.com

الزراعة الذكية هي مقاربة تكنولوجية حديثة تهدف إلى تحسين الإنتاج الزراعي وكفاءة استغلال الموارد، من خلال توظيف تقنيات رقمية متقدمة مثل إنترنت الأشياء (IoT) والذكاء الاصطناعي (AI).
يهدف هذا المقال إلى إبراز أهمية الزراعة الذكية للجزائر، من خلال عرض مفهومها، وتطبيقاتها، والتحديات التي تواجهها.

1. المقدمة

تشهد الجزائر اليوم تحولًا جذريًا في رؤيتها للتنمية الاقتصادية، حيث تسعى إلى تنويع مصادر الدخل والحد من الاعتماد على المحروقات. وفي هذا الإطار، يبرز القطاع الزراعي كأحد أهم الرهانات الإستراتيجية للبلاد. إلا أن هذا القطاع الحيوي يواجه تحديات متزايدة بسبب التغيرات المناخية، وندرة الموارد المائية، وتراجع خصوبة الأراضي، وتزايد الطلب على الغذاء نتيجة النمو السكاني. وتزداد هذه التحديات تعقيدًا في ظل الاعتماد الكبير على الاستيراد لتلبية الاحتياجات الغذائية، مما يهدد بشكل مباشر الأمن الغذائي الوطني، ويجعل من تحديث القطاع الزراعي أمرًا لا يحتمل التأجيل.

في هذا الإطار، تبرز الزراعة الذكية (Smart Agriculture) باعتبارها خيارًا إستراتيجيًا ضروريًا للجزائر، إذ تمثل تحولًا جذريًا في المفهوم التقليدي للإنتاج الزراعي. تقوم هذه المقاربة الحديثة على إدماج التكنولوجيات الرقمية، والأنظمة المدمجة، والذكاء الاصطناعي، لمراقبة العمليات الزراعية وتحسينها في الزمن الحقيقي. وتهدف الزراعة الذكية إلى تحقيق إنتاجية أعلى، بتكاليف أقل، وبكفاءة أكبر في استغلال الموارد الطبيعية، مع دعم مسار الاستدامة البيئية، وتعزيز الاكتفاء الذاتي، وتقليل التبعية للواردات الغذائية.

2. مفهوم الزراعة الذكية

تُعدّ الزراعة الذكية مفهومًا حديثًا يقوم على الاعتماد على البيانات (Data-Driven) في توجيه العمليات الزراعية وتحسينها. فهي تسعى إلى استغلال البيانات المجمّعة من مصادر متعددة بهدف فهم الأنشطة الزراعية بشكل أعمق، وتوقّع تطوراتها، وتنظيمها بطريقة أكثر كفاءة ودقة. تشمل هذه البيانات معلومات آنية وتاريخية، يتم جمعها باستمرار، وتتعلق أساسًا بـ [4]:

- **الظروف المناخية**: مثل درجة الحرارة، والرطوبة، ومعدل هطول الأمطار، وسرعة الرياح واتجاهها.
- **خصائص التربة**: من رطوبة، وملوحة، ودرجة الحموضة (pH)، ونسبة المواد العضوية.
- **مراحل نمو المحاصيل**: بما في ذلك معدلات النمو، والمؤشرات الحيوية للحالة الصحية، ومظاهر الإجهاد البيئي أو الغذائي.
- **استهلاك الموارد**: كميات المياه المستعملة في الري، ومعدلات استخدام الأسمدة والمبيدات، واستهلاك الطاقة في مختلف مراحل الإنتاج.

3. تطبيقات الزراعة الذكية

من خلال تحليل البيانات الزراعية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي والخوارزميات التنبؤية، يمكن اتخاذ قرارات زراعية ذكية ومدروسة، قائمة على أسس علمية. وتشمل أبرز هذه التطبيقات العملية ما يلي [5]:

- **الريّ الذكي** (Smart Irrigation): عبر استخدام مجسّات رطوبة التربة وربطها بالبيانات المناخية، يتم تحديد الوقت والكمية المثلى لري النباتات، مما يضمن تقنين استهلاك المياه وتفادي الهدر دون التأثير على نمو المحاصيل.
- **رشّ الأسمدة الذكي** (Smart Fertilization): بفضل أنظمة الاستشعار والتحليل، تُحدّد حاجات النبات بدقة من العناصر المغذية، وتُوزّع الأسمدة بطريقة موضعية ومضبوطة، ممّا يُقلل التكاليف، ويُحافظ على توازن التربة ويمنع تلوّثها.
- **المكافحة الذكية للآفات** (Smart Pest Control): من خلال الذكاء الاصطناعي والتصوير الطيفي، يمكن اكتشاف الأمراض والآفات في مراحلها المبكرة، مما يسمح بالتدخل العلاجي في الوقت المناسب، وبشكل موجّه للمنطقة المصابة فقط.
- **المراقبة المناخية الذكية** (Microclimate Monitoring): باستخدام أجهزة استشعار تقيس درجة الحرارة، والرطوبة، وشدة الإضاءة، يمكن تعديل ظروف النمو تلقائيًا، خاصة في الزراعة داخل البيوت البلاستيكية.
- **البذر الذكي** (Precision Seeding): اعتمادًا على المعطيات الدقيقة حول التربة، والمناخ، ونوع المحصول، يمكن تحديد التوقيت والمكان المثالي لغرس كل بذرة، مما يُعزّز من معدلات الإنبات، ويُحسّن جودة الإنتاج، ويُقلل من هدر البذور والموارد [3].

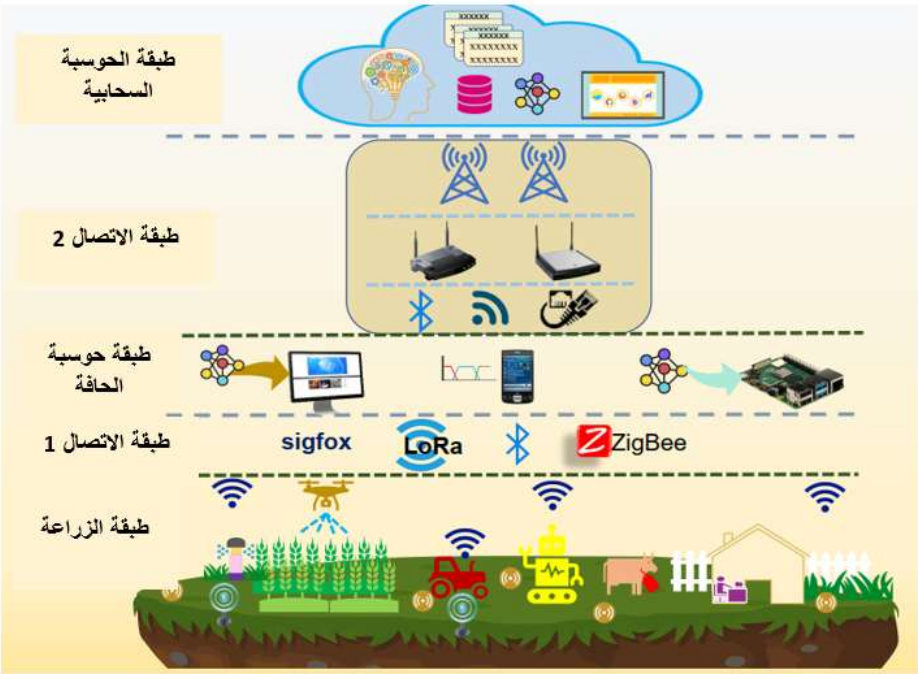
4. البنية التحتية التقنية للزراعة الذكية

الزراعة الذكية تعتمد على نظام متكامل من الطبقات التكنولوجية المترابطة، كما هو موضّح في الشكل 1. تتكوّن هذه البنية التحتية من خمس طبقات رئيسية تعمل معًا لضمان جمع البيانات، ومعالجتها، واتخاذ القرارات.

1.4. طبقة الزراعة (Agriculture Layer)

تُمثّل طبقة الزراعة القاعدة الأساسية لنظام الزراعة الذكية، حيث تتضمّن التكنولوجيات التالية:

- **تقنيات الاستشعار**: تُستخدم مستشعرات لقياس المتغيرات البيئية اللازمة. يوضّح الشكل 2 أنواع أجهزة الاستشعار المستخدمة في نظم الزراعة الذكية.
- **رسم الخرائط والتصوير**: تعتمد هذه التقنية على الأقمار الصناعية، والطائرات بدون طيّار، والكاميرات عالية الدقة لإنشاء خرائط دقيقة تُظهر حالة الأراضي، وتوزيع المحاصيل، وتحديد المناطق التي تعاني من نقص المغذيات أو الأمراض. يُمكّن التصوير متعدّد الطيف من اكتشاف المشكلات المبكرة، مثل الجفاف أو الآفات.
- **الروبوتات والأتمتة**: تُستخدم الروبوتات الزراعية لأتمتة المهام مثل الزراعة، والحصاد، وإزالة الأعشاب الضارة، والرشّ بالمبيدات. هذه التكنولوجيا تقلّل الاعتماد على العمالة اليدوية، وتزيد الكفاءة، وتقلل التكاليف، مع السماح بالعمل في ظروف صعبة أو ليلية.

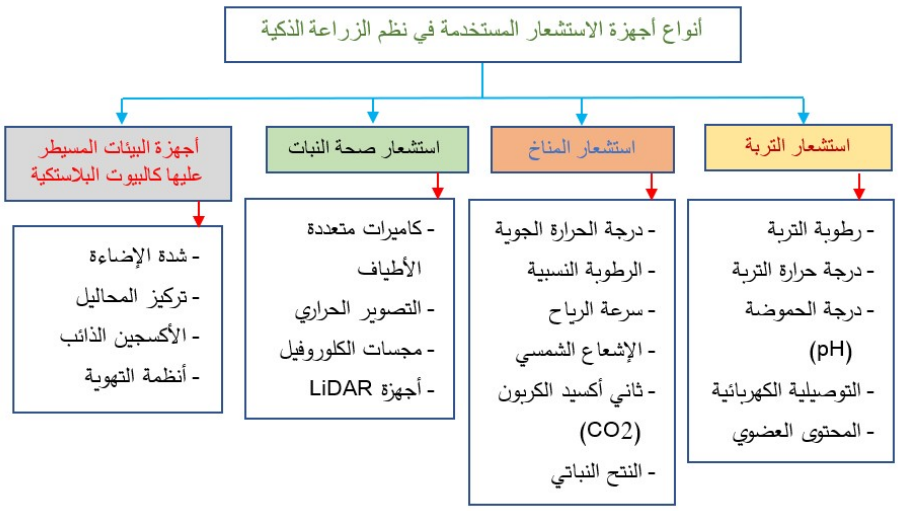


الشكل 1. الهيكلية الطبقية لنظام الزراعة الذكية [2]

2.4. طبقة الاتصال 1 (Connectivity Layer)

تربط تقنيات الاتصال اللاسلكي الأجهزة في طبقة الزراعة بالأنظمة الأعلى، ممّا يضمن نقل البيانات بكفاءة. تُقسّم هذه التقنيات إلى فئتين رئيسيتين بناءً على المدى:

- **ذات المدى القصير**(Short Range): تشمل تقنيات مثل البلوتوث (Bluetooth)، الواي فاي (Wi-Fi)، وَزيجبي (ZigBee)، التي تُستخدم للاتصال على مسافات قصيرة (غالبًا أقل من 100 متر) داخل الحقول أو المزارع الصغيرة، مع توفير سرعات عالية واستهلاك طاقة معتدل.
- **ذات المدى الطويل** (Long Range): تشمل تقنيات مثل سيج فوكس (SigFox)، LoRaWAN، و-NB IoT، التي تُمكّن الاتصال عبر مسافات طويلة (تصل إلى عشرات الكيلومترات في المناطق الريفية)، مع استهلاك طاقة منخفض ودعم لتطبيقات الزراعة النائية.



الشكل 2. أنواع أجهزة الاستشعار المستخدمة في نظم الزراعة الذكية

3.4. طبقة حوسبة الحافة (Edge Computing Layer)

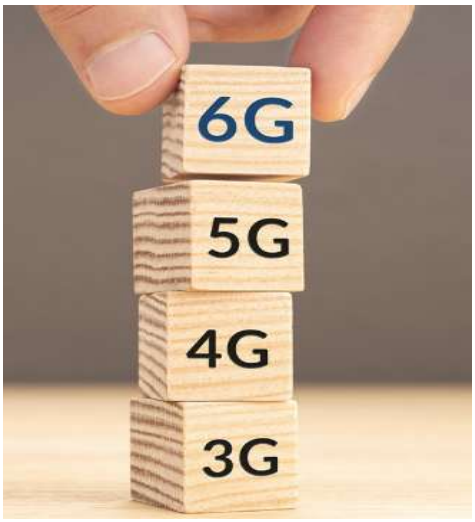
تُمثّل طبقة حوسبة الحافة مرحلةً وسيطة تُعالَج البيانات المجمّعة من أجهزة الاستشعار في طبقة الزراعة محليًا، قبل إرسالها إلى طبقة الحوسبة السحابية. وتتميّز هذه الطبقة بالخصائص التالية:

- **المعالجة الفورية**: تُستخدم أجهزة مثل الحواسيب الصغيرة أو الوحدات المدمجة لتحليل البيانات في الوقت الفعلي، مما يُتيح اتخاذ قرارات سريعة، مثل ضبط الري بناءً على رطوبة التربة.
- **تقليل الاعتماد على الحوسبة السحابية**: تُخفّف الضغط على شبكات الاتصال عن بُعد من خلال معالجة البيانات محليًا، مما يُحسّن الكفاءة ويقلّل التأخير.

4.4. طبقة الاتصال 2 (Connectivity Layer)

تُمثّل طبقة الاتصال 2 حلقة الوصل بين طبقة الحوسبة الحافة وطبقة الحوسبة السحابية، وتُعدّ عنصرًا محوريًا في بنية أنظمة الزراعة الذكية.

تضطلع هذه الطبقة بدور أساسي يتمثّل في نقل البيانات المُعالَجة جزئيًا على مستوى الحافة إلى السحابة، حيث تُخزَّن وتُحلَّل بشكل معمق لدعم اتخاذ قرارات زراعية إستراتيجية. تعتمد هذه الطبقة بشكل رئيسي على الاتصال عبر مختلف أجيال الإنترنت الجوّال كما هو موضّح في الشكل 3.



الشكل 3. تطور أجيال الاتصال الجوال المستخدمة في طبقة الاتصال 2

5.4. طبقة الحوسبة السحابية (Cloud Computing Layer)

تُعدّ طبقة الحوسبة السحابية الطبقة العليا والدماغ المركزي لنظام الزراعة الذكية، والتي تتيح ما يلي:

- **معالجة البيانات الضخمة**: تحليل مستمر لبيانات الحساسات والمعدات الذكية، وذلك باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي والتعلّم الآلي لاستخلاص المؤشرات واتخاذ قرارات دقيقة.
- **تخزين مركزي وآمن**: حفظ سجلات كاملة لحالة التربة، والمناخ، والإنتاج، وصحة المحاصيل والحيوانات.
- **إتاحة الوصول عن بُعد**: تمكين المزارعين والأنظمة الأخرى من الوصول إلى البيانات في أي وقت ومن أي مكان.

تُعتبَر منصات الحوسبة السحابية، مثل خدمات أمازون ويب (AWS) ومنصة جوجل السحابية (Google Cloud)، أدوات حيوية في نظام الزراعة الذكية، حيث تتيح معالجة البيانات الضخمة وتخزينها بأمان مع توفير إمكانية الوصول عن بُعد. بالإضافة إلى ذلك، يمكن الاستفادة من حلول مجانية أو مفتوحة المصدر، مثل InfluxDB وجرافانا (Grafana)، التي توفر خيارات فعّالة من حيث التكلفة لجمع وتحليل البيانات الزمنية، مما يجعلها مناسبة للمزارعين ذوي الموارد المحدودة.

5. التحديات التي تواجه الزراعة الذكية

رغم أن الزراعة الذكية تُقدّم العديد من الفوائد، فإن اعتمادها لا يزال يُشكّل تحديًا بالنسبة إلى كثير من المزارعين. فيما يلي نعرض أبرز العقبات التي تُعيق تطوّرها.

1.5. التكاليف الأولية المرتفعة

تختلف التكاليف الأولية بدرجة كبيرة حسب نوع الأنظمة المستخدَمة، ومدى تعقيدها، والتكنولوجيا المعتمَدة فيها. فكلما زاد تعقيد النظام واعتمد على تقنيات متقدمة، ارتفعت التكاليف الأولية المرتبطة بتصميمه وتصنيعه وتثبيته. لذلك، قد تُشكّل هذه التكاليف عائقًا أمام التبني الواسع، لا سيما في البلدان النامية أو لدى المؤسسات ذات الموارد المحدودة.

فعلى سبيل المثال، يتطلّب استخدام الطائرات بدون طيّار في مجالات مثل الزراعة الذكية أو المراقبة البيئية استثمارات أولية تشمل اقتناء هذه الطائرات، وتجهيزها بكاميرات وأجهزة استشعار متطورة، فضلًا عن تكاليف التدريب على تشغيلها وصيانتها. قد تكون هذه التكاليف مرتفعة بالنسبة إلى صغار المزارعين أو الهيئات المحلية، ممّا يحدّ من انتشار هذه التقنية في بعض المناطق.

لذلك، يُعدّ من الضروري العمل على تطوير حلول بديلة منخفضة التكلفة، سواء ضمن مشاريع التخرج الجامعية أو من خلال الشركات الناشئة والمتخصصة. وتُمثّل هذه المبادرات وسيلة فعالة لنقل التكنولوجيا وتكييفها مع الاحتياجات والقدرات المحلية. فعلى سبيل المثال، يُوضّح الشكل 4 نموذجًا لمحطتي استشعار مناخي وزراعي منخفضتي التكلفة، يمكن استخدامهما في تطبيقات الزراعة الذكية أو مراقبة الظروف المناخية، مع الحفاظ على مستوى مقبول من الدقة والموثوقية.

الشكل 4. نماذج لمحطات استشعار جوية وبيئية منخفضة التكلفة.

2.5. محدودية الوصول في المناطق الريفية

تُمارَس الزراعة غالبًا في مناطق ريفية نائية، حيث يكون الوصول إلى الكهرباء أو الإنترنت محدودًا. وبدون هذه الموارد الأساسية، يصبح من الصعب تنفيذ تقنيات الزراعة الذكية ميدانيًا، ممّا يُبطئ من وتيرة انتشارها، حتى في المناطق الزراعية الواعدة.

3.5. نقص المعرفة التقنية

يفتقر العديد من المزارعين، لا سيما في الدول النامية، إلى المهارات اللازمة لاستخدام هذه التقنيات الحديثة. ويُعزى ذلك إلى غياب الدعم، وضعف المعلومات، وندرة فرص التدريب المناسب. ونتيجة لذلك، غالبًا ما يُفضّل هؤلاء المزارعون التمسك بالأساليب الزراعية التقليدية التي يجيدونها ويتعاملون معها بثقة أكبر.

4.5. المخاطر المتعلقة بأمن البيانات

تعتمد الزراعة الذكية على جمع البيانات ونقلها، ممّا يجعل مسألة تأمين هذه البيانات أمرًا بالغ الأهمية. ففي غياب تدابير أمان قوية، توجد مخاطر التعرض إلى القرصنة أو محاولات التلاعب بالأنظمة، وهو ما قد يؤدي إلى أضرار على المحاصيل والإنتاج الزراعي.

6. التحول نحو الزراعة الذكية في الجزائر

لم يعد التحول نحو الزراعة الذكية في الجزائر مجرّد خيار تقني أو توجّه مستقبلي، بل أصبح ضرورة إستراتيجية تُمليها التحديات المناخية والاقتصادية المتزايدة، وعلى رأسها شحّ الموارد المائية، وتدهور الأراضي، وتقلبات المناخ، إضافة إلى تزايد الطلب المحلي على الغذاء [1].

ويُحتّم هذا الواقع على الجزائر تبنّي سياسات فاعلة لتحديث القطاع الزراعي، وذلك من خلال تشجيع البحث العلمي التطبيقي في مجال الزراعة الذكية، وربط مخرجاته مباشرة بالممارسات الفلاحية الميدانية، عبر شراكات عملية مع الفلاحين. كما يقتضي هذا التحول تطوير بنية تحتية رقمية متكاملة، تتضمن تغطية شبكية فعّالة، والاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة، وإنشاء مراكز بيانات محلية لدعم عمليات المعالجة والتخزين.

1.6. إطار مرجعي تقني للزراعة الذكية في الجزائر

يُعدّ إنشاء إطار مرجعي وطني للزراعة الذكية خطوة ضرورية وملحّة لتوحيد الجهود، وتنسيق المبادرات البحثية والميدانية، وضمان التوافق بين الأنظمة والتطبيقات. هذا الإطار يجب أن يُحدّد المعايير التقنية المعتمدة، ويُوفّر نماذج هيكلية موحّدة للبنية التحتية والبيانات، ويُسهّل التكامل بين المشاريع، سواء أكانت أكاديمية أو تجارية، مما يُسهم في تسريع الانتقال من التجارب المحدودة إلى تطبيقات وطنية واسعة النطاق.

- تجنّب التشتت والتكرار بين المشاريع عبر تنظيم الجهود ضمن رؤية وطنية موحدة.
- **توحيد بروتوكولات جمع البيانات**: من خلال وضع معايير موحدة لأجهزة الاستشعار (مثل تنسيقات البيانات JSON أو CSV) لضمان التوافق بين الأنظمة.
- **تطوير قاعدة بيانات وطنية**: إنشاء قاعدة بيانات مركزية لتخزين بيانات التربة والمناخ والمحاصيل، مع إمكانية الوصول للراغبين عبر منصات سحابية، مع مراعاة متطلبات الأمن السيبراني.
- **تعزيز التوافق البيني** (Interoperability): اعتماد بروتوكولات اتصال مفتوحة مثل MQTT أو CoAP لتيسير الربط بين أجهزة IoT والمنصات السحابية.
- **خفض التكاليف**: من خلال تطوير حلول منخفضة التكلفة تعتمد على تقنيات مفتوحة المصدر، مما يُسهّل اعتمادها، لاسيما من قِبل صغار المزارعين.

7. خاتمة

في ظل تصاعد التحديات المناخية، مثل شحّ الموارد المائية وتدهور خصوبة التربة، إلى جانب الضغوط الاقتصادية الناتجة عن الاعتماد على الاستيراد الغذائي، تبرز الزراعة الذكية كحل تقني متقدم قادر على تعزيز الكفاءة الزراعية ودعم

التنمية في الجزائر. ومن خلال توظيف تقنيات متقدمة مثل إنترنت الأشياء، والذكاء الاصطناعي، وبيانات الأقمار الصناعية، يصبح من الممكن تحسين إنتاجية المحاصيل الزراعية وترشيد استهلاك الموارد الحيوية، وعلى رأسها المياه.

إن نجاح تبني الزراعة الذكية يتطلب استثمارات في البنية التحتية الرقمية، وتطوير منصات حوسبة سحابية، بالإضافة إلى إطلاق برامج تدريبية لتمكين المزارعين من استخدام هذه التقنيات. كما أن إرساء أطر تنظيمية مرجعية موحدة يُعدّ ضرورة لا مناص منها لضمان التكامل بين مختلف الأنظمة والتطبيقات، وتوحيد الجهود المبذولة.

إن المضيّ بقوة وإرادة نحو هذا التحول يُعدّ خيارًا استراتيجيًا مباشرًا لضمان مستقبل الجزائر، واستقرارها الغذائي والاقتصادي، وتعزيز قدرتها على مواجهة التحديات المناخية والاقتصادية المتصاعدة.

المراجع

[1] بوعبدلي، ياسين وغربي، رشيد، الزراعة الذكية كخيار إستراتيجي لتحقيق الأمن الغذائي في الجزائر. Beam Journal of Economic Studies، 7(1)، 308-327، (2023).

[2] Indira, P., Arafat, I. S., Karthikeyan, R., Selvarajan, S., & Balachandran, P. K. Fabrication and investigation of agricultural monitoring system with IoT & AI, *SN Applied Sciences*, 5(12), 322, (2023).

[3] Mohamed, E. S., Belal, A. B., Abd-Elmabod, S. K., El-Shirbeny, M. A., Gad, A., & Zahran, M. B. Smart farming for improving agricultural management, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 971-981, (2021).

[4] Paul, K., Chatterjee, S. S., Pai, P., Varshney, A., Juikar, S., Prasad, V., Bhadra, B. & Dasgupta, S. Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture,* 198, 107096, (2022).

[5] Šarauskis, E., Kazlauskas, M., Naujokienė, V., Bručienė, I., Steponavičius, D., Romaneckas, K., & Jasinskas, A. Variable rate seeding in precision agriculture: Recent advances and future perspectives, *Agriculture*, 12(2), 305, (2022).