الملخص

يقـدّم هـذا المشـروع نظـام تحكم يعمـل في الزمن الحقيقي، حيث يعمل **ESP32-CAM** كوحـدة تحكم رئيسـية تتحكم في ثماني وحـدات **Arduino Pro Mini** عـبر بروتوكول **I²C**. ويقود كل **Arduino** وحـدتي إزالـة تعـدد إرسال من نوع **CD74HC4067**، ممـا ينتـج عنه ما مجموعه **16 وحدة Multiplexer**. ويوفر النظـام **16 عقـدة من النوع A** و**16 عقـدة من النوع B** يمكن للمستخدم ربطها معًا بمرونة من خلال لوحة تحكم ويب (مستضافة على **Firebase**). ويتيح ذلك التهيئة والمراقبة عن بُعد لتجارب التوصيلات الكهربائية بزمن استجابة منخفض.

صُممت المنصـة في الأساس لخدمـة **المختبرات الأكاديمية**، حيث يمكن اسـتخدامها كـأداة فعّالـة في **مختبر المتحكمات الدقيقـة (Microcontroller Laboratory)** لإعداد التجارب واختبارهـا عن بُعـد، وفي **مختبر الإلكترونيـات (Electronics Laboratory)** لتـوجيه الإشـارات دون الحاجـة إلى إعـادة التوصـيل يـدويًا، وفي **مختبر الميكاترونكس (Mechatronics Laboratory)** عند دمجها مع المرحلات (Relays)، وكذلك في **مختبر الكيمياء (Chemistry Laboratory)** عند توسيع استخدامها للتحكم في المضخات أو الصمامات وغيرها.

ومع ذلك، لا يقتصـر اسـتخدامها على البيئات الأكاديميـة. فبفضل تصـميمها المعياري والقابل للتوسع، يمكن توظيف النظام أيضًا في النمذجـة الأوليـة الصـناعية، ومنشآت الاختبار المؤتمتة، والبيئات البحثيـة، والعديد من التطبيقات الأخرى التي تتطلب توصـيلات كهربائية ديناميكية قابلة للتهيئة عن بُعد. ومن هذا المنطلق، يقدم المشـروع أساسًا مرنًا يمكن تطويره ليتجاوز نطاق المختبرات، بحيث تقتصر إمكانياته فقط على إبداع واحتياجات مستخدميه.

يسـتهدف النظام تحقيق تحكم منخفض زمن الاستجابة في الأجهزة متعددة الإرسال عبر **مصفوفة توصيل 16×16**، مع التركيز على الاعتمادية، وقابلية المراقبة، وسـهولة النشر. وتتناول هـذه الدراسـة تصـميم العتاد (بما في ذلك مخطط الـدارة، وإدارة الطاقـة، وسـلامة الإشارات)، وتصـميم البرمجيات الثابتة (بروتوكول **I²C**، وآليـة إعادة المحاولـة، ومنطق المهلة الزمنية)، بالإضافـة إلى تطبيق الويب (بنية قاعدة بيانات **RTDB**، وآلية مزامنة الحالة، وواجهة المسـتخدم). وأظهرت نتائج الاختبارات زمن اسـتجابة كليًا أقل من **300 مللي ثانية** في ظروف اتصال **Wi-Fi** الاعتيادية، مما يؤكد إمكانية استخدام هذه المنصة كنظام توصيل كهربائي عن بُعد للمختبرات الأكاديمية وغيرها من التطبيقات.