

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI ELM VƏ TƏHSİL NAZİRLİYİ
AZƏRBAYCAN TEXNİKİ UNİVERSİTETİ
YÜKSƏK TƏHSİL İNSTİTUTU

Əlyazması hüququnda

VƏLİZADƏ RAMİL ELÇİN oğlu
HƏSƏNOV RƏSUL NATİQ oğlu
SALMANOV ORFAN BƏYİŞ oğlu
MƏMMƏDLİ KAMİL FAMIL oğlu
MƏMMƏDLİ VÜSAL EMİN oğlu

“PİLOTSUZ UÇUŞ APARATLARININ ENERJİ
TƏMİNATINI VƏ ETİBARLILIĞINI İDARƏETMƏ
MƏSƏLƏLƏRİNİN ANALİZİ” mövzusunda

MAGİSTR DİSSERTASİYASI

İxtisasın şifri: 060632 — “İnformasiya texnologiyaları və sistemləri mühəndisliyi”

İxtisaslaşmanın adı: 249315 — “Kibertəhlükəsizlik (Sabah)”

Elmi rəhbər: tex.f.d., dos. Abdullayeva Fərzanə Cabbar qızı

Təhsil şöbəsinin rəhbəri: tex.f.d., dos. Yusifov Fərhad Firudin oğlu

BAKİ – 2024

AZƏRBAYCAN TEXNİKİ UNİVERSİTETİ
YÜKSƏK TƏHSİL İNSTİTUTU

MAGİSTRANTIN ANDI

“Pilotsuz uçuş aparatlarının enerji təminatını və etibarlılığını idarəetmə məsələlərinin analizi” mövzusunda təqdim etdiyim(iz) magistrlik dissertasiyasını elmi əxlaq normalarına və istinad qaydalarına tam riayət etməklə və istifadə etdiyim bütün mənbələri ədəbiyyat siyahısında əks etdirməklə yazdığımı and içirəm(ik) və magistrlik dissertasiyasının AzTU Kitabxana İnformasiya Mərkəzində saxlanılması, həmin mərkəz tərəfindən AzTU Rəqəmsal Repozitoriyasına daxil edilərək repozitoriyanın veb saytında yerləşdirilməsinə icazə veririk.

Ramil Vəlizadə

(imza)

Həsənov Rəsul

(imza)

Məmmədli Vüsal

(imza)

Salmanov Orfan

(imza)

Məmmədli Kamil

(imza)

Tarix

Vəlizadə Ramil Elçin oğlu, Həsənov Rəsul Natiq oğlu, Məmmədli Vüsal Emin oğlu, Salmanov Orfan Bəyiş oğlu, Məmmədli Kamil Famil oğlu.

Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatının və etibarlılığının idarəetmə məsələlərinin analizi.

Xülasə

PUA-lar pilotlu təyyarələrin əvəzinə çirkli, təhlükəli, uzun və yorucu tapşırıqları az maliyyə tələbi və risksiz olaraq həyata keçirir. Buna görə də son zamanlar PUA-ların istifadə sahəsi genişlənir. Lakin PUA-lardan istifadə zamanı qısa uçuş vaxtı və məhdud enerji kimi bir sıra problemlər mövcuddur. Dissertasiya işində PUA-ları gücləndirən elektrik enerjisi mənbələrini və enerji idarəetmə strategiyalarını nəzərdən keçirərək, enerji mənbələrinin seçilməsini asanlaşdırmaqla PUA-lar üçün yüksək performanslı elektrik mühərrik sistemlərinin inkişafı üçün başlanğıc baza təmin etməyə çalışmışıq. Bu məqsədlə MATLAB proqramından istifadə edərək qeyri-səlis idarəetmə modelinin tədqiq etmişik.

Valizade Ramil Elchin oglu, Hasanov Rasul Natig oglu, Mammadli Vusal Emin oglu, Salmanov Orfan Beyish oglu, Mammadli Kamil Famil oglu.

Analysis of UAV power supply and reliability management issues.

Summary

UAVs perform dirty, dangerous, long and tedious tasks in place of manned aircraft with little financial demand and no risk. Therefore, the field of use of UAVs has been expanding recently. However, there are a number of problems when using UAVs, such as short flight time and limited energy. In this dissertation, we tried to provide a starting base for the development of high-performance electric propulsion

systems for UAVs by reviewing the electrical energy sources and energy management strategies that power UAVs, facilitating the selection of energy sources. For this purpose, we have studied the fuzzy control model using the MATLAB program.

Mündəricat

GİRİŞ	6
FƏSİL 1. PİLOTSUZ UÇUŞ APARATLARININ ENERJİ TƏMİNATINI VƏ ETİBARLILIĞINI İDARƏETMƏ MƏSƏLƏLƏRİNİN ANALİZİ	10
1.1. Pilotsuz Uçuş Aparatları sisteminin əsas komponentləri	10
1.2. Pilotsuz Uçuş Aparatlarının elmi tədqiqat məsələlərinin analizi	21
1.3. Pilotsuz Uçuş Aparatlarının əsas elmi tədqiqat məsələlərinin müəyyən edilməsi	26
FƏSİL 2. PİLOTSUZ UÇUŞ APARATLARINDA BATAREYA KÖHNƏLMƏSİNİN PROQNOZLAŞDIRILMASI ÜÇÜN DƏRİN TƏLİM METODLARININ TƏDQIQI	29
2.1. Pilotsuz uçuş aparatlarının enerji mənbələrinin tədqiqi	29
2.2. PUA batareyasının enerji təminatının neyron şəbəkələri və LSTM əsasında proqnozlaşdırılması metodlarının tədqiqi	47
FƏSİL 3. PİLOTSUZ UÇUŞ APARATLARININ ETİBARLILIĞININ VƏ ENERJİ TƏMİNATININ İDARƏETMƏ MODELİNİN İŞLƏNMƏSİ	57
3.1. PUA proqram təminatında xətalara aşkarlanması üçün klassifikatorlar ansamblı modelinin tədqiqi	57
3.2. PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarəetmə modelinin tədqiqi	63
Nəticə	68
İstifadə edilmiş ədəbiyyat	72

GİRİŞ

Mövzunun aktuallığı: Son zamanlar Pilotsuz Uçuş Aparatları (PUA) istər hərbi, istərsə də mülki məqsədlər üçün geniş tətbiq olunur. Hərbi məqsədlər üçün istifadə olunan PUA-ların dağlıq və şəraitli ərazilərdə istifadəsi, eniş və qalxma məsafələrinin optimallaşmasını aktual edir. Modelin uyğun komponentləri elə seçilmişdir ki, qısa qalxış məsafəsinə, daha çox faydalı yük qaldırma qabiliyyətinə, yüksək sürətlərdə kiçik müqavimət əmsalına və düzgün hava axını yaratmaq üçün uyğun olsun. Bu zaman hazırlanan model, məhdud şəraitli yerlərdə də PUA-ların istifadəsini mümkün edəcəkdir. Böyük ölçülü təyyarə və gəmilərin hazırlanmasından öncə onların kiçik prototiplərinin hazırlanmasını nəzərə alsaq, PUA-lar da böyük təyyarələrin prototipləri hesab oluna bilər. PUA-lar insanlı təyyarələrdən daha çox özəlliklərə sahib olduğu üçün bir çox ölkələrdə bu istiqamətdə ciddi araşdırmalar aparılır. Bu tip kiçik ölçülü insansız təyyarələr əsasən avtomatik rejimdə (misiya ilə) və ya manual (əl ilə) olaraq idarə olunur. Fövqəladə vəziyyətlərdə PUA-lar qısa zaman ərzində önəmli tələblər yerinə yetirir: yol infrastrukturunu sıradan çıxmış, və ya ümumiyyətlə yol olmayan dağlıq, meşə və digər ərazilərə getmək, yanğın, fiziki və kimyəvi tullantılar olan, minalanmış ərazilərdə müşahidə, və ya tədqiqat aparmaq, fiziki və bioloji xüsusiyyətləri araşdırmaq üçün ərazinin geotermal analizini həyata keçirmək, kameralar vasitəsi ilə hərəkət edən obyektləri izləmək və təyin etmək. Buna görə də, sərhədlərin mühafizəsində, güvənlik xidmətlərində, heyvanlar aləmi çəkilişlərində, kənd təsərrüfatında və əsasən hərbi PUA-lardan geniş istifadə olunur. PUA-lar pilotlu təyyarələrin yerinə çirkli, təhlükəli, uzun və yorucu tapşırıqları az maliyyə tələbi və risksiz olaraq həyata keçirir.

Son zamanlar dünyada qlobal çağırışlara uyğun olaraq ölkəmizdə yaşıl enerji, yaşıl texnologiya, yaşıl iqtisadiyyat, yaşıl təfəkkür sürətlə inkişaf edir, yəni hər şey “yaşıllaşır”. Bu yaşıllıq – təbiətə vurulan ziyanı minimuma endirən informasiya-kommunikasiya texnologiyaları, yaşıl enerji və s.-dir. Yəni enerjinin özünün mahiyyəti dəyişib - artıq ölkəmizdə enerji təhlükəsizliyi enerji infrastrukturunun yaşıl, yəni alternativ enerji mənbələri, külək enerjisi, günəş enerjisi və təbiətə ziyan vurmeyən digər mənbələrdən alınan enerjilər əsasında təmin edilir. Bu gün dünyada kritik

texnoloji sistemlərin enerji təminatının effektiv idarə edilməsi istiqamətində qanunvericilik aktları qəbul edilir. Enerji təminatı Azərbaycan Respublikasının dövlət siyasətinin prioritet istiqamətlərindədir. Ölkəmizdə 17 iyul 2023-cü il tarixində “Azərbaycan Respublikasında kritik informasiya infrastrukturunun təhlükəsizliyinin təmin edilməsi qaydaları” təsdiq edilmişdir. Bu sənəddə provayderin müvafiq infrastrukturunda fasiləsiz xidmətin təmin edilməsi üçün əsas və alternativ texnoloji infrastruktur, eləcə də əsas və alternativ enerji mənbələri ilə təmin olunması tələb kimi qoyulub.

Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatının və etibarlılığının idarə edilməsi üzrə elmi və praktiki tədqiqatlar nisbətən yaxın dövrlərdə meydana çıxmışdır. PUA yanacağıının səmərəliliyinin və batareyanın xidmət müddətinin artırılması real zamanda işləyən effektiv enerji idarəetmə strategiyalarının işlənməsini tələb edir.

Yuxarıda qeyd edilənləri nəzərə alaraq bu dissertasiya işi Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatını və etibarlılığını maşın təlimi və dərin təlim modelləri əsasında analizi məsələlərinə həsr edilmişdir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri: Tədqiqatın məqsədi Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatını və etibarlılığını idarəetmə məsələlərinin analizidir. Bu məqsəddə çatmaq üçün aşağıdakı vəzifələr icra olunmuşdur:

- PUA-ların enerji təminatı üçün istifadə olunan batareyaları araşdırmaq;
- PUA-ların idarəetmə sistemlərinin analizi.

Tədqiqatın predmeti və obyektı – işin predmetinin əsasında PUA-ların enerji sistemlərinin tədqiqi durur. Tədqiqatın obyektı olaraq isə enerji mənbələri seçilmişdir.

Tədqiqat metodları – tədqiqatın məqsədyönlülüynü artırmaq məqsədilə həm empirik tədqiqat -müqayisə, həm də nəzəri -analiz və sintez- tədqiqat metodları, süni intellekt, maşın təlimi, dərin təlim metodları, qeyri-səlis nəzəriyyə istifadə olunmuşdur.

Tədqiqatın nəzəri və metodoloji əsasları. Tədqiqatın nəzəri-metodoloji əsaslarını süni intellekt, maşın təlimi, dərin təlim metodları, qeyri-səlis nəzəriyyə və digər normativ-hüquqi aktlar, ölkəmizin və başqa alimlərin elmi əsərləri təşkil edir.

Tədqiqatın elmi yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti. Dissertasiya işi zamanı əldə edilmiş elmi yeniliklərə aşağıdakılar aiddir:

- Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatını və etibarlılığını idarəetmə məsələləri analiz edilmişdir;
- Pilotsuz Uçuş Aparatlarının əsas elmi tədqiqat məsələləri müəyyən edilmişdir;
- PUA batareyasının enerji təminatının proqnozlaşdırılması metodları tədqiq edilmişdir;
- PUA proqram təminatında xətlərin aşkarlanması üsulları tədqiq edilmişdir;
- PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarəetmə modeli qurulmuşdur.

Dissertasiya işinin strukturu. Dissertasiya işi giriş, üç fəsil, nəticə, xülasə və ədəbiyyat siyahısından ibarətdir.

Dissertasiya işinin girişində mövzunun aktuallığı əsaslandırılır, onun predmeti və obyektini verilir, elmi-nəzəri əsasları izah edilir və elmi yenilikləri verilir.

Dissertasiya işinin “Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatı və etibarlılığı idarəetmə məsələlərinin analizi” adlanan I fəsilində Pilotsuz Uçuş Aparatları sisteminin əsas komponentləri, Pilotsuz Uçuş Aparatlarının elmi-tədqiqat məsələlərinin analizi və Pilotsuz Uçuş Aparatlarının əsas elmi-tədqiqat məsələlərinin müəyyən edilməsi məsələləri ətraflı şərh edilir.

Dissertasiya işinin - “Pilotsuz Uçuş Aparatlarında batareya köhnəlməsinin proqnozlaşdırılması üçün dərin təlim metodlarının tədqiqi”- II fəsilində Pilotsuz uçuş aparatlarının enerji mənbələrinin tədqiqi, PUA batareyasının enerji təminatının neyron şəbəkələri və LSTM əsasında proqnozlaşdırılması metodlarının tədqiqinə baxılmışdır.

“Pilotsuz uçuş aparatlarının etibarlılığının və enerji təminatının idarəedilmə modellərinin işlənməsi “ başlığı ilə verilmiş III fəsilə PUA proqram təminatında xətlərin aşkarlanması üçün klassifikatorlar ansambli modelinin tədqiqi və PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarəetmə modelinin tədqiqi aparılmışdır.

Dissertasiyada qrup üzvlərinin töhfələri:

Giriş - Vəlizadə Ramil Elçin oğlu

1.1 Pilotsuz Uçuş Aparatları sisteminin əsas komponentləri - Vəlizadə Ramil Elçin oğlu

1.2 Pilotsuz Uçuş Aparatlarının elmi-tədqiqat məsələlərinin analizi - Həsənov Rəsul Natiq oğlu

1.3. Pilotsuz Uçuş Aparatlarının əsas elmi-tədqiqat məsələlərinin müəyyən edilməsi - Vəlizadə Ramil Elçin oğlu

2.1 Pilotsuz uçuş aparatlarının enerji mənbələrinin tədqiqi - Həsənov Rəsul Natiq oğlu

2.2. PUA batareyasının enerji təminatının neyron şəbəkələri və LSTM əsasında proqnozlaşdırılması metodlarının tədqiqi – Məmmədli Vüsal Emin oğlu

3.1 PUA proqram təminatında xətalərin aşkarlanması üçün klassifikatorlar ansamblı modelinin tədqiqi- Salmanov Orfan Bəyiş oğlu

3.2 PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarəetmə modelinin tədqiqi - Məmmədli Kamil Famil oğlu

Nəticə - Vəlizadə Ramil Elçin oğlu

Xülasə - Vəlizadə Ramil Elçin oğlu

FƏSİL 1. PİLOTSUZ UÇUŞ APARATLARININ ENERJİ TƏMİNATINI VƏ ETİBARLILIĞINI İDARƏETMƏ MƏSƏLƏLƏRİNİN ANALİZİ

1.1 Pilotsuz Uçuş Aparatları sisteminin əsas komponentləri

Pilotsuz Uçuş Aparatları Sistemi (PUAS), həmçinin adətən Pilotsuz Uçuş Sistemləri olaraq adlandırılan, komponentləri insan operatorunu daşımayan, lakin bunun əvəzinə avtonom şəkildə uçan və ya uzaqdan idarə olunan hava nəqliyyat vasitələrini və əlaqəli avadanlıqları və bütün avadanlıqları ehtiva edən bir sistem kimi müəyyən edilir. PUA əmr, idarəetmə və rabitə (C3) sistemini və pilotsuz təyyarəni idarə etmək üçün lazım olan personalı ehtiva edən sistem kontekstində nəzərdən keçirilməlidir.

PUA insan tərəfindən birbaşa monitorinqin mümkün olmadığı çox təhlükəli və təhlükəli vəziyyətlər üçün uyğundur. Pilotsuz aviasiya cəmiyyətində PUA inkişaf edən sahədir. Ümumiyyətlə, “PUA” “təyyarələri, idarəetmə stansiyalarını və məlumat bağlantılarını özündə birləşdirən bütün sistemi” təsvir edir. Pilotsuz Uçuş Aparatları Sisteminin əsas komponentlərinə aiddir:

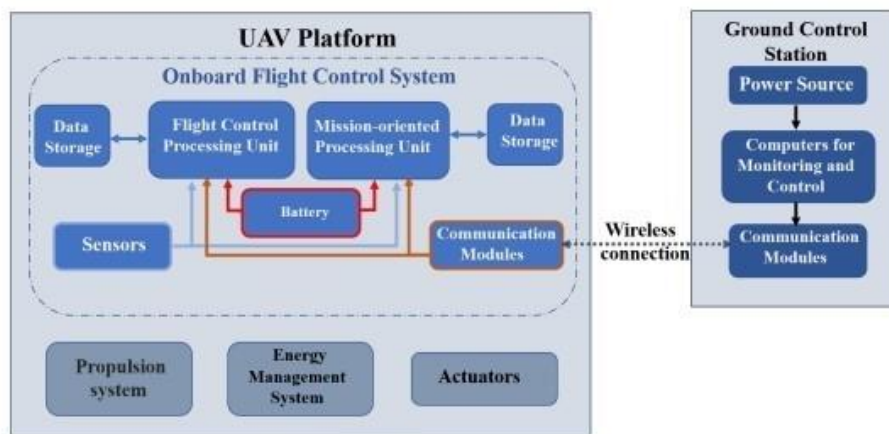
- Çoxsaylı təyyarə
- Yerə nəzarət sığınacaqları (C3)
- Missiya planlaşdırma sığınacağı
- Başlatma və bərpa sığınacağı
- Yerüstü məlumat terminalları
- Uzaqdan video terminallar
- Modul missiya yükü modulları
- Hava məlumat releləri
- Müxtəlif buraxılış, bərpa və yer dəstəyi avadanlığı.

PUAS-ın əsas hissələri. Şəkil 1.1-də təsvir edilən pilotsuz uçuş sistemi (PUA) əsasən üç hissədən ibarətdir:

- Pilotsuz Uçuş Aparatı (PUA);

- Uçuş Kompüteri/Təyyarə İdarəetmə Sistemi;
- PUA ilə yer stansiyası arasında rabitə və məlumat əlaqələrini təmin edən komanda və idarəetmə sistemi.

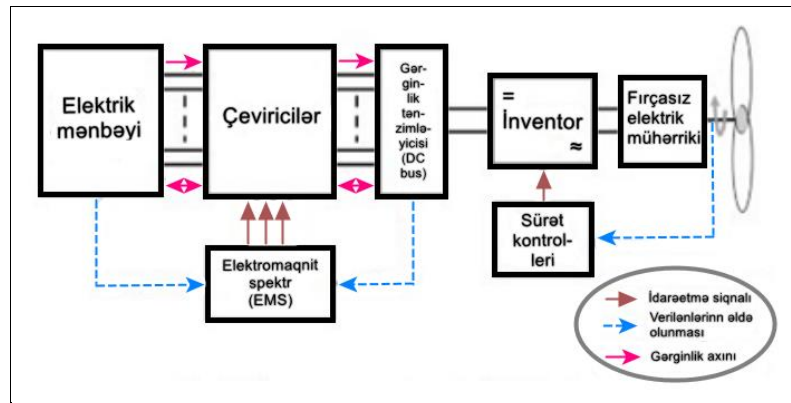
Pilotsuz uçuş aparatı (PUA). Şəkil 1.1-də göstərildiyi kimi, PUA platformasına (1) naviqasiya və idarəetmə (GNC) alqoritmləri, uçuş zamanı məlumatların toplanması və təhlili, uçuş idarəetmə sistemi; yer stansiyası və missiyanın planlaşdırılması; (2) enerji təchizatı mənbələri, sürət tənzimləyicisi, çeviricilər, enerji idarəetmə sistemi, mühərrik və pərvanə daxil olmaqla, hərəkət sistemi; (3) avtonom uçuşu təmin etmək üçün tələb olunan sensorlar; və (4) faydalı yük: aktuatorlar, kameralar və radar kimi missiyalar üçün lazım olan avadanlıq daxildir (Cai G., Dias J., Seneviratne L., 2014).



Şəkil 1.1. Tipik PUA-nın blok diaqramı (Mohamed Nadir Boukoberinea, 2019)

PUA-da ötürmə sistemi bortda enerji istehlak edən əsas hissədir. O, yığılmış elektrik enerjisini motor-pərvanə sistemi tərəfindən yaradılan mexaniki gücə çevirərək PUA-nın hərəkətinə imkan verir. O, PUA-nın çəkisinin yarısından çoxunu təşkil edə bilər. Şəkil 1.2 tipik PUA-nın hərəkət sisteminin sxematik diaqramını göstərir. Bort mənbələri batareyanın doldurulması və boşaldılmasını təmin etmək üçün bir istiqamətli və iki istiqamətli çeviricilər vasitəsilə DC bus-na enerji verir. Bu çeviricilər enerji axınına nəzarət etməyə imkan verir. Gücün bölünməsinə idarə edən EMS-dən nəzarət signalları alırlar. Kiçik PUA-larda geniş istifadə olunan motor növü yüksək səmərəlilik və güc sıxlığı, yüksək sürət və yaxşı fırlanma momenti xüsusiyyətləri, etibarlılıq, idarəetmə asanlıığı və uzun ömür kimi əsas xüsusiyyətləri sayəsində fırçasız DC (BLDC) motordur (Varshney A., Gupta D., Dwivedi B., 2017). İnduksiya mühərrikləri

aşağı qiymət və möhkəmlik baxımından üstün olsalar da, nisbətən aşağı səmərəlilik, soyutma problemi və aşağı fırlanma momenti kimi bəzi məhdudiyyətlərə malikdirlər.



Şəkil 1.2. PUA-nın hərəkət sisteminin blok-sxemi (Mohamed Nadir Boukoberinea, 2019)

PUA-ların təsnifatı. PUA-ları təsnifatında bir sıra meyarları nəzərə almaq lazımdır. Bu meyarlara ölçü, gövdə (fırlanan, sabit, çırpılan qanadlar) (Shraim H., Awada A., Youness R., 2018), uçuş məsafəsi, uçuş rejimi (havadan yüngül, havadan ağır) (Norouzi Ghazbi S., Aghli Y., Alimohammadi M., Akbari A., 2016), maksimum uçuş çəkisi (MTOW) və missiyası (tətbiq sahəsi) daxildir. Buna görə də ədəbiyyatlarda qəbul edilmiş unikal təsnifata rast gəlinmir. Belə ki, müəlliflərə görə təsnifatlar müxtəlifdir: Abaunza H., Garcia P. C. üç PUA konfigurasiyası arasında müqayisəli bir araşdırma təklif edilib: sabit qanadlı, fırlanan qanadlı və hibrid (Abaunza H., Garcia P. C., 2017). Beləliklə, PUA platformaları adətən aşağıdakı dörd kateqoriyadan birinə düşür:

Sabit qanadlı PUA: uçuş və eniş üçün uçuş-enmə zolağı tələb edən və ya katapultla buraxılan pilotsuz təyyarələrə (qanadlı) aiddir ki, bunlar ümumiyyətlə uzun ömürlüdür və yüksək kruiz sürətində uça bilir.

Fırlanan qanadlı PUA: rotorlu PUA-lar və ya şaquli qalxma və eniş (VTOL) PUA-ları da adlanır ki, bu da uçuş qabiliyyəti və yüksək manevr qabiliyyətinə malikdir. Bu imkanlar bir çox robot missiyaları üçün, xüsusən mülki tətbiqlərdə faydalıdır. Rotorlu PUA-nın müxtəlif konfigurasiyaları ola bilər, əsas və quyruq rotorları (adi vertolyot), koaksial rotorlar, tandem rotorları; çox rotorlu və s.

Blimplər: havadan yüngül olan və uzun ömürlü olan şarlar və dirijabllar kimi, aşağı sürətlə uçar və ümumiyyətlə böyük ölçülüdür.

Flapping-qanadlı PUA: quşlardan və uçan həşəratlardan ilhamlanan çevik və yaxud dəyişkən kiçik qanadları var. Bell Eagle Eye PUA kimi şaquli olaraq qalxa bilən və öz rotorlarını və ya gövdəsini əyərək təyyarələr kimi uça bilən bəzi digər hibrid konfigurasiyalar və ya konfigurasiya edilə bilən konfigurasiyalar da var. Hazırda təyyarələri fərqləndirmək üçün istifadə edilən digər meyar ölçü və dözümlülükdür.

Yalnız çəki parametrinə əsaslanan təsnifatlar da təklif edilmişdir. Turanoguz E., Alemdaroglu N.-ə görə (Turanoguz E., Alemdaroglu N., 2015) PUA-lar missiyasına görə təsnif edilir. Ədəbiyyatda (Cai G., Dias J., Seneviratne L., 2014) MTOW-u 25 kq-dan az olan PUA-ların altı xüsusiyyətinə əsaslanan təsnifat təklif etmişdir. Bu halda PUA-nın mövcud modeli araşdırılıb və nəticədə üç kateqoriya təklif edilib (Cədvəl 1.1): kiçik taktiki, miniatur və mikro PUA-lar. Bu təsnifat şəkil 1.3-də ümumiləşdirilmişdir.

Cədvəl 1.1. PUA təsnifatı (Mohamed Nadir Boukoberinea , Zhibin Zhou , Mohamed Benbouzid, 2019)

Xüsusiyyət	Kiçik taktiki	Miniatur	Mikro
Ölçü	<10m	<5m	<15m
Maksimal uçuş çəkisi	10-25 kq	<10 kq	<100 q
Sürət	<130 m/s	<50 m/s	<15 m/s
Hündürlük	<3500 YSY*	<3500 YSY*	<3500 YSY*
Uçuş uzaqlığı	<50 km	<25 km	<10 km
Dözümlülük	48 saata qədər	48 saata qədər	20 dəqiqəyə qədər

* – MUÇ – Maksimal uçuş çəkisi (MTOW – max takeoff weight)

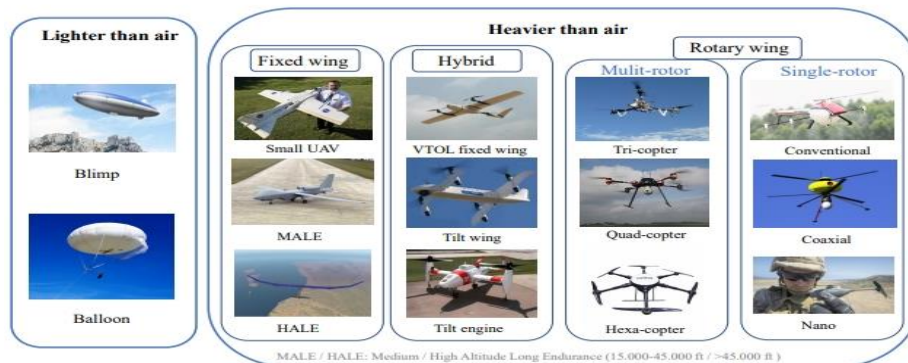
** – YSY: Yer səthindən yuxarı (AGL – above ground level)

Tədqiqatçıların bəziləri PUA konfigurasiyasını nəzərə alaraq yeni təsnifat təqdim ediblər. Onlar çəki və qanadların genişliyinə görə maksimum 1500 kq və 61 m olan pilotsuz təyyarələrin siniflərini müəyyən etmək üçün spektr təklif ediblər. Spektrə altı kateqoriya daxildir: PUA, mikro PUA, mikro hava vasitəsi, nano hava vasitəsi, piko hava vasitəsi və ağıllı toz.



Şəkil 1.3. PUA növləri (Mohamed Nadir Boukoberinea, 2019)

PUA sinfinə üfüqi qalxma və enmə, şaquli qalxma və enmə, hibrid konfigurasiya, helikopter və qeyri-ənənəvi modellər daxildir. Bu tədqiqat həmçinin xüsusi missiyalar üçün istifadə edilən təchiz olunmuş böcək və ya quş olan bio-PUA-nı nəzərdən keçirmişdir. PUA-ları hərbi tətbiqlərdəki rollarına görə təsnifi aşağıdakı kimidir: yüksək hündürlükdə uzun müddətə dözümlülük (HALE), orta hündürlükdə uzun dayanıqlılıq (MALE), taktiki PUA (TUAV), mini PUA, mikro PUA və nano Hava Vasitələri. Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. (1) MTOW və yerə təsir riski, (2) əməliyyat hündürlüyü və havada toqquşma riski (3) muxtariyyət, (4) mülkiyyətə əsaslanan hərbi təsnifatları və digər təsnifatları müzakirə ediblər (Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J., 2015).



Şəkil 1.4. PUA-ların konfigurasiyaya əsaslanan təsnifatı (T. DRONEII.com, UAV configurations slide – Drone Industry Insights, 2016)

Uçuş Kompüterü/təyyarə idarəetmə sistemi: PUA-nı uçurmaq üçün istifadə olunur. Ya uzaqdan idarəetmə üçün ikitərəfli məlumat bağlantısı (radio), ya da təyyarənin idarəetmə sistemində qoşulmuş bort kompüterü (adətən GPS naviqasiyası olur) təyyarənin idarəetmə sistemində qoşulur. Uçuşa nəzarət və əməliyyat sistemi

idarəetmə stansiyalarını, rabitə əlaqələrini, məlumat terminallarını, buraxılış və bərpa sistemlərini, yerüstü dəstək avadanlığı və hava hərəkətinə nəzarət interfeysini özündə birləşdirir.

Aktuatorlar: Sürücülər həmçinin PUAS-ın uçuş və oriyentasiya idarəetmə səthlərini hərəkət etdirmək üçün geniş istifadə olunur. Məsələn, sükan, aileronlar, qapaqlar və burun təkəri. Pilotsuz uçuş aparatlarının digər tətbiq sahələrinə daxili yanma mühərriklərinin qaz klapanının, həmçinin qapı və lyukların açılması və bağlanması daxildir.

Faydalı yüklər: Yüksək və aşağı görüntü imkanlı kameralar, video kameralar, gündüz və gecə kəşfiyyat avadanlığı, yüksək güclü radar, giroskopik, elektro-optik, siqnallar, meteoroloji, kimya-bio, rele (rabitə, naviqasiya siqnalları), müharibə maşınları (ESM, ECM, ECCM), silahlar, yüklər (vərəqələr, ləvazimatlar) və ümumiyyətlə missiya üçün lazım olan hər hansı avadanlıq PUA-lara təyin olunmuş məsələlərin həlli üçün vacibdir. Bir çox PUA dözümlü olmaq üçün yüksək yanacaq payı tələb edir, nəticədə müvafiq aşağı faydalı yük hissəsi, adətən ümumi çəkinin 10-20 faizini təşkil edir.

Sensorlar: Sensor insan girişi, radar, foto və ya video kamera, IR skanerləri və ya ELINT olmadan uçuşu davam etdirmək qabiliyyəti olan əsas funksionallığı təmin etmək üçün istifadə olunur. Sensorlar avtonom idarə olunan raket və mərmilərin rəhbərliyini təmin etmək üçün (lazer) hədəf təyinedicisini daxil edə bilər. PUA-da faydalı yük aşkarlama vasitələri üçün tələblər yalnız kəşfiyyat məlumatlarının toplanmasına və əməliyyatların dəstəklənməsini təmin etmək üçün hədəfin izlənməsinə deyil, həm də döyüş əməliyyatları qaydalarına (ROE) uyğun olaraq hədəfin aşkarlanmasına və müəyyənləşdirilməsinə və hədəf dəqiqliyinin artırılmasına əsaslandığı üçün silahların çatdırılmasına da aiddir.

Naviqasiya sensorları və mikroprosessorlar: Hazırda sensorlar pilotsuz uçuş aparatlarının ən böyük xərc maddələrindən biridir, naviqasiya və tapşırıqları yerinə yetirmək üçün lazımdır. Prosessorlar dronlara bütün missiyaları avtonom şəkildə, praktiki olaraq insan müdaxiləsi olmadan yerinə yetirməyə imkan verir.

Təyyarənin bort kəşfiyyatı (rəhbərlik, naviqasiya və nəzarət): Paylaşım sisteminə "qablaşdırıla" bilən ağıllı imkanlar, öhdəsindən gələ biləcəyi vəzifənin nə qədər çətin olduğu ilə birbaşa əlaqəlidir və insan operatorlarının tələb etdiyi nəzarət dərəcəsi ilə tərs mütənasibdir. Bu texnologiyaların faydalılığını və etibarlılığını nümayiş etdirmək üçün yaxın gələcəkdə təkmilləşdirilməsi üçün çox iş görülməlidir.

Rabitə sistemləri (məlumat bağlantısı) (Hava məlumat terminalı): Rabitə texnologiyasının əsas problemləri rahatlıq, uyğunlaşma, təhlükəsizlik və bant genişliyi, tezlik və məlumat/məlumat axınlarının koqnitiv idarə olunmasıdır. Pilotsuz Uçuş Sistemlərinin data bağlantısı RF transmitter və qəbuledicidən, antenadan və modemlərdən ibarətdir. Pilotsuz Uçuş Sistemləri üçün data bağlantıları üç mühüm funksiyaya xidmət edir:

- (1) İdarəetmə məlumatlarını pilotsuz uçuş aparatına ötürmək üçün yerüstü stansiya və/və ya peyklə yuxarı rabitə xətləri;
- (2) Pilotsuz təyyarədən enən rabitə kanalları bort sensorlarından və telemetrik sistemdən yerüstü stansiyaya məlumat ötürməyə imkan verir;
- (3) Aralarında yaxşı əlaqə saxlamaq üçün yer stansiyasından və peykdən pilotsuz uçuş aparatına qədər azimut və uçuş məsafəsini ölçmək üçün bir vasitə.

Məlumat bağlantılarını standartlaşdırmaq səyləri ümumi məlumat bağlantısının (CDL) istifadəsi ilə nəticələndi, Pilotsuz Uçuş Sistemləri tərəfindən istifadə edildikdə tam duplex, genişzolaqlı data bağlantısı adətən müdaxiləyə davamlı və təhlükəsizdir. Bu keçidlər yer stansiyasını PUA ilə birbaşa, nöqtədən-nöqtəyə keçidlər vasitəsilə birləşdirir və ya peyk rabitəsindən (SATCOM) istifadə edir.

İdarəetmənin tipləri: Pilotsuz təyyarə sisteminin mərkəzi prinsipi operatorun pilot kabinəsindən çıxarılmasıdır; ona görə də təyyarəyənin idarə edilməsi başqa vasitələrlə həyata keçirilməlidir. Operatorun hava gəmisi üzərində tətbiq edə biləcəyi üç nəzarət forması var

- Yerdən idarəetmə və ya uzaqdan pilotlaşdırma;
- Yarı avtonom;
- Tam avtonom.

Yerdən idarəetmə. Yerdən idarə olunan PUA, həmçinin Uzaqdan İdarə olunan Nəqliyyat vasitələri (“RPVs”) adlanır, operatorndan daimi giriş tələb edir. Əslində, RPV-lər “R/C hobbisinə tanış olan eyni əsas texnikalardan istifadə edən mürəkkəb radio ilə idarə olunan təyyarələrdir”. Sırf uzaqdan idarə olunan çox az müasir PUA var. 1980-cı illərdə və 1990-cı illərin əvvəllərində Pointer və Sky Owl kimi sistemlər həm uzaqdan idarəetmə üsullarından, həm də proqramlaşdırıla bilən rəhbərlik sistemlərindən (muxtariyyətin əsas forması) istifadə etməyə başladı. Beləliklə, pilotsuz aviasiya dairələrindəki tendensiya daha çox avtonom sistemlərə yönəlmişdir.

Yarı avtonom: Rəhbərlik sistemlərinin istifadəsi indi adi haldır və yarı avtonom uçuş “uçuşun qalxma, eniş, silahların istifadəsi və bəzi yayınma manevrləri kimi uçuşun kritik hissələri zamanı yerdən giriş tələb edilməsi” kimi müəyyən edilə bilər. İstismarçı uçuşdan əvvəl, qalxma, enmə və baza yaxınlığında fəaliyyət göstərərkən hava gəmisinə tam nəzarəti öz üzərinə götürməlidir, lakin havaya qalxdıqdan sonra avtopilot funksiyası işə düşə bilər və təyyarə əvvəlcədən proqramlaşdırılmış marşrut nöqtələrini izləyəcək. Operator əməliyyat boyu PUA-ya cavabdehdir və istənilən vaxt nəzarəti öz üzərinə götürə bilər.

Tam avtonom: Tam avtonom imkanlar spektrin digər ucunda yerləşir. Nəzəri olaraq, avtonom uçuş, uçuş qərarı verildikdən sonra verilən tapşırığı yerinə yetirmək üçün heç bir insan müdaxiləsini tələb etmir. Avtonom PUA performansını, konfigurasiyasını və proqramlaşdırılmış məhdudiyyətlər daxilində nəqliyyat vasitəsinin göyertəsindəki komanda və idarəetmə vasitələrini izləyə və qiymətləndirə bilər. “Özünü uçmağa” imkan verən kompleks avtopilot demək olar ki, “Operator öz sistemlərini izləməkdən başqa heç nə etmədən”, bütün uçuş boyunca insan müdaxiləsi olmadan proqramlaşdırılmış uçuş yollarında olur. Beləliklə, avtonom idarəetmədə reallıq budur ki, bort kompüterini insan deyil, idarə olunur.

Yerüstü idarəetmə stansiyası (GCS) və ya C3

Pilotsuz uçuş aparatlarının öz texnologiyasına sahib olduğu sahə telekommunikasiya, bələdçilik və idarəetmə texnologiyaları, qatı hal giroskopları və platformaları uçuş nəzarəti baxımından daha etibarlı edən sensorlardır. Müasir

telekommunikasiya texnologiyaları uçuş və tapşırıqları yerinə yetirmək üçün əməlləri çox yüksək sürətlə və uzun məsafələrdə bir hava gəmisinə ötürməyə imkan verir.

Yerüstü İdarəetmə Stansiyası, Nəzarəti və Rabitə (C3): İnsan-maşın interfeysləri, çox təyyarəli C3, hədəfin müəyyənləşdirilməsi, yerüstü avadanlıqların kiçilməsi, səsle idarə edilməsi və s. kimi borddan kənar C3 infrastrukturunun bir neçə əsas aspektləri var. Yuxarıda müzakirə edilən bütün sahələrdə ən müasir texnologiyaların inkişafı tək bir şəxsə bir neçə təyyarəni idarə etməyə imkan verəcək. Uçuşların təhlükəsiz və səmərəli yerinə yetirilməsini təmin etmək üçün PUA onun nəzarəti altındadır. Komanda və idarəetmə funksiyası planlaşdırma, personal, avadanlıq, rabitə, naviqasiya və texniki funksiyalar və prosedurların birləşməsi ilə həyata keçirilir.

C3 sistem modeli

C3 sistem modeli, təyyarə radiotezlikli görmə xəttində və ya görmə xəttindən kənarında işləyə bilər. PUAS-ın komandanlığı, nəzarəti və rabitəsi ilə bağlı texnologiyalar və əməliyyat prosedurları bu iki kateqoriyadan birinə bölünür.

RF LOS (Line-of-Sight) və BLOS (Beyond Line-of-Sight)-un hər bir kateqoriyasına uyğun olaraq, PUAS-ın texniki məsələləri iki kateqoriyaya bölünə bilər: Komandanlıq və İdarəetmə (C2) və Hava Hərəkətinə Nəzarət (ATC). C2 və ATC daxilində müxtəlif məlumat kanalları, o cümlədən onların müvafiq tezlikləri və məlumat dərəcələri yoxlanılır.

LOS əməliyyatlarının BLOS əməliyyatları altçoxlğu: Qeyd etmək lazımdır ki, BLOS PUAS-da bəzi LOS texnologiyaları var. Görmə xətti bölməsinə bütün təyyarələr daxildir, lakin görmə zonasından xaricdə yalnız pilotun komandanlığının RF görmə sahəsindən kənarında fəaliyyət göstərə bilən orta və yüksək davamlı PUAS daxildir.

RF Line-of-Sight C3 Texnologiyaları və Əməliyyatları: Görmə xəttində əməliyyat üç növ pilotsuz uçuş aparatına bölünə bilər: aşağı dozumlülük, orta dozumlülük və yüksək dozumlülük. Birinci sinif demək olar ki, tamamilə görmə xəttində fəaliyyət göstərir.

Beyond RF Line-of-Sight C3 Texnologiyaları və Əməliyyatları: Beyond of Sight PUAS əsasən yüksək dözümlü PUAS-1, lakin görmə qabiliyyətindən kənarında işləyən bir neçə orta dözümlü PUAS-1 əhatə edir. Peyk əsaslı rabitə (SATCOM) pilotsuz təyyarələrlə görüş xəttindən kənar komanda və idarəetmə rabitəsində istifadə olunur.

PUAS üçün ən çox istifadə olunan tezlik diapazonları: Bu rabitələr əsasən RF proqramlarının istifadəsi ilə həyata keçirilir, adətən, PUAS-da peyk rabitəsi əlaqələri ya LOS-da (hərbi tətbiqlər üçün) və ya BLOS rejimində istifadə olunur. Bu növün ən çox yayılmış tezlik diapazonları bağlantılar bunlardır:

Ku diapazonu: tarixən yüksək sürətli bağlantılar üçün istifadə edilmişdir. Qısa dalğa uzunluqlarına və yüksək tezliklərə görə bu zolaq daha çox yayılma itkilərindən əziyyət çəkir. Bununla belə, o, həm də ən çox maneələri aşmağa qadirdir və bununla da çoxlu məlumat ötürür.

K diapazonu: böyük miqdarda məlumat ötürən geniş tezlik diapazonuna malikdir. Əsas çatışmazlıq kimi onu qeyd etmək lazımdır ki, o, güclü ötürücülərə ehtiyac duyur və ətraf mühitin təsirlərinə qarşı həssasdır.

S, L diapazonları: ötürmə sürəti 500 kbps-dən yuxarı olan məlumat bağlantılarına icazə vermirlər. Onların böyük dalğa boyu siqnalları yerüstü infrastrukturuna nüfuz edə bilir və ötürücü K diapazonundan daha az güc tələb edir.

C diapazonu: nisbətən böyük ötürmə və qəbul antenası tələb edir.

X diapazonu: hərbi istifadə üçün ayrılmışdır.

Şəbəkə mərkəzli Kommunikasiyalar: Şəbəkə texnologiyasının inkişafının bir neçə sahəsi var ki, onlar PUAS-nin miqrasiya yolu və onların tranzit şəbəkəsi və ya stub şəbəkə platformaları olmasından asılı olmayaraq şəbəkə xidmətlərini təmin etmək qabiliyyəti üçün vacibdir. Bant genişliyi, sabitlik, etibarlılıq və geniş əlaqə/qarşılıqlı əlaqə təmin etmək üçün şəbəkə rabitə imkanlarını inkişaf etdirmək lazımdır. Bu inkişaf üçün aşağıdakı texnologiyalar vacibdir:

**Cədvəl 1.2. Şəbəkə rabitə imkanlarını inkişaf etdirmək üçün texnologiyalar
(Vəlizadə Ramil, 2024)**

Yüksək Tutumlu İstiqamətli Məlumat bağlantıları	High Capacity Directional Data links
Böyük emal gücü ilə yüksək tutumlu marşrutlaşdırıcılar - Möhkəmləşdirilmiş IP ilə effektiv Genişzolaqlı Routerlər	High capacity routers with large processing capacity - Ruggedized IP enabled Wideband Routers
Modul və Proqramlaşdırıla bilən Router Arxitekturası	Modular and Programmable Router Architecture
Tanınmış və Standartlaşdırılmış Protokollar və İnterfeyslər	Well-known and Standardized Protocols and Interfaces
Mobil Ad-hoc kvazi-stabil şəbəkə - topologiyayı idarə etmək tələbi	Mobile Ad-hoc quasi-stable mesh - requirement to manage topology
Aşağıdakılar arasında qarşılıqlı asılı əlaqələr:	Interdependent relationships between the following:
Kommutasiya/marşrutlaşdırma	Switching/Routing
Topologiya İdarəetmə	Topology Management
QoS – paket səviyyəsi	QoS – packet level
İerarxik idarəetmə	Hierarchical management
Platforma başına birdən çox keçid interfeysi və növləri	Multiple link interfaces and types per platform
Platformalarda Gateway funksionallığı (köhnə, fərqli şəbəkələr)	Gateway functionality on platforms (legacy, disparate networks)
Daxili INFOSEC/şəbəkə təhlükəsizliyi	Embedded INFOSEC/network security
Performansı Artıran Proksilər	Performance Enhancing Proxies

1.2. Pilotsuz Uçuş Aparatlarının elmi tədqiqat məsələlərinin analizi

PUA-lar gələcək araşdırmaları tələb edən bir sıra kritik problemlərə və məhdudiyyətlərə meyllidirlər. PUA-larla bağlı potensial problemlər isə aşağıdakılardır:

- **Fərdi məlumatların qorunması.** Kritik problemlərdən biri mövqe, yer və s. kimi həssas məlumatların dronlardan və ya PUA-lardan təhlükəsizliyini təmin etməkdir. PUA-da şifrələmə olmadığı üçün qaçırılma riski var. Hack və kiberməsuliyyət PUA-lardan istifadənin kritik problemləridir. Hərbi əməliyyatlarda PUA-lar potensial məlumat sızması təhlükələrinə qarşı həssasdır. Hakerlər məlumatları oğurlamaq, məxfiliyə müdaxilə və qaçaqmalçılıq kimi hər hansı qeyri-qanuni fəaliyyət üçün PUA-nın tam nəzarətini ələ keçirə bilirlər.
- **Standartlaşdırma.** PUA-ların geniş şəkildə meydana çıxmasına baxmayaraq, müxtəlif ölkələrin coğrafi ərazilərində PUA-ların əməliyyatları üçün tənzimləyici orqanlar tərəfindən standartlaşdırmaların hazırlanmasına ciddi ehtiyac var. PUA-ların geniş istifadəsində əsas maneə PUA əməliyyatları üçün əhəmiyyətli standartlar və qaydaların qeyri-müəyyənliyi və ya olmaması, icazə verilən hava məkanı, icazə verilən çəki və ölçü, icazə verilən hündürlük, məxfilik və ya məxfilik mülahizələri, təhlükəsizlik tələbləri və xüsusiyyətləridir. PUA-ların həyata keçirilməsi üçün dövlət qaydalarının heterojen olmaması müşahidə edilə bilər. PUA-lar kommersiya təyyarələrinin naviqasiyasına təsir göstərə bilər. Beləliklə, ölkələr PUA-ların düzgün işləməsi üçün qaydalar tətbiq etməlidirlər. Qısaca desək, pis sənədləşdirilmiş hüquqi proseslər və bu texnologiyanın geniş istifadəsini, mövcudluğunu və çevikliyini məhdudlaşdıran uçuş təsdiqlərinin gecikməsi kimi bir sıra narahatlıqlar PUA qaydaları ilə bağlıdır. Bu baxımdan, risklərin azaldılmasını, məxfi məlumatların gücləndirilmiş təhlükəsizliyini və yeni standartlaşdırma tələblərinə sürətli cavab verən standart uyğunluq üçün AI alqoritmləri etibarlı yanaşma ola bilər.

- **Naqilsiz sensorların tətbiqi.** PUA-ların rəvan və uğurlu işləməsi simsiz sensorlar vasitəsilə həyata keçirilə bilər. Məsələn, naqilsiz sensorlar vasitəsilə monitoring və nəzarət yolu ilə smart trafikə nəzarət sistemi əldə edilə bilər.
- **Emal sürəti.** Məhdud ötürmə diapazonu, emal qabiliyyəti və daha yavaş sürət də bu texnologiyayı inkişaf etdirmək üçün daha çox tədqiqat töhfəsi və araşdırmaya ehtiyacı olan PUA-larda bəzi əsas narahatlıqlardır.
- **Batareya məhdudiyyətləri.** PUA-nın yol məhdudiyyətləri və batareya məhdudiyyətləri səbəbindən resursun bölüşdürülməsi mühüm narahatlıq doğurur. Bu, üç aspektdə nəzərə çarpır: PUA-nın sürüşməsi, yerli hesablama və tapşırıqların boşaldılması. Beləliklə, yolun dəqiq planlaşdırılmasının layihələndirilməsi nəticədə əməliyyat xərclərini və hesablanmış performans güzəştə gedə bilər. Effektiv resurs bölgüsü ədalətliliyi, tapşırığın yerinə yetirilməsi vaxtının azaldılmasını, xərclərin azaldılmasını, enerji istehlakının azaldılmasını və hesablama səmərəliliyinin maksimallaşdırılmasını yaxşılaşdırma bilər.
- **PUA-ların yüksək hündürlükdə hərəkətinin təmin edilməsi.** Bəzi PUA-ların sürəti magistral yolda avtomobillərdən və digər maşınlardan daha yavaştır. Bu problemi aradan qaldırmaq üçün mümkün həll yolu tənظیمçiyici orqanlar tərəfindən PUA-ların yüksək hündürlükdə hərəkət etməsinə icazə verməkdir. Beləliklə, PUA-lar sürət məhdudiyyətini aşma bilən geniş baxış sahəsi əldə edə bilərlər. Bəzi PUA-ların yüksək sürəti də kritik məsələdir. 35-70 km/saat sürətlə uçan PUA-lar hər hansı mümkün toqquşmanın qarşısını almaq üçün maneələrdən yayınma xüsusiyyətini ehtiva etməlidir (Khofiyah N. A., Maret S., Sutopo W., Nugroho B. D. A., 2018).
- **PUA enerji təminatı.** PUA-nın işləməsi üçün başqa bir maneə güc məhdudiyyəti, enerji istehlakı və ya məhdud batareyanın ömrüdür. Adətən PUA-lar akkumulyatorla işləyir və batareyanın ömrünün qısa olmasından əziyyət çəkir, ümumiyyətlə 1 saatdan azdır. PUA batareyaları təsvirin təhlili, məlumatların işlənməsi, simsiz rabitə və PUA-nın uçması üçün istehlak olunur. Adətən PUA-lar böyük ərazilər üzərində səyahət etməli və bir neçə dəfə şarj stansiyalarına

qayıtmalıdırlar. SAR əməliyyatlarında PUA-lar fəlakətə məruz qalmış ərazilər üzərində daha uzun müddət uçur. Bu məhdudiyyətlərə görə qərar verilməlidir ki, PUA-ları real vaxt rejimində görüntü və ya məlumat təhlili aparsın, ya yox. Mümkün həll yollarından biri koordinasiya alqoritmləri vasitəsilə tək dronların enerji səmərəliliyi baxımından məhdudiyyətini aşmaqla dron dəstələrinin formalaşdırılmasıdır. Digər maraqlı yanaşmalar enerji doldurma stansiyaları üçün yeni dizaynları və lazer enerjisinin ötürülməsi (LPT) kimi səmərəli WPT üsullarını araşdırmaqdır. Ədəbiyyatda bu problemlərin aradan qaldırılması üçün aşağı gücə malik və itkili şəbəkələrə (LLT) malik PUA-ların enerjiden xəbərdar quraşdırılması təklif olunur.

- **Maneələrdən yayınma.** Dron dəstələrinin tam avtonom və təhlükəsiz işləməsi insan səhvinə, maşın səhvinə və maneələrin toqquşmasına meyilli olduğu üçün çox vacibdir. Beləliklə, toqquşmaların qarşısını almaq üçün kəşfiyyat alqoritmlərinə ehtiyac var. Çoxlu PUA-lar üçün toqquşmaların qarşısını almaq üçün kooperativ formalaşmaya nəzarət alqoritmləri təklif edilmişdir. Bu alqoritmlər LIDAR-lar, RADAR-lar, giroskoplar, akselerometrlər, rəqəmsal kameralar, hava və yer sensorları kimi müxtəlif yerləşdirilmiş mənbələrdən məlumatları birləşdirə bilər.
- **Emal qabiliyyətinin məhdudluğu.** PUA-ların infrastruktur və tikinti monitorinqi üçün istifadəsində məhdud emal qabiliyyəti, qısa uçuş vaxtı və məhdud enerji kimi bir sıra problemlər mövcuddur. İnfrastruktur və tikinti təftişi üçün çoxsaylı PUA-ların əməkdaşlığında tədqiqat boşluğu var. Çoxsaylı PUA-ların əməkdaşlığı layihənin sürətli tamamlanmasını, yüksək səhvlərə dözümlülüyünü və geniş yoxlama əhatəsini təmin edə bilər.
- **Yüklənmə qabiliyyətinin məhdudluğu.** Digər əsas problem yüngül PUA-ların məhdud yük qabiliyyətidir. Bu, PUA-ların rəqəmsal, stereo görmə və termal kameralar, temperatur, GPS aşkarlanması kimi çoxsaylı sensorlar kimi bort yükünü daşımaq qabiliyyətini məhdudlaşdırır. PUA-lardan çəkisi ağır olan lazer skaneri, ultrasəs, RADAR və LADAR kimi sensorları daşımaq tələb olunur (Khofiyah N. A., Maret S., Sutopo W., Nugroho B. D. A., 2018).

- **PUA trayektoriyalarında kənarçıxmalar.** Fırtına, yağış və külək kimi əlverişsiz hava şəraiti zamanı PUA-nın kənd təsərrüfatı kimi müxtəlif tətbiqlər üçün yerləşdirilməsi əvvəlcədən müəyyən edilmiş trayektoriyalarda arzuolunmaz sapmalar səbəbindən çətindir. Hava şəraiti həmçinin əməliyyat müddətinə, yolun hündürlüyünə, PUA hündürlüyünə və uçuş istiqamətinə təsir göstərir. Təbii fəlakət şəraitində, məsələn, tayfunlar, qasırğalar və ya sunamilər, atmosfer vəziyyəti PUA missiyaları üçün əsas problemə çevrilir. Bu zərərli şəraitdə PUA-lar havada hərəkət edə bilməz, dəqiq oxu və ya məlumat ala bilməz və ekstremal şəraitdə işləyə bilməz. Buna görə də, tədqiqatçılar bu mənfi hava şəraitinə tab gətirmək və meteohəssas missiyaları səmərəli və təhlükəsiz şəkildə yerinə yetirmək üçün spesifikasiyalara və PUA imkanlarına müraciət etməlidirlər.
- **PUA-ların sığorta problemi.** PUA-ların vurduğu ziyanı görə müvafiq sığorta məsuliyyəti olmalıdır. Bir sıra media hesabatlarında PUA qəzaları nəticəsində yumşaq toxuma xəsarətləri, göz itkisi və ciddi yarımalar təsvir edilir. PUA-nın qəzaya uğraması nəticəsində maddi ziyan və xəsarətlərlə yanaşı, PUA təyyarələrlə də qəzaya səbəb olur, zədələnmiş mallar və düşmüş yüklər məsuliyyət daşıyır. PUA-dan istifadə üçün məsuliyyət fərdi məlumatların məxfiliyinə böyük təhlükə yaradır.
- **Həssas ərazilərdə PUA-ların foto və ya video çəkiliş aparması.** Məxfiliklə bağlı digər əsas narahatlıq PUA-ların istifadəsi ilə əlaqədar yaranır. PUA-lar foto və ya video çəkə bilən kameralar və ya digər avadanlıqlarla birləşdirilir; fərdin məxfiliyinin pozulması ilə nəticələnə bilər. ABŞ-da bu problemi həll etmək üçün Demokratiya və Texnologiya Mərkəzi (CDT) Federal Aviasiya Administrasiyasını (FAA) məxfiliyin qorunması üçün xüsusi qaydalar hazırlamaq üçün məlumatlandırdı. Bu məqsədlə məxfiliyin pozulmasına görə kompensasiyaları dəstəkləyən Privacy by Design (PbD) təqdim edildi. PbD qaydaları məxfiliyə müdaxiləni xüsusilə məhdudlaşdırır. Üstəlik, PUA-ların ardıcıl uçuşları bəzi şirkətlərin bazar dəyərini üzə çıxararaq zərər verə bilər.
- **PUA kibertəhlükəsizliyi.** Müvafiq DoS/DDoS-a davamlı strategiyaların mövcud olmaması səbəbindən PUA-lar əsasən qaçırma, xidmətdən imtina (DoS) və

paylanmış DoS hücumlarından əziyyət çəkir. Qaçırılma yolu ilə signal saxtakarlığı bəzi PUA-ların davranışına zərər verə bilər. GPS Signalının saxtalaşdırılması hücumları hücumçu tərəfindən GPS kanallarından yanlış məlumatların yerləşdirilməsi və ya yeridilməsi nəticəsində baş verir. Qaçırma zamanı PUA-nın tam nəzarəti əlavə əmrlərin daxil edilməsi ilə oğurlana bilər. Eynilə, sessiyanın qaçırılması PUA-ların rabitə əlaqələrinə ciddi ziyan vura bilər. Bundan əlavə, DoS hücumları əlçatanlıqla bağlı ciddi problemlər yaradır, çünki təcavüzkar çoxsaylı sorğular göndərərək şəbəkənin sıxılmasına səbəb ola bilər. DoS hücumları rabitə əlaqələrində məlumatların daşması nəticəsində kəsilmələrə səbəb olur, emal qurğularına əlavə yük verir və batareyaları tükəndirir. DDos-da təcavüzkar əlçətməzlik problemlərini təqdim etmək üçün bir neçə mənbədən trafik göndərərək PUA-nı üstələyir. Bu hücumlar signalın təhrif edilməsini hiss etmək, izləmək və yüksək autentifikasiya ilə azalda bilər.

- **Autentifikasiya strategiyalarının olmaması.** Bəzi ssenarilərdə təcavüzkar bəzi səhv xəbərdarlıq mətnləri göndərərək PUA-ları yanlış istiqamətləndirə bilər. Bu, şəbəkə tıxaclarına səbəb ola bilər. Təcavüzkar PUA-nın performansını əhəmiyyətli dərəcədə aşağı salmaq üçün yalan məlumat, səhv əmrlər və ya korlanmış məlumat vermək üçün qanuni istifadəçi kimi görünə bilər. Bu hücumlar autentifikasiya strategiyalarının olmaması səbəbindən baş verir, çünki hər hansı bir rəqib şəbəkəyə müdaxilə etmək üçün qanuni istifadəçi kimi davranmağa bilər.
- **Uçuş kontrollerinə kiberhücum.** Digər kritik hücum, PUA-nın uçuş nəzarətini dayandırmaq üçün missiya təlimatlarını və ya parametrlərini dəyişə bilən uçuşa nəzarət kompüter hücumudur. Bu cür hücumlardan qorunmaq üçün borda olan proqram təminatı və ya aparat vasitələrindən istifadə edilə bilər. O, hər hansı bir mümkün riskə dərhal reaksiya vermək üçün xəbərdarlıq yaratmaq, nəzarətçi qiymətləndirməsi və ya real vaxt monitorinqini ehtiva edə bilər.
- **Məxfi məlumatların oğurlanması.** Bəzi ssenarilərdə PUA aparat komponentləri dəqiq cavab vermir və hədəf davranışını dəyişir. Bu cür hücumlar PUA missiyasının uğursuzluğuna səbəb olmaq və ya məxfi məlumatları oğurlamaq üçün həyata keçirilir.

- **Təhlükəsizlik risklərinə qarşı mübarizə.** PUA rabitəsinə, infrastruktura və etibarlılığa qarşı daim təkmilləşən təhlükəsizlik riskləri ilə mübarizə aparmaq üçün qabaqcıl mexanizmlərin işlənilib hazırlanması çox vacibdir. Çatdırılmaya əsaslanan PUA-larla bağlı əsas təhlükəsizlik problemi təcavüzkarın yükünü oğurlaya və ya zədələyə biləcəyidir. Multimedia, əyləncə və ya kommersiya əsaslı PUA-lar olduqda, onun ötürülməsinin pozulması bütün şəbəkə performansına ciddi təsir göstərə bilər. Belə ssenaridə PUA-nın autentifikasiyası tələb olunur ki, bu da həddindən artıq gecikmələrə səbəb ola bilər. Müxtəlif təhlükəsizlik problemlərinin öhdəsindən gəlmək üçün maşın təlimi alqoritmləri təklif olunur.

Yuxarıda sadalanan problemlərdən əlavə olaraq ədəbiyyat mənbələrində PUA ilə bağlı aşağıdakı məsələlərin həllinə həsr olunmuş maşın təlimi və dərin təlim əsaslı yanaşmalar işlənmişdir: Müdaxilə etmək mövqeyində olan PUA-lardan qorunmaq, PUA-nın qeydə aldığı video yazıların məxfiliyinin, tamlığının, konfidensiallığının qorunması, PUA identifikasiyası, zərərli PUA-ların ələ keçirilməsi, dinləmə hücumlarının aşkarlanması, GPS spufinq və jamming hücumlarının aşkarlanması.

1.3. Pilotsuz Uçuş Aparatlarının əsas elmi tədqiqat məsələlərinin müəyyən edilməsi

Bu bölmədə Pilotsuz Uçuş Aparatlarının etibarlılığının və enerji təminatının idarə edilməsi istiqamətində əsas elmi tədqiqat problemləri müəyyən edilmişdir. Problemlərin müəyyən edilməsi PUA-ları təşkil edən komponentlərə, onun xarakteristikalarına uyğun aparılmışdır.

1. PUA batareyasının sağlamlıq vəziyyətinin proqnozlaşdırılması.

PUA-lar enerji tutumunun yüksək olması və enerjisinin öz-özünə boşalması (self discharge) ehtimalının az olması səbəbindən əsasən litium əsaslı batareyalardan istifadə edirlər. Lakin zaman keçdikcə PUA-lardakı batareyalar sıradan çıxır. Bu vəziyyət uçuş gecikmələri, məcburi qəzalar və əlaqə kəsintiləri də daxil olmaqla bir çox problemlərə səbəb ola bilər. Burada batareyadakı nasazlıqlar və ya batareyanın tükənməsi PUA-ların etibarlılığının azalması ilə nəticələnər (Boukoberine M., Zhou Z., Benbouzid M.,

2019). PUA batareyasında yaranmış deqradasiyanın vaxtında müəyyən edilməməsi böyük xərc itkisinə səbəb ola bilər. Bütün bu problemlər PUA sistemində batareyanın etibarlı idarə edilməsi sisteminin işlənməsini zəruri edir. Burada qurulmuş model batareyanın vəziyyətini dəqiq müəyyən etmək üçün süni intellekt üsullarına əsaslanmalıdır.

2. PUA proqram təminatında xətalara aşkarlanması.

Pilotsuz Uçuş Aparatlarının etibarlılığının təmin edilməsində mühüm məsələ PUA proqram sistemlərində xətalara aşkarlanması hesab edilir (Puchalski Radosław, Giernacki Wojciech, 2022). Proqram sistemlərinin mürəkkəb quruluşa malik olması bu sistemlərdə yol verilmiş xətalara aşkarlanması prosesini olduqca çətinləşdirir. Layihə menecerləri proqram məhsullarında xətalara proqnozlaşdırılan metodlardan istifadə etməklə adətən bu xətalara sistem test edilməzdən əvvəl aşkarlaya bilər. Proqram məhsullarında xətalara aşkarlanması üçün qərar ağacı, loqarifmik reqressiya, qeyri-səlis məntiq, neyron şəbəkələri, genetik alqoritm kimi məşhur aparatlara əsaslanan vasitələr təklif edilmişdir. Bu yanaşmaların test edilməsi prosesində verilənlər bazasında kənarçıxmaların (outlier) olması faktı nəzərə alınmamışdır. Bu səbəbdən verilənlər bazasında kənarçıxma olduqda mövcud metodların aşkarlama dəqiqliyi olduqca azalır.

Kənar element (outlier) şablonun real elementlərindən fərqli qiymətlər alan elementlərdir. Yəni verilənlər obyektinin qiyməti əlamət üçün təyin edilmiş sərhəd qiymətlərini aşarsa lakin verilənlər obyektinin sinifi xətasız kimi təsnifatlaşdırılırsa, həmin element kənar element kimi qəbul olunur. Və əksinə əgər verilənlər obyektinin qiyməti əlamət üçün təyin edilmiş sərhəd qiymətlərindən aşağıdırsa lakin verilənlər obyektinin sinifi xətalı kimi təsnifatlaşdırılırsa, həmin element kənar element kimi qəbul olunur.

Sistemin proqram məhsullarında yol verilmiş xətalara aşkarlanmasında dəqiqliyi yüksəltmək üçün klassifikatorların birləşdirilməsi zəruri hesab olunur (Алыгулиев Р.М., Имамвердиев Я.Н., Абдуллаева Ф.Д., 2017).

3. PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarəetmə modelinin işlənməsi.

PUA enerji sistemi aviasiya sənayesində ən aktual tədqiqat məsələsinə çevrilmişdir (Gong A. , Verstraete D., 2017). ANSI (American National Standards Institute) təşkilatı tərəfindən dərc olunan təlimatda (Standartization roadmap for Unmanned Aircraft Systems, ANSI, 2018) PUA enerji təminatının standartlaşdırılması mühüm elmi-tədqiqat istiqaməti kimi müəyyən olunur. Pilotsuz uçuş aparatının enerji təchizatı sistemi planlaşdırarkən onun faktiki enerji ehtiyacını nəzərə almaq çox çətin olur. Çünki ətraf mühit və pilotsuz təyyarənin vəziyyəti dəyişdikcə ehtiyac dinamik olaraq dəyişir.

Yanacaq komponentinin batareya ilə birləşdirilməsindən formalaşdırılan hibrid enerji sisteminin istifadəsi PUA üçün ən perspektivli alternativ enerji sistemlərindən birinə çevrilib. Bu hibrid sistem PUA enerji tələbatında fluktuasiyalara cəld cavab verməyə imkan verə bilər.

FƏSİL 2. PİLOTSUZ UÇUŞ APARATLARINDA BATAREYA KÖHNƏLMƏSİNİN PROQNOZLAŞDIRILMASI ÜÇÜN DƏRİN TƏLİM METODLARININ TƏDQIQI

2.1. Pilotsuz uçuş aparatlarının enerji mənbələrinin tədqiqi

Batareyalı PUA-lar. Kiçik PUA-ların əksəriyyəti, xüsusən də kvadrkopterlər batareya ilə işləyir. Batareya ilə işləyən tipik kiçik PUA-lar batareya paketinin çəkisi ilə bağlı məhdudiyyətlərə görə qısa davamlılığa malikdir. LiPo batareyalarından istifadə edərək maksimum 90 dəqiqə uça bilirlər. Nəticə etibarilə, bu kiçik miqyaslı PUA-lar adətən kommersiya məqsədləri üçün nəzərdə tutulub. Litium batareyaları kiçik PUA-lar üçün onların aşağı çəkisi və nisbətən yüksək spesifik enerjisi ilə seçilir. Həqiqətən də, LiPo batareyaları çəkisi 2 kq-dan və uzunluğu 100 sm-dən az olan mikro hava gəmilərinin demək olar ki, 90%-ni qidalandırır (Hassanalian M., Abdelkefi A., 2017). Cədvəl 2.1-də dörd növ batareya texnologiyasının əsas xüsusiyyətləri, yəni xüsusi enerji, enerji sıxlığı və xüsusi güc təfərrüatları verilir. Bu, müəyyən bir tətbiqi və missiyası olan PUA üçün texnologiya seçiminə imkan verəcək. Donateo T., Ficarella A., Spedicato L., Arista A., Ferraro M. müxtəlif batareya texnologiyaları müəyyən bir tapşırıq üçün doldurulma vəziyyəti (SOC) baxımından qiymətləndirirlər (Donateo T., Ficarella A., Spedicato L., Arista A., Ferraro M., 2017).

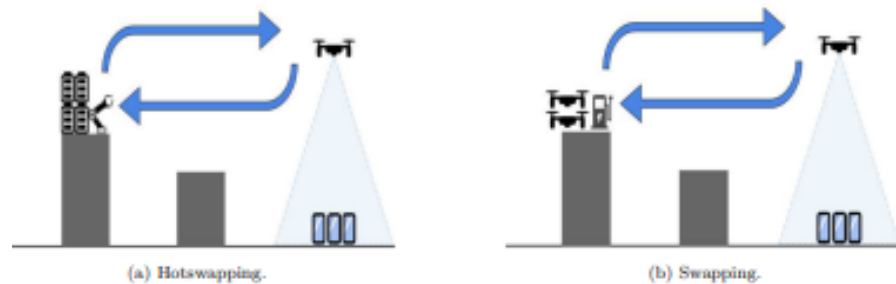
**Cədvəl 2.1. Batareya texnologiyasının əsas xüsusiyyətləri
(Mohamed Nadir Boukoberinea, 2019)**

Characteristic	Ni-Cd	Ni-Mh	LiPo	Li-S
Specific energy (Wh/kg)	40	80	180	350
Energy density (Wh/l)	100	300	300	350
Specific power (W/kg)	300	900	2800	600

Donateo T., Ficarella A., Spedicato L., Arista A., Ferraro M. Traub batareyası ilə işləyən PUA-nın performansına təsir edən parametrlər araşdırıblar və batareyanın boşaldılması şərtlərini nəzərə alaraq diapazonu və dözümlülüyü qiymətləndirmək üçün

riyazi ifadələr işləyiblər (Donateo T., Ficarella A., Spedicato L., Arista A., Ferraro M., 2017). Batareya ilə işləyən elektrik nəqliyyat vasitələrinin ən böyük problemlərindən biri avtonomiyanın azalmasıdır. Beləliklə, intensiv tədqiqat səyləri batareyaların işləmə müddətini uzatmaq və elektrikli nəqliyyat vasitələrinə uzunmüddətli missiyaları yerinə yetirmək imkanı vermək üçün onların performansının yaxşılaşdırılmasına yönəldilmişdir. Batareyaların xüsusiyyətlərində irəliləyişlərə baxmayaraq, mövcud batareya texnologiyasının xüsusi enerjisi hələ də dözümlülüyü və məsafəni məhdudlaşdırır. Mövcud PUA-ların əksəriyyəti birdən çox enerji mənbəyi ilə təchiz edilir, burada batareyalar, yanacaq elementləri, günəş batareyaları və superkondensatorlar PUA enerji təchizatı ilə hibridləşir.

Dəyişilmə (Hotswapping). Mübadilə missiyası zamanı PUA-nın tükənmiş batareyalarını doldurmaq üçün istifadə edilən bir texnikadır. O, avtonom və ya insan tərəfindən idarə oluna bilər. Hotswapping, tükənmiş batareyanın tam doldurulmuş batareya ilə əvəz edildiyi və PUA-nın işə salındığı xüsusi bir texnikadır. Şəkil 2.1 batareyanın dəyişdirilməsi üsullarını təsvir edir.



Şəkil 2.1. Batareyaların dəyişdirmə texnikaları (Mohamed Nadir Boukoberinea, 2019)

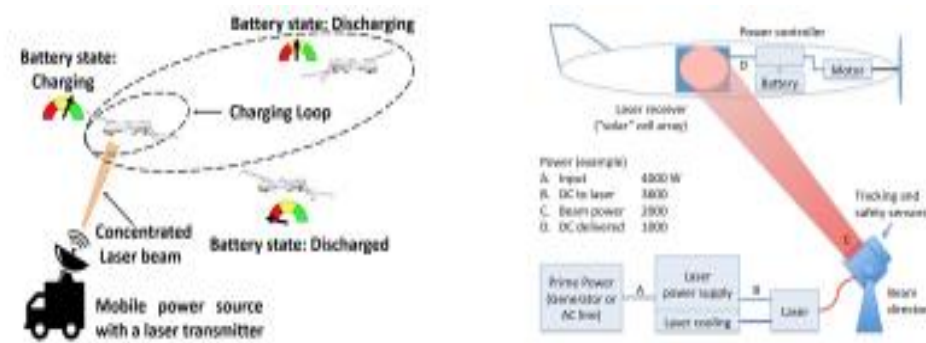
Uçuşda lazer şüalarının doldurulması

Mübadilə yanaşması batareyaya əsaslanan PUA-ların iş vaxtını batareyaların doldurulması/dəyişdirilməsi üçün yer stansiyası məhdudluğu ilə uzatmaq üçün yaxşı bir həll kimi görünür. Bu, nəticədə PUA-ların uçuş müddətinə və əməliyyat səmərəliliyinə təsir göstərir. Bu kontekstdə alternativ yanaşma kimi simsiz enerji doldurma təklif edilmişdir (Lu M., Bagheri M., James A. P., Phung T., 2018).

Tələb olunan yerüstü stansiyaya havada olarkən PUA-ya işıq şüası ötürən lazer generatorunu təmin etmək üçün əsas enerji mənbəyi daxildir. Quraşdırılmış optik

qəbuledici işığı PUA-nı gücləndirən elektrik enerjisinə çevirir. Bu texnologiya PUA-lara batareyaları doldurmaq üçün eniş ehtiyacı olmadan qeyri-müəyyən müddətə uçuşda qalmağa imkan verir. Doldurma tələb olunduqda, PUA enerji almaq üçün hava enerjisi bağlantısı sahəsinə qoşulur. Beləliklə, uçuş və eniş risklərinin aradan qaldırılması ilə təhlükəsizlik yaxşılaşdırılır. Lazer ötürücüləri lazer şüasının maneə törətməməsi üçün hündür binaların damlarında və ya mobil stansiyada yerləşdirilir (şəkil 2.2). Sürətli enerji ötürülməsini təmin etmək üçün PUA ilə ən yaxın enerji mənbəyi arasında radiasiya əlaqəsi yaradılacaq. Lazer Motive tərəfindən yüzlərlə vatt enerji ötürməyə imkan verən işləyən prototip hazırlanmışdır (Ouyang J., Che Y., Xu J., Wu K., 2018). Bundan əlavə, aparılan təcrübələr kvadrokopter üçün 12 saatdan çox uçuş müddətini təsvir edən texnikanın mümkünlüyünü nümayiş etdirdi. Həm mexaniki dizaynın, həm də uçuş idarəetmə sisteminin təqdim edildiyi bu işdə ölçü, faydalı yük və PUA-nın müəyyən bir tətbiqə uyğunlaşması nəzərə alındı.

Lazer şüası ilə uçuş zamanı doldurulma yavaşması PUA-nın lazer ötürücüdən enerji ötürülməsini saxlamaq üçün azaldılmış hündürlüklərdə və bəzən məhdud ərazidə işləməsini məhdudlaşdırır. Bu kontekstdə, Federal Aviasiya Administrasiyasının (FAA) qaydaları kiçik PUA-lar üçün maksimum hündürlüyü 400 futla məhdudlaşdırır (Fact Sheet – Small Unmanned Aircraft Regulations (Part 107), 2019). Bu qayda çəkisi 26 kq-dan az olan kommersiya və dövlət PUA-larına aiddir. Bundan əlavə, hər bir PUA üçün lazer ötürücü tələb olunur, bu da ərazidə yerləşdirilən PUA-ların sayını məhdudlaşdırır və ya yaxınlaşma xərclərini əhəmiyyətli dərəcədə artırır (Galkin B., DaSilva L. A., 2018).



Şəkil 2.2. Lazerlə idarə olunan pilotsuz uçuş aparatları (Mohamed Nadir Boukoberinea, 2019)

Bağlanmış PUA-lar

PUA-lar enerji təchizatına qoşulduqda qeyri-məhdud avtonomluğa malik ola bilər. Nə havada, nə də yerə enməklə təkrar enerji doldurmağa ehtiyac qalmayacaq, çünki elektrik enerjisi yerüstü elektrik təchizatı stansiyası tərəfindən qoşulma xətləri vasitəsilə fasiləsiz olaraq təmin ediləcək. Bu, həmçinin PUA ilə yer stansiyası arasında təhlükəsiz və səmərəli məlumat ötürülməsinə imkan verəcək. Kilo vat enerji fiber optik kabledə yüksək intensivlikli işıqdan istifadə etməklə ötürülə bilər. Optik güc elektrik imzasını aradan qaldıraraq aşkarlanma qabiliyyətini azaldır. O, həm də batareya yükünü və elektrik xətlərinin çəkisini mis naqilə nisbətən səkkiz dəfə azalda bilər (Powerlight Technologies — Power Over Fiber Case Study — Aerial Applications, 2019). Bundan əlavə, lif texnologiyası yüksək hündürlükdə daha faydalıdır. Şəkil 2.3 birləşdirilmiş PUA-ların illüstrativ iki nümunəsini təqdim edir.



Şəkil 2.3. Birləşdirilmiş PUA-lar (Mohamed Nadir Boukoberinea, 2019)

Yanacaq xanlı PUA-lar

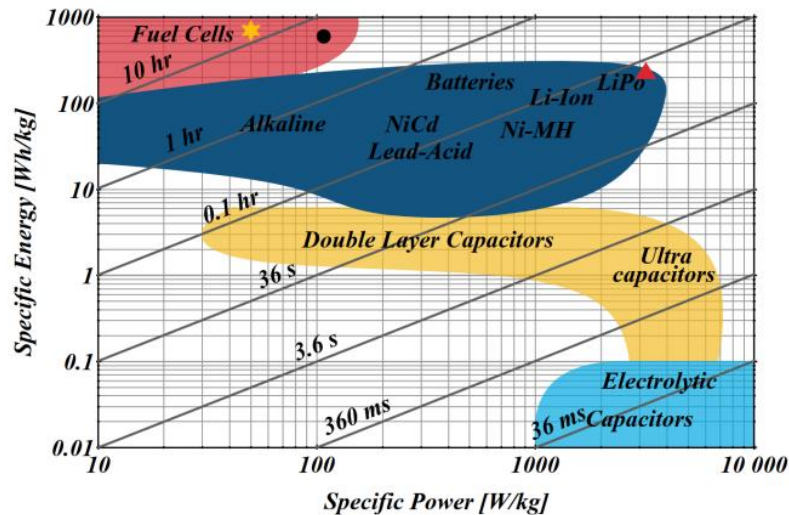
Hidrogenlə işləyən PUA-lar, Şəkil 2.4-də göstərildiyi kimi, ənənəvi batareyalardan istifadə edildikdə bir neçə dəqiqə əvəzinə saatlarla uça bilər (Pan Z., An L., Wen C., 2019).



Şəkil 2.4. MMCs HyDrone 1550 multikopter 1800W H1-Fuel Cell ilə təchiz edilmişdir (Mohamed Nadir Boukoberinea , Zhibin Zhoub , Mohamed Benbouzid, 2019)

Məsələn, LiPo batareyaları 250 Vt/kq-a qədər xüsusi enerjiyə malikdir (Varshney A., Gupta D., Dwivedi B., 2017), sıxılmış hidrogen çəni olan yanacaq hüceyrəsi sistemində isə bu, 1000 Vt/kq-a çata bilər. Bundan əlavə, yanacaq doldurma prosesi demək olar ki, dərhal həyata keçirilir, halbuki (yenidən doldurulması) batareyalarla çox vaxt aparır.

Belmont və başqaları (Belmonte N., Stauro S., Fiorot S., Luetto C., Rizzi P., Baricco M., 2018) mobil kranları yoxlamaq üçün pilotsuz uçuş aparatının inkişafını araşdırdılar. Proton mübadiləsi membran yanacaq hüceyrələrinə və litium-ion batareyalara baxdılar və iqtisadi və həyat dövrü qiymətləndirmələri baxımından təhlil etdilər. Əsas gəldikləri nəticə, yanacaq hüceyrələrinin iqtisadi baxımdan litium-ion batareyalardan daha bahalı olması idi.

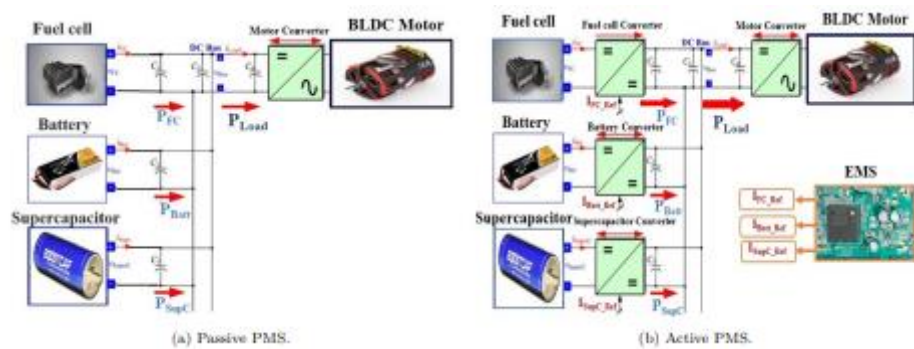


Şəkil 2.5. Enerji mənbələri arasında xüsusi enerji/güc müqayisəsi (Mohamed Nadir Boukoberinea , Zhibin Zhou , Mohamed Benbouzid, 2019)

Güc İdarəetmə Strategiyaları

Hibridləşdirmə PUA-larda hərəkət sistemini gücləndirmək üçün ən uyğun arxitekturadır. Bu, müxtəlif enerji mənbələrinin üstünlüklərini və performanslarını birləşdirməyə və onların məhdudiyyətlərini balanslaşdırmağa imkan verir. Beləliklə, enerjinin səmərəli istifadəsinə nail olmaq və enerji mənbələrinin yüksək performanslı işləməsini təmin etmək, eyni zamanda onların ömrünü mümkün qədər uzatmaq üçün enerji mənbələri arasında optimal şəkildə bölünməlidir. Beləliklə, səmərəlilik, sürətli reaksiya, yanacaq sərfiyyatı, tələb olunan güc və uçuş şəraiti kimi məhdudiyyətləri

nəzərə alaraq, mövcud mənbələr arasında gücün real vaxtda bölünməsi üçün enerji idarəetmə sistemi və ya strategiyası (PMS) həyata keçirilməlidir. Bu yanaşma aktiv enerji idarəetmə strategiyasıdır, burada enerji çıxışları enerji idarəetmə bölməsi tərəfindən konvertorlar vasitəsilə idarə olunur. Güc kiçik PUA-lar üçün geniş istifadə olunan passiv üsulla da təmin oluna bilər. Bu halda, enerji mənbələri birbaşa DC keçidinə qoşulur və öz xüsusiyyətlərinə uyğun olaraq hərəkəti təmin edir. Nə əlavə güc çeviricilərinə, nə də nəzarətçilərə ehtiyac yoxdur, buna görə də mürəkkəbliyi, çəkisi və güc itkilərini əhəmiyyətli dərəcədə azaldır (Lee B., Kwon S., Park P., Kim K., 2014). Həm passiv, həm də aktiv idarəetmə arxitekturaları Şəkil 2.6-da təsvir edilmişdir.



Şəkil 2.6. Aktiv və passiv idarəetmə arxitekturaları (Mohamed Nadir Boukoberinea , Zhibin Zhou , Mohamed Benbouzid, 2019)

Lee uçuş testlərinin nəticələrindən və güc simulyasiyasından istifadə edərək həm aktiv, həm də passiv PMS-lərin üstünlükləri və çatışmazlıqları araşdırıldı (Lee B., Kwon S., Park P., Kim K., 2014). Tədqiq olunan hibrid enerji təchizatı sistemi yanacaq elementi, batareya və günəş elementlərindən ibarətdir. O, aşağı sürətli uzunmüddətli PUA-lar üçün nəzərdə tutulub. Simulyasiya nəticələri göstərdi ki, passiv PMS batareyanın minimum SOC-ni saxlaya bilmir, buna görə də onun ömrünə təsir edir və sistemin nasazlıq ehtimalını artırır. Digər tərəfdən, aktiv PMS istifadə edərək enerji itkiləri 4,7% -ə çatdı. Bu çərçivədə, iki PMS eyni şərtlərdə qiymətləndirilmir. Həqiqətən, passiv PMS sadəcə simulyasiya edildi, aktiv isə eksperimental olaraq həyata keçirildi. Bundan əlavə, uçuşla bağlı bir çox şərtlər nəzərə alınmadı. Cədvəl 2.2 aktiv və passiv PMS-lərin müqayisəsini təqdim edir

Cədvəl 2.2. Aktiv və passiv PMS-lərin müqayisəsi (Mohamed Nadir Boukoberinea , Zhibin Zhou , Mohamed Benbouzid, 2019)

PMS	Advantages	Disadvantages
Active	<ul style="list-style-type: none"> - Optimized power usage - Safety of power system - Efficiency - No prior sizing to sources is needed 	<ul style="list-style-type: none"> - Weight - Complexity - Power losses in converters
Passive	<ul style="list-style-type: none"> - Simple - Light - Power losses are reduced 	<ul style="list-style-type: none"> - Power distribution Low efficiency - Sources Reduced lifetime - Energy sources strict sizing required for reliable DC bus sharing

Qayda-əsash strategiyalar

Qaydalara əsaslanan strategiya sadəliyində, əvvəlcədən müəyyən edilmiş şərtlərdən (əgər o zaman qaydalardan) istifadə etməklə idarəetmədə etibarlılığına görə ən geniş yayılmış nəzarət strategiyalarından biridir. O, adətən EMS-in onlayn həyata keçirilməsinə imkan verən çox aşağı hesablama dəyəri ilə xarakterizə olunur. Lee yanacaq hüceyrəsi, batareya və günəş batareyaları da daxil olmaqla hibrid enerji sistemi ilə idarə olunan PUA-nı idarə etmək üçün PMS-ni araşdırdı (Lee B., Kwon S., Park P., Kim K., 2014). Təklif olunan PMS, hər bir enerji mənbəyi çıxışını təyin etmək üçün tələb olunan gücü və batareya SOC-ni nəzərə alır. Bu işdə günəş batareyaları əsas mənbə kimi istifadə olunur, çünki bortda yanacaq tələb etmir. PMS güc çıxışlarını idarəetmə dəyişənləri kimi nəzərdən keçirir və DC-DC çeviriciləri vasitəsilə hər bir mənbənin terminal gərginliyini (20-36 V) təyin edir. Yanacaq elementi PUA-nı nominal şəraitdə işləmək üçün yalnız müəyyən edilmiş güc intervalında (50-180 Vt) təmin edir. PMS ilə paralel olaraq, batareyanın idarəetmə sistemi tam doldurulduqda batareyanın həddindən artıq doldurulmasının qarşısını alır. PUA-nın təhlükəsiz istismarı üçün minimum 45% SOC təyin edilmişdir.

PV/batareya ilə işləyən uzunmüddətli PUA üçün əsaslanan EMS təklif edilmişdir. Birinci mərhələdə mövcud PV enerjisi üç hissəyə bölünür, burada birincisi PUA-nı gücləndirir, ikincisi növbəti mərhələdə istifadə etmək üçün saxlanılır və sonuncu hissə batareyanı doldurmaq üçün istifadə olunur. İkinci mərhələ günəş şüalarının azalması ilə başlayır. Bu halda, PUA-nın güc kəsiri qismən yığılmış enerji və qravitasiya sürüşməsinin istifadəsi hesabına ödənilir. Son mərhələ, ümumi günəş

enerjisi çatışmazlığı halında, batareya PUA-nı aşağı hündürlükdə gücləndirir və təhlükəsiz eniş (missiyanın sonu) təmin edir. Bu simulyasiya tədqiqatında təklif olunan PMS külək effektini nəzərə alır və başqa idarəetmə strategiyası ilə müqayisədə enerjiyə qənaətin təxminən 23,5%-ni göstərmişdir.

Gang və Kwon PV sistemi (batareya da daxil olmaqla) və yanacaq hüceyrəsi əsaslı sistem arasında enerji təchizatının dəyişdirilməsinə əsaslanan güc dəyişdirmə texnikasını təklif etdilər (Gang B. G., Kwon S., 2018). Bərk hal relələri vəziyyətlərinə, güc tələblərinə və uçuş şərtlərinə görə ən uyğun enerji mənbəyini və ya hər ikisini seçmək üçün istifadə olunur. PMS yanacaq hüceyrəsi sistemini işə saldıqda, PV sistemi gözləmə rejiminə keçərkən, yük gücünü verir. Bu dövrdə yaranan PV gücü batareyanı doldurmaq üçün istifadə olunur. Müəlliflər öz hibrid PUA-larını layihələndirib inşa ediblər və onlar 1,5 saat ərzində uçuş sınağı keçiriblər. Bununla belə, nə keçid qaydaları, nə də idarəetmə alqoritmi izah edilməmişdir.

Savvaris akkumulyator/yanacaq elementi hibrid sistemini idarə etmək üçün sadə qaydaya əsaslanan alqoritm təklif etmişdir (Leonard J., Savvaris A., Tsourdos A., 2014). Güc cərəyan əvəzinə idarəetmə dəyişəni kimi qəbul edilir. Relələr hər bir mənbə enerji axınını aktivləşdirmək və ya söndürmək üçün istifadə olunur. Bu kontekstdə üç iş rejimi nəzərdən keçirilmişdir: İki mənbənin PUA-nı təchiz etdiyi paralel rejim; batareyanın doldurulması zamanı şarj rejimi; və yükləmə rejimi (əvvəlki rejimlər arasında). Simulyasiyalarla yanaşı, HIL əsaslı təcrübələr də aparılmışdır. Lakin əsl PUA ilə uçuş sınağı olmayıb və dözümlülük məsələsi müzakirə olunmayıb.

Məhdud termostat nəzarəti (CTC) strategiyası Peng, Zheng, Chai, Li tərəfindən təklif edilmişdir (Peng L., Zheng S., Chai X., Li L., 2018). Alqoritm günəş batareyalarını əsas mənbə kimi təyin edir ki, bu da əlavə enerji olduqda batareyanı doldura bilir. Bundan əlavə, strategiya günəş batareyaları və yanacaq elementi lazımı gücü ödəyə bilmədiyi zaman təhlükəsiz enişi təmin etmək üçün uçuş zamanı batareyanın aşağı həddi (30%) saxlayır. SOC müəyyən edilmiş həddən yüksək olduğu müddətcə batareya enerji təchizatına kömək edir. Bu, ən azı HIL əsaslı doğrulama tələb edən simulyasiyaya əsaslanan bir araşdırma idi.

Qeyri-səlis məntiq strategiyaları

Qeyri-səlis məntiqə əsaslanan PMS, enerji səmərəliliyini artıran PUA hibrid enerji təchizatı sistemi üçün enerjinin bölüşdürülməsini artırmaq üçün həyata keçirilə bilər. Qeyri-səlis idarəetmə alqoritmi batareya SOC, güc tələbi (PD) və fotovoltaiq güc (PV panelləri istifadə olunarsa) kimi girişlərdən istifadə edir; və sonra əvvəlcədən təyin edilmiş qaydalara riayət etməklə idarəetmə əmrləri (yəni yanacaq hüceyrəsi gücü PF C) yaradır. Bu qaydalar idarəetmə strategiyasını müəyyən edir və prioritetləri və məhdudiyyətləri müəyyən edir. Ümumiyyətlə, PV gücü PUA-nı təmin etmək üçün ən yüksək prioritetə malikdir, yanacaq elementinin gücü isə ən aşağıdır. Cədvəl 2.3-də batareya/yanacaq elementli idarəetmə sistemi üçün qeyri-səlis modelləşdirmədə istifadə olunan linqvistik qiymətlərməyə nümunə göstərilmişdir. Batareya SOC müvafiq olaraq aşağı (L), orta (M) və yüksək (H) kimi təsnif edilir. Güc tələbi PD beş qeyri-səlis vəziyyətə malikdir: orta (M), yüksək (H), çox yüksək (VH), aşağı (L) və çox aşağı (VL). Eynilə, qeyri-səlis çıxış PF C beş qeyri-səlis vəziyyətə malikdir: M, VH, H, L və VL.

Cədvəl 2.3. Batareya/yanacaq elementlərinin linqvistik qiymətləri (Mohamed Nadir Boukoberinea , Zhibin Zhou , Mohamed Benbouzid, 2019)

P_{FC}	P_D				
	VH	H	M	L	VL
L	VH	VH	H	M	L
SOC	M	VH	H	M	L
	H	H	M	L	VL

Elektrikli PUA-lar üçün Batareyanın Ömrünün Təxmin Edilməsi

Elektrikli PUA-larla (Pilotsuz Uçuş Aparatları) aviasiyada yeni bir dövrün başlanğıcının şahidi oluruq. Onlar getdikcə bütün dünyada hərbi, mülki və elmi missiyalarda istifadə edilir. Müəyyən bir boşalma profili üçün batareyanın istifadə edilə bilən yükünün miqdarı yalnız başlanğıc doldurulma vəziyyətindən (SOC) deyil, həm də batareyanın sağlamlığı və tətbiq olunan boşalma və ya yük profili kimi digər amillərdən asılıdır. Bunun səbəbi, akkumulyatorla işləyən mühərrik sistemlərinin

əksəriyyətində batareyanın bağlanması meyarlarının terminal gərginliyinə əsaslanmasıdır. Bu gərginlik batareyanın SOC ilə bağlıdır, lakin bu, yüksək qeyri-xətti əlaqədir və bu, batareya SOC boşalmağa yaxınlaşdıqca terminal gərginliyinin kəskin azalması ilə daha da çətinləşir. Bu problem batareya ilə işləyən elektrik PUA-larda daha qabarıq görünür, çünki uçuş/eniş və kruiz kimi müxtəlif uçuş rejimləri və küləyin sürəti kimi dəyişən ətraf mühit amilləri fərqli güc tələbləri qoyur və ölü çubuq vəziyyəti (batareyanın uçuş zamanı bağlanması) fəlakətli nəticələrə səbəb ola bilər. Bu yazıda, Litium-polimer (Li-Poly) hüceyrələri üçün ətraflı batareya boşaldılması modeli təqdim olunur və dörd 18,5V 6000mAh Li-Poly batareya paketi ilə təchiz edilmiş kiçik ölçülü akrobatik PUA olan Edge 540-ın yer sınaqları ilə yoxlanılır. Bu model daha sonra batareyaların qalan faydalı ömrünü (RUL) dəqiq proqnozlaşdırmaq üçün Hissəcik Filtrinə əsaslanan proqnostik çərçivədə istifadə edilmişdir. Hissəcik Filtrləri yalnız sistem ölçmələrindən əldə edilən məlumatlardan istifadə etməklə yanaşı, həm də sistemin davranışı üçün mövcud olan istənilən modelləri özündə birləşdirən Ardıcıl Monte Karlo metodlarının bir sinfidir. Bu texnika həm də vəziyyətin qiymətləndirilməsi ilə eyni vaxtda qeyri-stasionar model parametrlərini tənzimləmək qabiliyyətinə malikdir ki, bu da dövlət məkanının çoxsaylı çəkili hissəciklər kimi təsviri ilə birləşərək onu vəziyyətin izlənilməsi və proqnozlaşdırılması üçün ideal edir. Gələcək istifadənin stoxastik təxminlərini nəzərə alaraq, yaradılan RUL təxminləri sistemin təhlükəsizliyini təmin etmək üçün həyati əhəmiyyət kəsb edən ağıllı uçuş planının yenidən konfigurasiyasını asanlaşdırma bilər.

Batareya modelləşdirilməsi

Batareyanın daxili kimyəvi prosesləri üç əsas elektrokimyəvi prosesə bölünür:

Kütləvi köçürmə: Bu, Li-ionların elektrolitik mühit vasitəsilə katoda miqrasiya etdiyi diffuziya prosesinə aiddir. Bu ion diffuziya prosesinə daxili müqavimət başqa yerlərdə də IR düşməsi adlanır. Verilmiş yük cərəyanı üçün bu düşmə adətən ionların hərəkətliliyinin artması ilə nəticələnən daxili temperaturun artması səbəbindən zamanla azalır.

Öz-özünə boşalma: Öz-özünə boşalma xarici cərəyan olmasa belə, hüceyrədən keçən qalıq ion və elektron axınından qaynaqlanır. Nəticədə gərginlik düşməsi yaranır.

Reaktivin tükənməsi: Bu proses elektrodalarda reaktiv konsentrasiyasında fəza dəyişiklikləri səbəbindən gərginlik itkisini təmsil edir. Bu, əsasən reaktivlərin elektrokimyəvi reaksiya ilə məsələli elektroda yayıla bildiklərindən daha sürətli istehlak edildikdə, həmçinin toplu axının tərkibindəki dəyişikliklər səbəbindən baş verir. Li-ionların istehlakı hüceyrə boyunca olduğu kimi onların konsentrasiyasının azalmasına səbəb olur ki, bu da katod yaxınlığında yerli potensialın azalmasına səbəb olur. Bu gərginlik itkisinə həmçinin konsentrasiyanın qütbləşməsi deyilir.

Batareya problemləri

Pilotsuz Uçuş Aparatları (PUA) böyük üstünlüklərinə görə dünyanın bir çox ölkəsinin investisiya və inkişaf diqqətini getdikcə daha çox cəlb edir. Bununla belə, tədqiqatçılar üçün ən böyük problemlərdən biri PUA-ların daha uzun müddət işləməsini təmin etmək üçün onları enerji ilə təmin etmək problemidir. Xüsusilə fırlanan qanadlar vəziyyətində, yerin cazibə qüvvəsini aşmaq üçün işləmək üçün çox enerji sərf edən mühərriklər kimi digər PUA növlərindən daha çox enerji sərf edirlər.

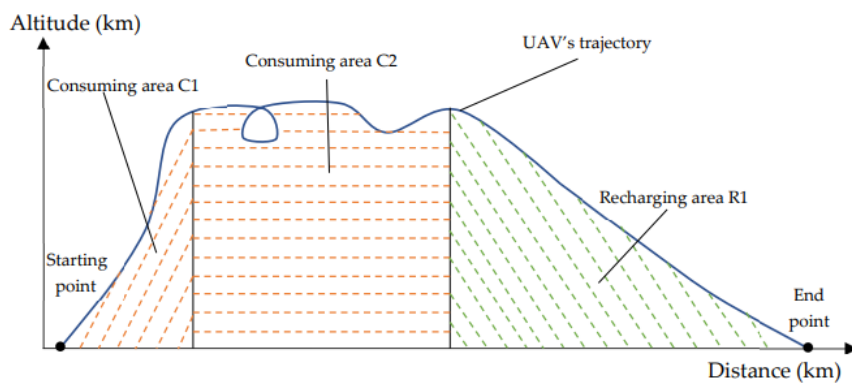
PUA-nın layihələndirilməsi və qurulması zamanı ən vacib vəzifələrdən biri sistemin mümkün qədər uzun müddət işləməsinə əmin olmaqdır ki, bu da PUA-nın dayanıqlığını artırmaq deməkdir. Bu problemi həll etmək üçün sürtünmə və aerodinamik sürüklənməni azaltmaq üçün optimal aerodinamik parametrlərə malik PUA formalarının layihələndirilməsi və ya PUA-nın sistem çəkisinin azaldılması kimi bir çox üsullardan istifadə olunur. PUA növləri arasında multirotor ən sürətli enerji istehlak edən maşınlardan biridir. Onların əksəriyyətinin batareya ömrü 60 " " dəqdən azdır (Norouzi Ghazbi S., Aghli Y., Alimohammadi M., Akbari A., 2016). Bu problemi həll etmək üçün iki seçim var: batareyanın tutumunu artırmaq və batareyanı doldurmaq. Bununla belə, batareya tutumunun artırılması vəziyyətində, mövcud batareya texnologiyası olduqca məhdud olduqda bu seçim bir neçə mənfi cəhətə malikdir. Daha dəqiq desək, akkumulyatorun tutumu artdıqca PUA-nın daşımali olduğu batareyanın kütləsi də artacaq. Batareyada olan enerji sıxlığını artırmaq üçün bir çox üsullar öyrənilmişdir, lakin hələ də çox irəliləyiş əldə edilməmişdir. PUA-nın işləmə müddətini artırmaq üçün akkumulyatorun xarici mənbələrdən yenidən enerjiyə çevrilməsi üsulu tədqiqat və inkişafa yönəldilib. Batareyanı doldurmağın iki yolu var:

simsiz və simli şarj. Mövcud simli doldurma texnikasının mürəkkəblik, qeyri-kafi hərəkətlilik və aşağı səmərəlilik kimi məhdudiyyətləri var. Eyni zamanda, simsiz doldurma texnikası kifayət qədər daha çox hərəkət azadlığı təmin etdikdə simli şarjın məhdudiyyətlərini həll etdi. PUA-lar daha uzun müddət və davamlı olaraq şarj üçün bazasına qayıtmağa ehtiyac duymadan işləyə bilər. Effektiv batareya doldurma texnikasını tapmaq üçün tədqiq edilmiş və inkişaf etdirilmiş bir çox simsiz doldurma üsulları mövcuddur. Bu üsulların öz üstünlükləri və mənfi cəhətləri var.

Bu metodlarla tanış olmaqdan öncə PUA ların bəsit səviyyədə strukturunu, işləmə prinsipləri və uçuş ssenariləriylə tanış olaq:

PUA-da ötürmə sistemi bortda enerji istehlak edən əsas hissədir. O, saxlanılan elektrik enerjisini motor-pervanə sistemi tərəfindən yaradılan mexaniki gücə çevirərək PUA-nın hərəkətinə imkan verir. O, PUA-nın çəkisinin yarısından çoxunu təşkil edə bilər.

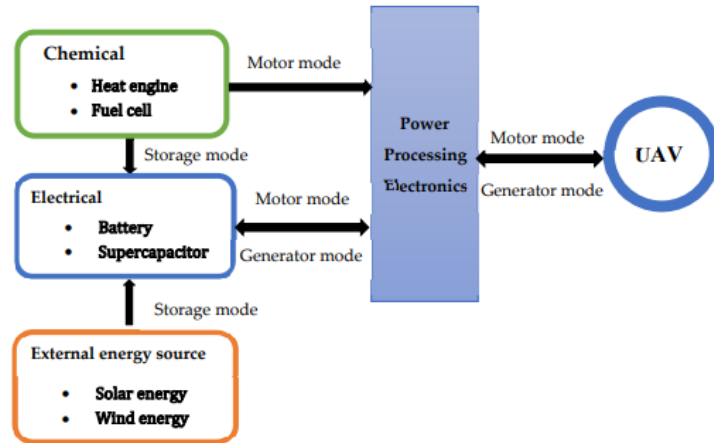
Başlanğıc nöqtəsindən son nöqtəyə uçuş zamanı PUA C1 və C2 bölgələrində çoxlu enerji sərf edir və R1 sahəsində külək enerjisini elektrik enerjisinə çevirərək enerjini geri saxlayır. PUA-nın maksimum səmərəlilik əmsalını yaratmaq məqsədinə nail olmaq üçün külək enerjisinin elektrik enerjisinə çevrilməsinin səmərəli əmsalını tapmaq lazımdır. PUA ətraf mühit faktorlarından və mühərriklərin dəyişən sürətindən təsirləndiyi üçün PUA-nın enerji sərfiyyatı modeli əslində qeyri-xətti modeldir.



Şəkil 2.7. Maksimum səmərəlilik əldə etmək üçün PUA uçuş ssenarisi (Khac Lam Pham, 2022)

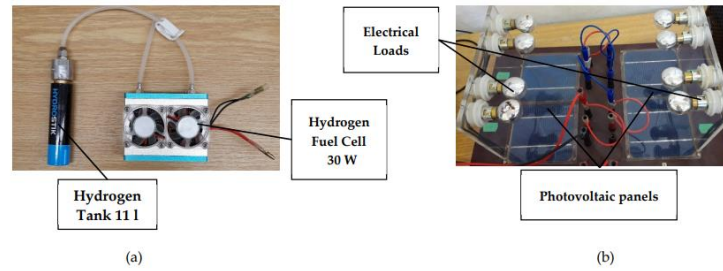
PUA-larda istifadə olunan enerji mənbələri

Enerji sistemi PUA-da mühüm rol oynayır və bütün əməliyyat sistemini enerji ilə təmin etdiyi üçün sistemin ürəyi kimi görülür. PUA əməliyyatları üçün enerji mənbələrinə əsasən istilik mühərriki, yanacaq elementi, superkondensator, batareya və xarici enerji mənbəyi (günəş, külək və s.) daxildir. Onlar iki kateqoriyaya bölünür: kimyəvi sistem və elektrik yananmaları (Şəkil 2.8-də göstərilmişdir).



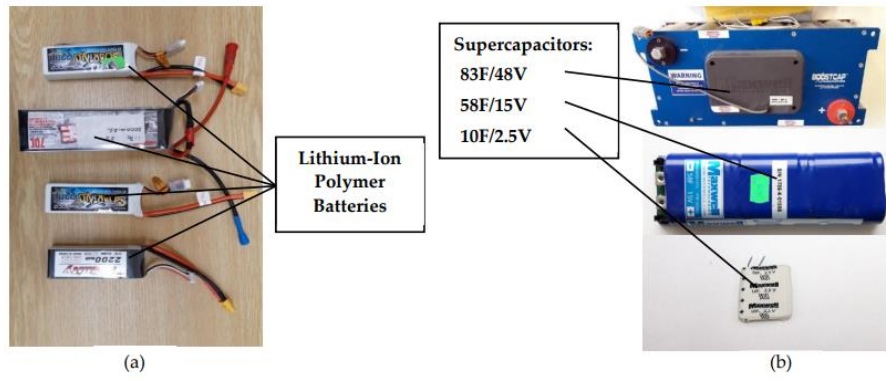
Şəkil 2.8. PUA-da enerji təchizatı (Khac Lam Pham, 2022)

İstilik mühərriki əsasən HALE və MALE kimi böyük PUA-larda istifadə olunur. O, istilik enerjisini PUA-nın fəaliyyətinin mənbəyi olan mexaniki enerjiyə çevirir. Bununla belə, mürəkkəb idarəetmə, yüksək istilik imzası, yüksək səs-küy, aşağı yanacaq qənaəti və köməkçi başlanğıc mühərrikə ehtiyac olduğu üçün istilik mühərriki kiçik PUA-larda istifadə üçün uyğun deyil. Yanacaq elementləri (bax Şəkil 2.9a) yanacağın kimyəvi enerjisini elektrik enerjisinə çevirmək üçün istifadə olunur. Hidrogen və oksigen ən çox PUA-larda yanacaq elementləri üçün işləyən maddələr kimi istifadə olunur. Enerji mənbəyi kimi yanacaq elementlərindən istifadə edən PUA adətən daha yüksək dayanıqlığa malikdir, çünki yanacaq hüceyrəsi LiPo batareyasından beş dəfə yüksək enerji sıxlığına malikdir (bax Şəkil 2.9). Hal-hazırda, qalq yanacaq ehtiyatlarının olmaması və istixana qazları emissiyaları ilə bağlı narahatlıqlar elm adamlarını tədricən kimyəvi enerji mənbələrinə olan marağını azaltmağa və digər yaşıl və təmiz enerji mənbələri axtarmağa vadar etdi.



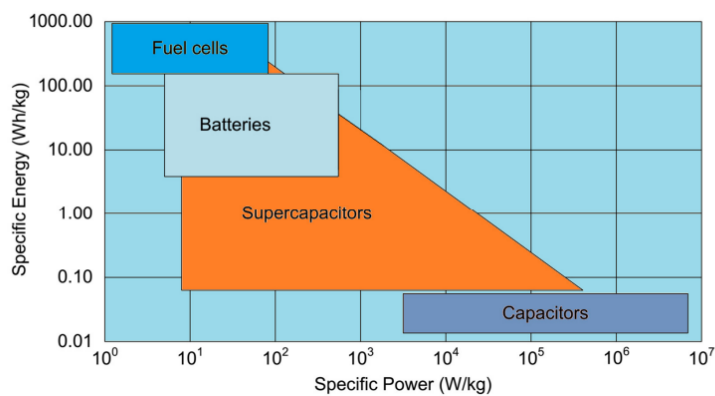
Şəkil 2.9. (a) yanacaq elementi; (b) günəş enerjisi (Khac Lam Pham, 2022)

Elektrik enerjisi etibarlılıq, çirkləndirici tullantıların olmaması, yüksək səmərəlilik, aşağı səs-küy, özünü işə salma xüsusiyyəti və yaxşı işlənmiş idarəetmə sistemi kimi bir çox üstünlüklərə malikdir. PUA-da istifadə olunan elektrik enerjisi mənbələri arasında batareya (Şəkil 2.10a) qənaətcilliyi, sadəliyi və çevikliyi səbəbindən sistemi gücləndirmək üçün ən çox istifadə edilən batareyadır. Bununla belə, batareyaların hələ də aşağı enerji sıxlığı və uzun müddət doldurulması kimi bəzi məhdudiyyətləri var. Bundan əlavə, PUA-nın manevri üçün sürətli enerji reaksiyası tələb olunan bəzi hallarda batareya yavaş güc dinamikası səbəbindən yaxşı seçim deyil. Batareyanın bu çatışmazlıqlarını kompensasiya etmək üçün superkondensatorlardan istifadə (bax Şəkil 2.10b) o zaman nəzərə alın bilər ki, o, daha yüksək gücə malikdir və batareya ilə müqayisədə daha sürətli enerji saxlama sistemi (daha sürətli doldurma/boşaltma dərəcəsi) ola bilər. Superkondensator həm də münasib qiymətə, geniş işləmə temperaturu diapazonuna və aşağı texniki xidmət xərclərinə malikdir və DC bus-da gərginliyin dəyişməsinə azaldır. Bununla belə, batareyalarla müqayisədə superkondensatorların xüsusi enerji tutumları daha aşağıdır (yalnız bir neçə Wh/kq). Superkondensatorlar arasında elektrik ikiqatlı kondensatorlar ən çox yayılmış növlərdir, onlar çox davamlıdır, sürətli doldurma və boşaltma qabiliyyətinə malikdir və milyonlarla dövrəyə malikdir.



Şəkil 2.10. Elektrik enerjisi saxlama sistemləri: (a) batareya; (b) superkondensatorlar (Khac Lam Pham, 2022)

Şəkil 2.11-dən görünür ki, yanacaq elementi digər enerji mənbələri ilə müqayisədə ən yüksək xüsusi enerjiyə malikdir, xüsusi güc isə ən aşağıdır. Hər bir enerji mənbəyinin öz üstünlükləri və mənfi cəhətləri var, buna görə də bir çox tədqiqatçılar hibrid enerji mənbələri yaratmaq üçün bu enerji mənbələrini öz üstünlükləri ilə birləşdirməyə çalışıblar. Məsələn, hibrid enerji mənbəyi batareyanın yüksək enerji sıxlığı, yüksək səmərəlilik, sürətli reaksiya və yanacağın yüksək enerji sıxlığının üstünlüklərindən istifadə edə bilən akkumulyator və yanacaq elementinin birləşməsi ola bilər. Bu halda, batareya qalxma və qalxma kimi pik gücün tələbi üçün enerji mənbəyi kimi istifadə olunur. Bundan əlavə, yanacaq elementi kruiz və enmə dövrlərində istifadə edilə bilər.



Şəkil 2.11. Enerji mənbələri arasında müqayisə (Khac Lam Pham, 2022)

Tədqiqatçıları maraqlandıran başqa bir yanaşma isə, yenidən doldurulmaq üçün yerə qayıtmağa ehtiyac qalmadan PUA-nın dayanıqlığını artırmaq üçün günəş enerjisi və külək enerjisi kimi xarici enerji mənbələrindən istifadə etməkdir. Bu, PUA-ların

tapşırıqlarını yerinə yetirməkdə daha səmərəli olmasına kömək edir. Günəş enerjisi ilə işləyən PUA-lar (xüsusilə də sabit qanadlı PUA-lar) qanadlarında quraşdırılmış fotovoltaiq panellərdən istifadə edərək günəş işığından alınan enerjini elektrik enerjisinə çevirir. Enerji mənbəyi kimi günəş enerjisindən istifadə edən bəzi PUA-ları qeyd etmək olar, məsələn, Qinetiq Inc. tərəfindən hazırlanmış NASA-nın Pathfinder, Helios və Airbus Zephyr. Günəş enerjisi ilə işləyən PUA-ların çatışmazlıqlarından biri onların yalnız gün ərzində səmərəli olmasıdır. Gecə və ya buludlu olduqda, fotovoltaiq panellərdən əldə edilən elektrik enerjisinin miqdarı yoxdur və ya əhəmiyyətsizdir. Külək enerjisi təbiətdəki təmiz və mövcud enerji mənbələrindən biridir. Külək enerjisinin həyatın müxtəlif sahələrində tətbiqi ilə bağlı çoxlu tədqiqat işləri aparılmışdır.

Hibrid enerji mənbələri

Performanslarına və texnoloji irəliləyişlərə baxmayaraq, yanacaq elementləri PUA-lar üçün unikal enerji mənbəyi kimi istifadə edildikdə bəzi məhdudiyyətlərə malikdir. Həqiqətən, bir yanacaq hüceyrəsi böyük bir zaman sabiti ilə xarakterizə olunur (saniyələr sırası ilə), çünki onu nasoslar, klapanlar və kompressorlardan istifadə edərək yanacaq və hava ilə təmin etmək lazımdır. Yavaş reaksiya əsasən nasosların mexaniki xüsusiyyətləri, axın gecikməsi, termodinamik xüsusiyyətlər və tutum effekti ilə bağlıdır (Ou K., Wang Y.-X., Li Z.-Z., Shen Y.-D., Xuan D.-J., 2015). Beləliklə, cari tələbatın yüksək dəyişkənliyi zamanı yanacağın tükənməsi problemi yarana bilər ki, bu da istifadə müddətinə, etibarlılığa və səmərəliliyə təsir edə bilər (Ou K., Yuan W.-W., Choi M., Yang S., Jung S., Kim Y.-B., 2018). Hibrid enerji təchizatı sistemi yaratmaq üçün yanacaq elementini batareya ilə birləşdirmək, PUA-nın hərəkət sisteminə hər iki mənbənin üstünlüklərindən faydalanmağa və çatışmazlıqlarını tarazlaşdırmağa imkan verən yaxşı bir seçim kimi görünür (Cooley J. J., Lindahl P., Zimmerman C. L., Cornachione M., Jordan G., Shaw S. R., Leeb S., 2014).

Tədqiqatçılardan Verstraete 200 Vt-lıq yanacaq elementi və batareya ilə təchiz edilmiş hibrid PUA-nın hərəkətverici sisteminin performansını dövrədə aparat (HIL) simulyasiyaları vasitəsilə araşdırdı.

HIL-ə əsaslanan real uçuş qeydə alınan məlumatlara əsasən, müxtəlif yük dəyişmə dərəcələri altında həyata keçirilmişdir (Gong A., Palmer J. L., Brian G., Harvey J. R., Verstraete D., 2014). Gong A., Verstraete D. öz tədqiqatlarını akkumulyatorun hibrid sistemə verdiyi töhfəyə yönəldiblər. Onların eksperimental təhqiqatı, uçuş missiyası mərhələlərində keçə biləcək bir neçə tələb altında batareyanın performansını izləyir.

Günəş batareyaları köməkçi enerji mənbəyi kimi

Fotovoltaik (PV) generasiya sisteminin PUA kimi hərəkət edən daşıyıcılarda tətbiqinə böyük diqqət yetirilir. Bu halda, qanadlarında PV massivləri ilə təchiz edilmiş PUA gecə və ya günəş olduğu halda enerjinin saxlanması üçün batareyanın quraşdırılması şərti ilə qeyri-müəyyən müddətə uça bilər (Shraim H., Awada A., Youness R., 2018). Günəş enerjisi ilə işləyən PUA adətən Şəkil 2.12-də göstərilədiyi kimi HALE proqramları üçün nəzərdə tutulub və geniş şəkildə istifadə olunur. HALE PUA-ları çox yüksək hündürlükdə davamlı missiyaları (1 gündən çox) yerinə yetirmək üçün nəzərdə tutulub. Morton S., D'Sa R., Papanikolopoulos N. hava gövdəsinin səmərəliliyini optimallaşdırmaq üçün günəş enerjisi ilə işləyən PUA dizayn metodu təklif edilmişdir (Morton S., D'Sa R., Papanikolopoulos N., 2015). Hazırlanmış prototip üzrə eksperimental sınaqlar göstərdi ki, alınan günəş enerjisinin miqdarı PUA-nın günəş sisteminin əlavə faydalı yükünü daşımaq üçün onun dözümlülüyünü artırmağa kifayət edirdi (Morton S., D'Sa R., Papanikolopoulos N., 2015).



Şəkil 2.12. Günəş enerjisi ilə işləyən PUA-lar (Mohamed Nadir Boukoberine, 2019)

PV-lərdən istifadə PUA-nın çəkisini azaltmaqla yanaşı yanacağa 59%-ə qədər qənaət etməyə imkan verə bilər. Günəş enerjisindən istifadə PUA-nın dayanıqlığının yaxşılaşdırılmasına müvafiq töhfədir. Şəkil 2.12-də göstərilədiyi kimi, günəş enerjisi ilə işləyən PUA-ların qəbul edilən işıq enerjisinin miqdarını maksimum dərəcədə artırmaq

üçün böyük qanadları olmalıdır. Bu kontekstdə maksimum güc nöqtəsi izləmə (MPPT) algoritmi tələb olunur (Peng L., Zheng S., Chai X., Li L., 2018). Bu kontekstdə MPPT aparat sistemi aşağı qiymətli mikrokontroller, cərəyan və gərginlik sensorları ilə əlaqəli sadə bir çevirici ehtiva edir.

Köməkçi enerji mənbəyi kimi superkondensator

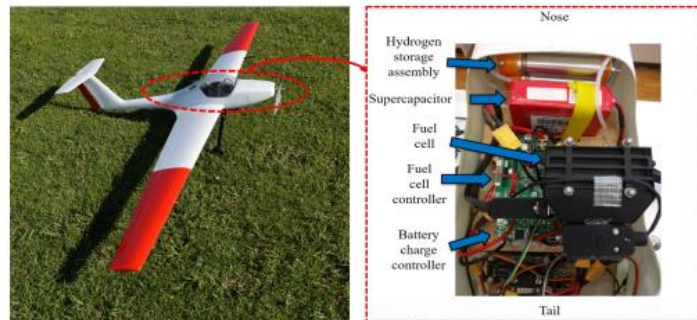
Superkondensatorlar son vaxtlar diqqəti cəlb edir, çünki məhdud istifadə müddəti ilə ləng doldurulma/boşalmadan əziyyət çəkən batareyaları əvəz etmək və ya tamamlamaq üçün bir sıra tətbiqlərdə daha sürətli enerji saxlama sistemlərinə ehtiyac duyulur (Aneke M., Wang M., 2016). Superkondensator batareya ilə müqayisədə daha yüksək güc və daha aşağı enerji sıxlığı ilə xarakterizə olunur. Bundan əlavə, o, həddən artıq yüklənməyə dözümlülük, aşağı texniki xidmət xərcləri və münasib qiymətə malik böyük temperatur diapazonunda işləyir (Ruan J., Walker P. D., Zhang N., Wu J., 2017). O, həmçinin DC bus-un gərginlik dəyişmələrini son dərəcə azalda bilər. Cədvəl 2.4-də batareyaların və superkondensatorların əsas xüsusiyyətlərinin müqayisəli təhlili verilmişdir.

Cədvəl 2.4. Batareyalar və superkondensator arasında müqayisə (Mohamed Nadir Boukoberine, 2019)

Type	Energy density (Wh/kg)	Power density (W/kg)	Cycle life (Times)	Efficiency (%)	Merits	Drawbacks
Lead-acid battery	30-40	200-300	300-400	75	Low cost, high discharging rate, and high recycling rate.	Poor performance at low temperature.
Ni-MH battery	60-80	800-1500	1000	75	High energy density, high charging and discharging speed, and long lifetime.	High self-discharging rate, need for a cooling system, and higher manufacturing cost.
Li-ion battery	100-120	600-2000	1000	90	High voltage, high energy density, lightweight, long cycle life, low self-discharging rate, no memory effect, and no pollution.	Lifetime decrease at high temperature, non-overcharge, non-over discharge, and high security requirement.
Supercapacitor	4-15	1000 - 10,000	100,000	85-98	Fast charging and discharging speed, pollution-free and extremely long life.	Low energy density.

Bu kontekstdə, PUA-nın hibrid enerji təchizatında əlavə güc kimi superkondensatorun inteqrasiyası enerji sıxlığını gücləndirməklə və sürətli enerji reaksiyasına imkan verməklə yanaşı, arxitekturaların təchizatı baxımından əlavə sərbəstlik dərəcəsi təklif edəcək (Şəkil 2.13). Hibrid enerji təchizatı arxitekturasında yanacaq elementi adətən əsas enerji mənbəyidir, digərləri isə köməkçidir. Buna görə

də yanacaq elementi PUA-nın dayanıqlı vəziyyətini gücləndirmək üçün seçiləcək və beləliklə də onun xidmət müddəti uzanacaq (Li H., Ravey A., N'Diaye A., Djerdir A., 2018).



Şəkil 2.13. PUA-da hibrid yanacaq hüceyrəsi-batareya-superkapasitor enerji təchizatı (Mohamed Nadir Boukoberine, 2019)

2.2. PUA batareyasının enerji təminatının neyron şəbəkələri və LSTM əsasında proqnozlaşdırılması metodlarının tədqiqi

Ümumiyyətlə, batareyanın vəziyyətini ölçən müxtəlif göstəricilər var ki, onlardan ən geniş yayılanı batareyada qalan yükün miqdarını ölçən State-of-Charge (SOC)-dir. Lakin onun qiymətləndirilməsi asan məsələ deyil. Hər halda, batareyaların monitorinqi üçün proqnozlaşdırıcı alqoritmlərin son məqsədi Boşalmanın Sonuna (EOD) və Ömrünün Sonuna (EOL) qədər olan vaxtı təxmin etməkdir. Komponentin EOD və ya EOL-unu tapmaq məqsədi daşıyan belə bir qiymətləndirmə adətən Qalan Faydalı Ömrün (RUL) qiymətləndirilməsi kimi istinad edilir. Əslində, faktiki EOD əvəzinə, batareyanın təhlükəsiz işləməsini təmin edən RUL-un qiymətləndirilməsi üçün uğursuzluqdan dərhal əvvəl bir hədd (bizim vəziyyətimizdə boşalma) istifadə olunur.

RUL proqnozlaşdırması üçün Machine Learning (ML) və dərin təlim üsullarından istifadə effektiv hesab olunur. Əsasən yüksək enerji sıxlığı, yüksək səmərəlilik, materialın yavaş parçalanması, yaddaş effektinin olmaması, aşağı özünü boşaltma və minimum texniki xidmət tələbləri kimi bəzi arzu olunan xüsusiyyətlərə görə geniş tətbiq olunan Li-ion batareyalarının nəzərdən keçirəcəyik. Bizim

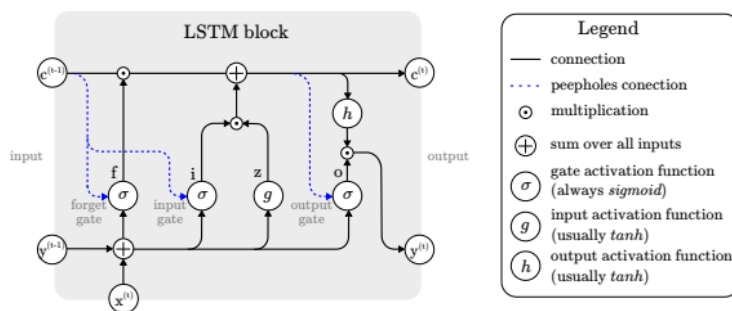
gəldiyimiz əsas nəticə aşağıdakılardır: Birincisi, qurulmuş sxemin məqsədi uçuş missiyası zamanı batareyanın RUL-unu qiymətləndirməkdir. Ədəbiyyatlardada rast gəlinən SOC-nin proqnozlaşdırılmasına yönəlmiş əksər tədqiqatlardan fərqli olaraq, bizim vəziyyətimizdə RUL proqnozu batareyanın tutumunun və yüklənmə dövrünün ölçülməsinə əsaslanır. Batareyanın yaşam müddətinin proqnozlaşdırılması modelləri LSTM və dərin neyron şəbəkələri əsasında işlənmişdir.

Uzun-qısa müddətli neyron şəbəkə (Long short-term memory, LSTM)

LSTM modeli minimum vaxt gecikmələri çox böyük olsa belə, adətən uzunmüddətli asılılıqların öyrənilməsində baş verən artan / yoxa çıxan qradiyent problemlərini aradan qaldırmaq üçün xüsusi olaraq hazırlanmış güclü təkrarlanan sinir sistemidir. Ümumiyyətlə, cihazın hər hüceyrəsində səhv siqnalını dəstəkləyən Daimi səhv karuseli (CEC) ilə bunun qarşısını almaq olar. Əslində, bu cür hüceyrələrin özləri, CEC-in əlavə xüsusiyyətlər, yəni yaddaş hüceyrəsini təşkil edən giriş və çıxış qapıları ilə genişləndiyi maraqlı bir arxitekturaya sahib təkrarlanan şəbəkələrdir. Özünü təkrarlayan əlaqələr bir addım gecikmə ilə geribildirim göstərir.

Standart LSTM modulu bir hüceyrə, giriş elementi, çıxış elementi və unutma elementindən ibarətdir.

Qısaca desək, LSTM arxitekturası yaddaş blokları kimi tanınan təkrarlanan birləşən alt şəbəkələr dəstindən ibarətdir. Yaddaş blokunun arxasında duran fikir zamanla öz vəziyyətini saxlamaq və məlumat axınının qeyri-xətti keçid vahidlərini tənzimləməkdir. Şəkil 2.14-də qapıları, giriş siqnalını $x(t)$, çıxışı $y(t)$, aktivləşdirmə funksiyalarını və göz çuxurunu birləşdirən vanil LSTM blokunun arxitekturası göstərilir. Blokun çıxışı təkrar blok girişinə və bütün qapılara birləşdirilir.



Şəkil 2.14. Tipik vanil LSTM blokunun arxitekturası (Greg Van Houdt, 2020)

LSTM modelinin necə işlədiyini aydınlaşdırmaq məqsədi ilə N emal blokundan və M girişindən ibarət şəbəkəni fərz edək. Bu təkrarlanan sinir sistemində irəli keçid aşağıda təsvir edilmişdir.

Block input. Bu addım, cari $x^{(t)}$ girişlərini və bu LSTM $y^{(t-1)}$ modulunun çıxışını son iterasiyada birləşdirən blok giriş komponentini yeniləməyə yönəlmişdir. Bu aşağıda göstərildiyi kimi edilə bilər:

$$z^{(t)} = g(W_z x^{(t)} + R_z y^{(t-1)} + b_z) \quad (1)$$

burada W_z və R_z müvafiq olaraq $x^{(t)}$ və $y^{(t-1)}$ ilə əlaqəli çəkilərdir, b_z isə əyilmə çəki vektoru deməkdir.

Input gate. Bu addımda cari $x^{(t)}$ girişlərini, bu lstm $y^{(t-1)}$ modulunun çıxışını və son iterasiyada $C^{(t-1)}$ hüceyrə dəyərini birləşdirən giriş elementini yeniləyirik. Aşağıdakı düstur bu proseduru göstərir:

$$i^{(t)} = \sigma(W_i x^{(t)} + R_i y^{(t-1)} + p_i \odot c^{(t-1)} + b_i) \quad (2)$$

burada \odot iki vektorun axın vurmasını göstərir, W_i , R_i və p_i müvafiq olaraq $x^{(t)}$, $y^{(t-1)}$ və $c^{(t-1)}$ ilə əlaqəli çəkilərdir, b_i isə bu komponentlə əlaqəli yerdəyişmə vektorunu təmsil edir.

Əvvəlki mərhələlərdə LSTM səviyyəsi $c^{(t)}$ şəbəkə hüceyrələrinin vəziyyətində hansı məlumatların saxlanılacağını müəyyənləşdirir. Buraya hüceyrə vəziyyətlərinə əlavə edilə bilən mümkün $z^{(t)}$ dəyərlərinin və giriş elementlərinin $i^{(t)}$ aktivasiya dəyərlərinin seçilməsi daxildir.

Forget gate. Bu nöqtədə, LSTM modulu $c^{(t-1)}$ hüceyrəsinin əvvəlki vəziyyətlərindən hansı məlumatların silinəcəyini müəyyənləşdirir. Buna görə t zaman addımındakı unutma elementlərinin $f^{(t)}$ aktivləşdirmə dəyərləri cari $x^{(t)}$ giriş siqnalı, $y^{(t-1)}$ çıxış siqnalları və əvvəlki zaman addımındakı yaddaş hüceyrələrinin $c^{(t-1)}$ vəziyyəti ($t - 1$), gözlə əlaqə və b_f unutma elementlərinin yerdəyişmə şərtləri əsasında hesablanır. Bu aşağıdakı kimi edilə bilər:

$$f^{(t)} = \sigma(W_f x^{(t)} + R_f y^{(t-1)} + p_f \odot c^{(t-1)} + b_f) \quad (3)$$

burada W_f , R_f və p_f müvafiq olaraq $x^{(t)}$, $y^{(t-1)}$ və $c^{(t-1)}$ ilə əlaqəli çəkilərdir, b_f isə yerdəyişmə çəkisi vektorunu göstərir.

Cell. Bu addım $z^{(t)}$ blokunun giriş məlumatlarını, $i^{(t)}$ giriş elementini və $f^{(t)}$ unutma elementini əvvəlki hüceyrə dəyəri ilə birləşdirən hüceyrə dəyərini hesablayır. Bu aşağıda göstərildiyi kimi edilə bilər:

$$c^{(t)} = z^{(t)} \odot i^{(t)} + c^{(t-1)} \odot f^{(t)} \quad (4)$$

Output gate. Bu addım cari $x^{(t)}$ girişlərini, bu LSTM $y^{(t-1)}$ modulunun çıxışını və son iterasiyada $c^{(t-1)}$ hüceyrə dəyərini birləşdirən çıxış elementini hesablayır. Bu aşağıda göstərildiyi kimi edilə bilər:

$$o^{(t)} = \sigma(W_o x^{(t)} + R_o y^{(t-1)} + p_o \odot c^{(t)} + b_o) \quad (5)$$

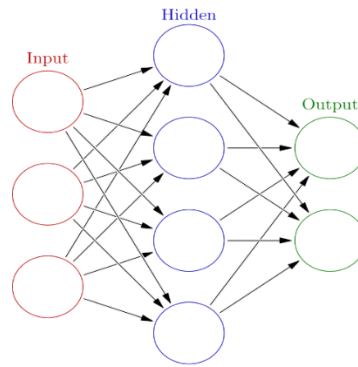
burada W_o , R_o və p_o müvafiq olaraq $x^{(t)}$, $y^{(t-1)}$ və $c^{(t-1)}$ ilə əlaqəli çəkilərdir, b_o isə yerdəyişmə çəkisi vektorunu ifadə edir.

Block output. Nəhayət, $c^{(t)}$ hüceyrəsinin cari dəyərini çıxış elementinin cari dəyəri ilə birləşdirən çıxış blokunu aşağıdakı kimi hesablayır:

$$y^{(t)} = g(c^{(t)}) \odot o^{(t)} \quad (6)$$

Yuxarıdakı addımlarda σ , g və h nöqtəli qeyri-xətti aktivləşdirmə funksiyalarını ifadə edir. Logistik sigmoid $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{1+x}}$ qapı aktivləşdirmə funksiyası kimi istifadə olunur, hiperbolik tangent $g(x) = h(x) = \tanh(x)$ isə tez-tez blok giriş və çıxış aktivləşdirmə funksiyası kimi istifadə olunur.

Neural network şəbəkələri - bioloji neyron şəbəkələrin təsirindən yaranan riyazi model. Hər bir neyronun bir neçə girişi və yalnız bir çıxışı olur. Bir neyronun çıxışını tapmaq üçün girişlərdən neyrona birləşmələrin ağırlıqları ilə ölçülən bütün girişlərin ağırlıqlı cəmini götürürük. Girişlərin bəzisi neyronu aktivləşdirir, başqaları isə buna mane olur (hər biri müəyyən qüvvə ilə). İdeya ondan ibarətdir ki, girişdə konkret bir növ şablon mövcud olduqda, çıxış neyronu aktivləşəcək. Kompüterdə neyronlar və onlar arasındakı birləşmələr ədədlər massivi şəklində təsvir olunur.



Şəkil 2.15. Rəngli neyron şəbəkə (Süni neyron şəbəkələr-vikipedia, 2023)

Neyron şəbəkələrinin müxtəlif sinifləri mövcuddur: çoxqatlı perseptronlar, radial, rekurrent və assosiativ şəbəkələr, özütəşkilatlanan və bulanıq neyron şəbəkələri və s.

Süni neyron şəbəkəsi simulyasiya edilmiş neyronlardan ibarətdir. Hər bir neyron, akson-sinaps-dendrit bioloji birləşməsinə bənzər bağlar vasitəsilə digər qovşaqlarla əlaqələndirilir. Bağlantılarla birləşdirilmiş bütün qovşaqlar bəzi məlumatları götürür və müəyyən əməliyyatlar və məlumat tapşırıqlarını yerinə yetirmək üçün istifadə edir. Hər bir əlaqənin bir düyünün digərinə təsir gücünü təyin edən bir çəkisi var.

Təşkilat - Neyronlar ümumiyyətlə bir neçə təbəqədə təşkil olunur. Bir təbəqənin neyronları yalnız əvvəlki və birbaşa sonrakı təbəqələrin neyronları ilə birləşir. Xarici məlumatları alan təbəqə giriş təbəqəsidir. Son nəticəni verən təbəqə çıxış təbəqəsidir. Aralarında sıfır və ya daha çox gizli təbəqə var. Alternativ olaraq, eyni və ya əvvəlki təbəqələrdə neyronlar arasında əlaqələrin qurulmasına imkan verən şəbəkələrə təkrarlanan şəbəkələr deyilir.

Hiperparametr - Hiperparametr, öyrənmə prosesinə başlamazdan əvvəl dəyəri təyin olunan daimi bir parametrdir. Parametrlərin dəyərləri təlim prosesində göstərilir. Hiperparametrlərə misal olaraq öyrənmə sürəti, gizli təbəqələrin sayı və paket ölçüsü daxildir.

Təlim - Öyrənmə, seçmə müşahidələri nəzərə alaraq tapşırığı daha səmərəli yerinə yetirmək üçün şəbəkə uyğunlaşmasıdır. Təlim, nəticənin dəqiqliyini artırmaq üçün şəbəkənin çəki əmsallarının (və istəyə bağlı eşiklərin) tənzimlənməsini əhatə edir. Bu, müşahidə olunan səhvləri minimuma endirməklə həyata keçirilir.

Öyrənmə sürəti - Öyrənmə sürəti, modelin hər müşahidədəki səhvləri düzəltmək üçün atdığı düzəldici addımların sayını təyin edir. Yüksək öyrənmə sürəti öyrənmə vaxtını azaldır, lakin daha az sonlu dəqiqliklə, aşağı öyrənmə sürəti isə daha uzun çəkir, lakin potensial olaraq daha çox dəqiqlik təmin edir.

Xərc funksiyası - Xərc funksiyası özbaşına müəyyən edilə bilsə də, seçim tez-tez funksiyanın arzu olunan xüsusiyyətləri (məsələn, qabarıqlıq) və ya modeldən qaynaqlandığı ilə müəyyən edilir (məsələn, ehtimal modelində modelin posteriori ehtimalı tərs dəyər kimi istifadə edilə bilər).

Tərs yayılma – Tərs yayılma, öyrənmə zamanı aşkar edilən hər bir səhvi kompensasiya etmək üçün birləşmələrin çəkisini tənzimləmək üçün istifadə olunan üsuldür. Səhvlərin sayı birləşmələr arasında effektiv şəkildə paylanır. Texniki olaraq, tərs yayılma, müəyyən bir vəziyyətlə əlaqəli dəyər funksiyasının qradiyentini (törəməsinə) tərəziyə nisbətən hesablayır.

Öyrənmə paradıqları - Maşın öyrənməsi ümumiyyətlə üç əsas öyrənmə paradıqlarına bölünür: nəzarətli öyrənmə, nəzarətsiz öyrənmə və möhkəmləndirmə təhsili.

Nəzarətli təlim- İstifadəçi rəhbərliyi altında təlim bir sıra cüt girişlərdən və istədiyiniz çıxışlardan istifadə edir. Təlimin məqsədi hər bir giriş signalı üçün istədiyiniz nəticəni əldə etməkdir.

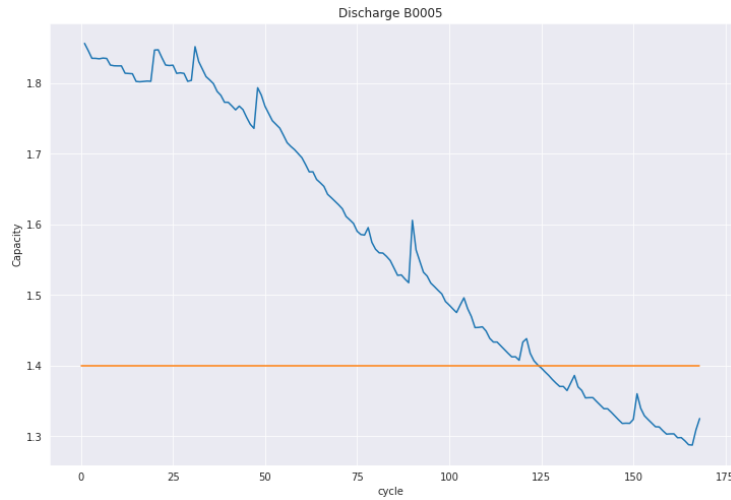
Nəzarətsiz təlim - Nəzarətsiz öyrənmə zamanı giriş dəyəri funksiyası, bəzi məlumat funksiyası x ilə birlikdə verilir və şəbəkə çıxışı. Xərclərin funksiyası vəzifədən (modelin mövzu sahəsi) və hər hansı bir priori fərziyyədən (modelin gizli xüsusiyyətləri, parametrləri və müşahidə olunan dəyişənlər) asılıdır. Əhəmiyyətsiz bir nümunə olaraq modeli nəzərdən keçirək $f(x)=a$ burada $a= \text{const}$ və $C= E[(x- f(x))^2]$

Süni neyronlar – Qeyri-xətti prosesləri çoxaltmaq və modelləşdirmək qabiliyyətinə görə süni sinir şəbəkələri bir çox sahələrdə tətbiq tapmışdır.

Eksperimentlər

RUL qiymətləndirilməsi üçün NASA təşkilatına məxsus verilənlər bazası istifadə edilmişdir.

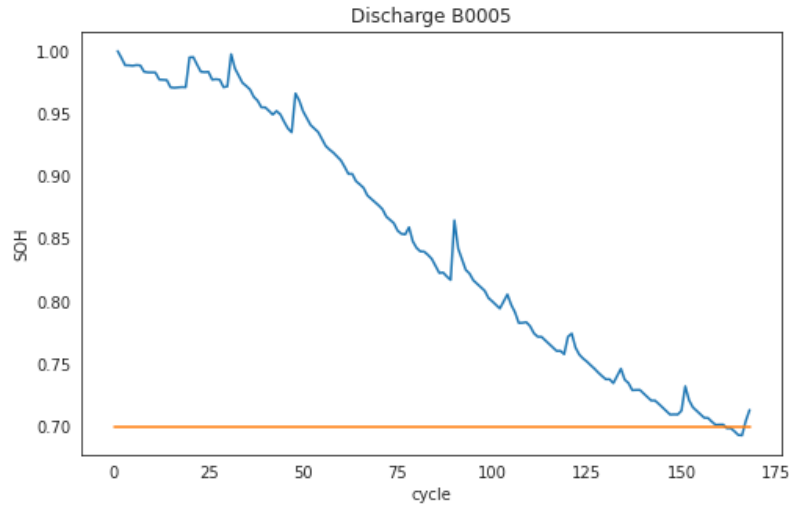
Verilənlər bazasından B0005.mat faylı modellərin öyrədilməsi, B0006.mat faylı test məqsədi ilə istifadə edilmişdir. Təqdim olunan verilənlər bazasının qrafik təsviri aşağıdakı şəkildə verilmişdir.



Şəkil 2.16. Yüklənmə dövrləri artıq halda batareyanın sıradan çıxma prosesi

Yuxarıdakı qrafik şarj dövrləri artıq halda batareyanın yaşlandığı prosesi göstərir. Qrafikdə Üfüqi xətt batareyanın ömrünün sonu hesab edilə bilən həddir.

Verilənlər bazasını təşkil edən əlamətlər aşağıdakılardır: cycle, ambient_temperature, datetime, capacity, voltage_measured, current_measured, temperature_measured, current_load, voltage_load, time, SoH (State of Health). Növbəti addımlarda tədqiq olunan dərin təlim modellərinin öyrədilməsini təmin etmək üçün yuxarıda sadalanan əlamətlər istifadə ediləcək. Verilənlər bazasının Cycle və SoH parametrlərinin bir-birindən asılılıq qrafiki aşağıdakı şəkildə göstərilmişdir.



Şəkil 2.17. Verilənlər bazasının Cycle və SoH parametrlərinin bir-birindən asılılıq qrafiki

Yuxarıdakı SoH parametrinin qrafiki hər bir şarj sayına (cycle) görə qurulmuşdur. Narıncı üfüqi xətt batareyanın həyat dövrünün 70%-nin sona çatdığı və ya artıq yararsız olduğu həddi göstərir və dəyişiklik etməyin məqsədəuyğun olduğunu göstərir.

Təqdim olunan verilənlər üzərində eksperimentlərin aparılması üçün üç gizli laydan ibarət neyron şəbəkə modelinin Python proqram paketində qurulmuş strukturu cədvəldə verilmişdir.

Cədvəl 2.5. Neyron şəbəkə modelinin parametrləri

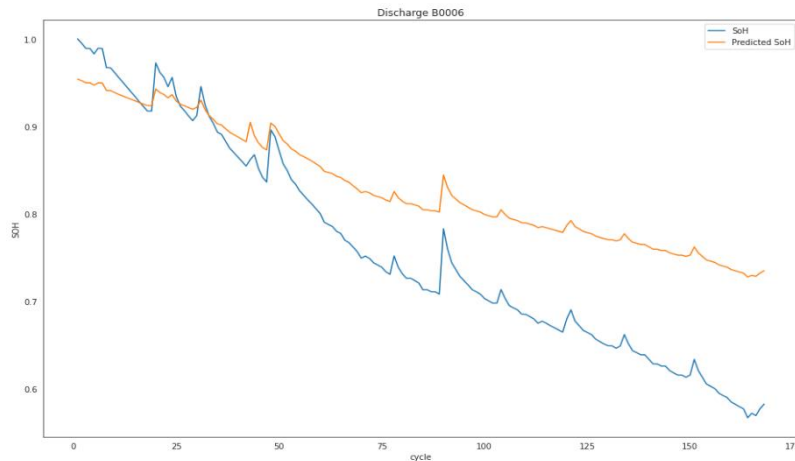
Layer (type)	Output Shape	Param #
dense (Dense)	(None, 8)	64
dense_1 (Dense)	(None, 8)	72
dense_2 (Dense)	(None, 8)	72
dropout (Dropout)	(None, 8)	0
dense_3 (Dense)	(None, 1)	9
Total params: 217		

Trainable params: 217

Non-trainable params: 0

Qurulmuş dərin neyron şəbəkə modelində üç gizli lay, hər bir gizli layda 8 neyron istifadə edilmişdir. Modelin sonuncu çıxış layında 1 neyron, optimallaşdırma funksiyası olaraq ADAM istifadə edilmişdir.

Həqiqi SoH qiymətləri ilə qurulmuş neyron şəbəkə əsasında proqnozlaşdırılan SoH qiymətləri arasında fərq vizual olaraq aşağıdakı şəkildə təsvir edilmişdir.



Şəkil 2.18. Neyron şəbəkənin proqnozlaşdırma nəticələri

Şəkildən görüldüyü kimi SoH əyrilərinin formasının və dəyişmə istiqamətin qismən oxşar olması proqnozlaşdırma modelinin doğru öyrənildiyini göstərir. Modelin öyrədilməsi zamanı Root Mean Square Error itki funksiyasının 0.0794 qiymətini alması modelin effektiv öyrədildiyini bir daha təsdiqləyir.

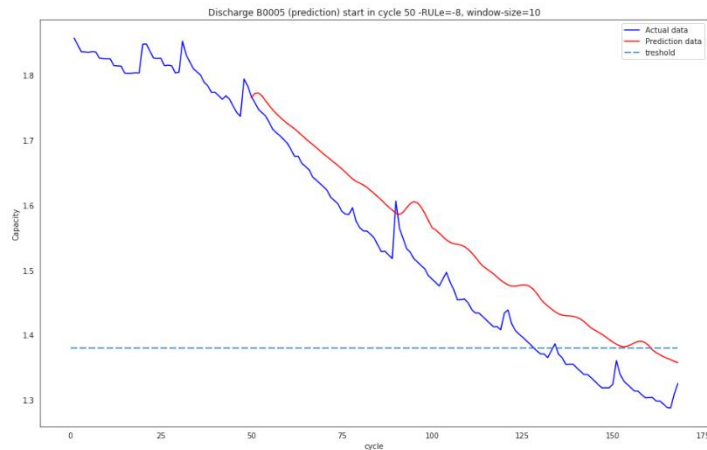
Batareyanın sərhad qiymətinə nə vaxt çatdığını, batareyanın sıradan çıxmasına qədər qalan şarjların sayını qiymətləndirmək üçün aşağıdakı kimi dərin LSTM modelini quraq.

Cədvəl 2.6. LSTM neyron şəbəkəsinin parametrləri

Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm (LSTM)	(None, 10, 200)	161600
dropout_1 (Dropout)	(None, 10, 200)	0
lstm_1 (LSTM)	(None, 10, 200)	320800
dropout_2 (Dropout)	(None, 10, 200)	0
lstm_2 (LSTM)	(None, 10, 200)	320800

dropout_3 (Dropout)	(None, 10, 200)	0
lstm_3 (LSTM)	(None, 200)	320800
dropout_4 (Dropout)	(None, 200)	0
dense_4 (Dense)	(None, 1)	201
=====		
Total params: 1,124,201		
Trainable params: 1,124,201		
Non-trainable params: 0		

Qurulmuş LSTM modelinin verilənlər üzərində öyrədilməsi zamanı RMSE itki funksiyasının qiyməti 0.073, r2_score qiyməti isə 0.7551 olmuşdur. Bu kifayət qədər yaxşı nəticə hesab edilə bilər. LSTM modelinin proqnozlaşdırma nəticələri aşağıdakı şəkildə təsvir edilmişdir.



Şəkil 2.19. LSTM modelinin proqnozlaşdırma nəticələri

Şəkildən görüldüyü kimi LSTM modelinin proqnozlaşdırdığı əyri (qırmızı) verilənlər bazasındakı həqiqi qiymətləri əks etdirən əyri ilə demək olar ki üst-üstə düşür. Deməli modelin proqnozlaşdırma nəticələri qənaətbəxşdir. Əyriyə sərhəd xəttinin kəsişməsindən aşağı hissə batareyanın yararsız olduğunu göstərir.

FƏSİL 3. PİLOTSUZ UÇUŞ APARATLARININ ETİBARLILIĞININ VƏ ENERJİ TƏMİNATININ İDARƏETMƏ MODELİNİN İŞLƏNMƏSİ

3.1. PUA proqram təminatında xətlərin aşkarlanması üçün klassifikatorlar ansamblı modelinin tədqiqi

Bu bölmədə proqram məhsullarında xətlərin aşkarlanma dəqiqliyini artırmaq üçün klassifikatorlar ansamblına əsaslanan yanaşma təklif edilir. Xəta verilənləri - proqram məhsullarının qiymətləndirilməsi üçün yaradılmış verilənlər bazalarında (məsələn, KC2) *xətali* və *xətasız* kimi iki sinifdə təsvir edilmişdir.

Təklif edilmiş metodun eksperimental yoxlanması KC2 verilənlər bazasının üzərində aparılmışdır.

Xətlərin aşkarlanması üçün əlamətlər vektoru

Proqram məhsullarında xətləri aşkarlamaq üçün aşağıdakı əlamətlər və uyğun sərhəd qiymətləri istifadə edilir (Hea P., Lic B., Liua X., Chenb J., Mab Y., 2015):

- Kodun uzunluğu (lines of code – LoC). Kodun sətirlərinin ümumi sayı nəzərdə tutulur;
- Dövri mürəkkəblilik (cyclomatic complexity – CC). Proqramın struktur cəhətdən mürəkkəbliyinin ölçülməsi meyarıdır. Proqramın axın qrafındakı (flow graph) asılı olmayan yolların ümumi sayı ilə ölçülür;
- Əsas mürəkkəblilik (essential complexity – EsC). Proqramda “if-then-else” şərt və “while” dövr prosesinin yaxşı strukturlaşdırılmasını tələb edir. Proqramda “goto” operatorundan istifadə edilməsi EsC qiymətini artıran amildir;
- Unikal operator (unique operator – UOpr). Proqramda unikal operatorların ümumi sayıdır. Əgər eyni bir operator bir neçə dəfə istifadə edilibsə, bu operator bir dəfə nəzərə alınır;
- Unikal operand (unique operand – UOpnd). Unikal operandların ümumi sayıdır. Əgər eyni bir operand bir neçə dəfə istifadə edilibsə, bu operand bir dəfə nəzərə alınır;

- Ümumi operator (total operator – TOpr). Modulda rast gəlinən operatorların ümumi sayı. Operatorlara misal olaraq məntiqi operatorları, riyazi əməliyyatları və hər bir açar sözü (return, sizeof və s.) göstərmək olar;
- Ümumi operand (total operand – TOpnd). Modulda rast gəlinən operandların ümumi sayı nəzərdə tutulur.

İntegrasiya olunmuş Proqram Metrikaları Korporasiyası (Integrated Software Metrics, Inc.) xətalara aşkarlamaq üçün metrikalara sərhəd qiymətləri müəyyən etmişdir (cədvəl 3.1).

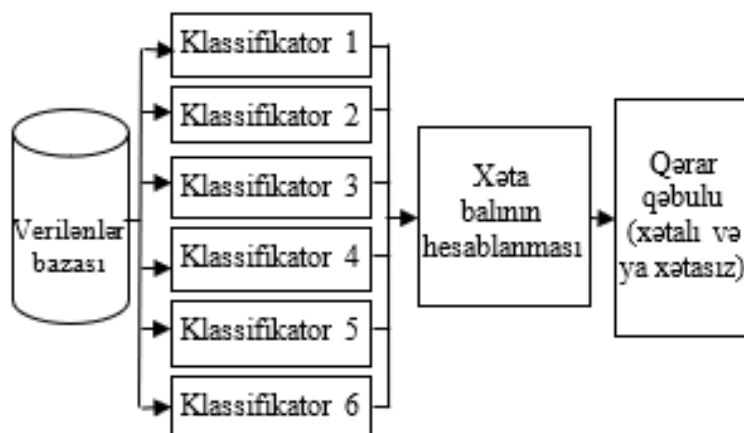
Cədvəl 3.1. Metrikalar və sərhəd qiymətləri
(Fərqanə Abdullayeva, 2017)

Metrika	Qısaltma	Sərhəd qiyməti
Kodun uzunluğu	LoC	65
Dövri mürəkkəblilik	CC	10
Əsas mürəkkəblilik	EsC	4
Unikal operator	UOpr	40
Unikal operand	UOpnd	25
Ümumi operator	TOpr	125
Ümumi operand	TOpnd	70

Xətalara aşkarlanması üçün cədvəl 3.1-də verilən sərhəd qiymətləri istifadə edilir.

Xətalara aşkarlanması metodu

Proqram məhsullarında xətalara aşkarlanması üçün təklif edilmiş yanaşmanın qərar qəbulu sisteminin arxitekturu şəkil 3.1-də təsvir edilmişdir.



Şəkil 3.1. Proqram məhsullarında xətalara aşkarlanması modeli (Fərqanə Abdullayeva, 2017)

Şəkil 3.1-dən görüldüyü kimi qərar qəbulu sistemi altı klassifikatordan ibarətdir. Burada bu klassifikatorların hər birinin fərdi qərarı kollaborativ qərar vermək üçün birləşdirilir.

Bu klassifikatorları birləşdirməkdə məqsəd sistemin proqram məhsullarında yol verilmiş xətalara aşkarlama keyfiyyətini yüksəltməkdir. Bu prosesi həyata keçirmək üçün hər bir klassifikator təsnif edilmiş verilənlər vasitəsi ilə öyrədilir.

Fərz edək ki, $C = \{c_i | 1 \leq i \leq n\}$ öyrədilən klassifikatorlardır və $D = \{d_i | 1 \leq i \leq n\}$ sayda qərar qəbulu modeli qurur. Hər bir i -ci qərarqəbuletmə d_i modeli test edilən x_i elementinə binar qiymət (0 və ya 1) verir, $d_i(x_i):v_i$. v_i –nin binar qiyməti 1 olduqda x_i elementi xətalı kimi qiymətləndirilir, əks halda xətasız kimi qiymətləndirilir. Belə olduqda xəta balı aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_j(x_i)}{n} \quad (3.1)$$

burada n xəta balının hesablanmasında iştirak edən qərar qəbuletmə modellərinin sayıdır. Verilənlər bazasının elementlərinin sinifi, xətalı və ya xətasız, aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$Class(x_i) = \begin{cases} x_i \geq \rho & qüsurlu = 1 \\ \text{əks halda} & qüsursuz = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

burada ρ – qərar qəbuletmə modellərinin test edilən x_i elementini xətasız kimi qiymətləndirmək üçün verdikləri balın faiz qiymətidir. Məsələn, əgər ρ sərhəd qiyməti 1 götürüldükdə, və əgər iştirak edən qərar qəbuletmə modellərinin hamısı eyniliklə elementin xətalı olduğunu qəbul etməsə, test edilən element xətalı kimi qəbul olunmayacaqdır.

Təklif olunan metodun eksperimental tədqiqi

Eksperimentlərin aparılması üçün NASA KC2 verilənlər bazasından istifadə edilmişdir.

Proqram məhsullarında qüsürlü elementlərin aşkarlanması üçün BFTree (Best First Tree), PART, IBk, NNg, IsolationForest, RandomForest alqoritmləri istifadə edilmişdir.

Təklif edilmiş yanaşmanın effektivliyini qiymətləndirmək üçün doğru müsbət aşkarlama əmsalı (true positive rate – TP), yanlış müsbət aşkarlama əmsalı (false positive rate – FP), F-ölçü (F-measure), doğruluq (acuracy), dəqiqlik (precision), tamlıq (recall) parametrləri istifadə edilmişdir. Klassifikasiya prosesində istifadə edilən xətarlar matrisi (confusion matrix) cədvəl 3.2-də təsvir edilmişdir.

Cədvəl 3.2. Xətarlar matrisi
(Fərqanə Abdullayeva, 2017)

	Real təsnif olunmuş verilənlər	
	<i>Hə</i>	<i>Yox</i>
Proqnoz edilən təsnif olunmuş verilənlər	TP	FP
	FN	TN

Təklif edilmiş modelin effektivlik parametrləri aşağıdakı kimi hesablanır: Dəqiqlik (precision). Çeşidlənmiş davranış sırasında doğru aşkarlanmış normal davranışın faiz dərəcəsi:

$$Precision = TP / (TP + FP) \quad (3.3)$$

Tamlıq (recall). Bütün normal davranışlar sırasında aşkarlanmış normal davranışın faiz dərəcəsi:

$$Recall = TP / (TP + FN) \quad (3.4)$$

Yalnız müsbət hallar (false positive rate – FPR):

$$FPR = FP / (FP + TN) \quad (3.5)$$

F-ölçü (F-measure):

$$F\text{-measure} = 2 * ((precision * recall) / (precision + recall)) \quad (3.6)$$

Doğru müsbət hallar (True Positives – TP):

$$TPR = TP / positive \quad (3.7)$$

Doğru mənfi hallar (True Negatives – TN):

$$TNR = TN / negative \quad (3.8)$$

Yalnish mənfi hallar (False Negatives – FN):

$$FNR = FN / (FN + TP) \quad (3.9)$$

Yalnish aşkarlanma əmsalı (False discovery rate – FDR):

$$FDR = FP / (FP + TP) \quad (3.10)$$

Doğruluq (accuracy):

$$Accuracy = (TP + TN) / (P + N) \quad (3.11)$$

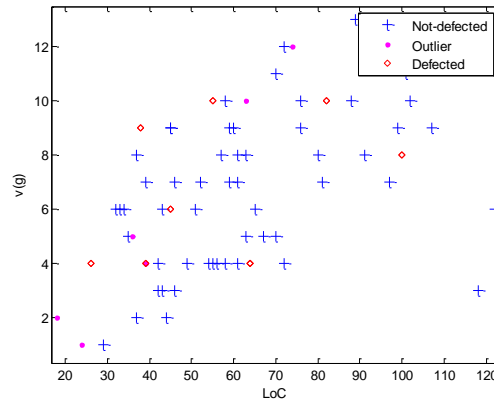
KC2 verilənlər bazası üzərində aparılmış eksperimentlərin nəticəsi cədvəl 3.3-də təsvir edilmişdir. Burada müxtəlif metodların KC2 verilənlər bazası üzərində test nəticələri daxil edilmişdir.

Cədvəl 3.3. Yanaşmanın KC2 verilənlər bazası üzərində mövcud metodlarla müqayisəsi (Fərqanə Abdullayeva, 2017)

Metrikalar	BFTree	J48	MultilayerPerseptron	Klassifikatorlar ansamblı
TP	0.816	0.803	0.711	0.882
FP	0.243	0.243	0.206	0.150
F-measure	0.756	0.748	0.711	0.843
False discovery rate	0.1842	0.197	0.289	0.1184
Accuracy	0.7814	0.7760	0.7596	0.8634
Precision	0.705	0.701	0.711	0.8816
Recall	0.816	0.803	0.711	0.882

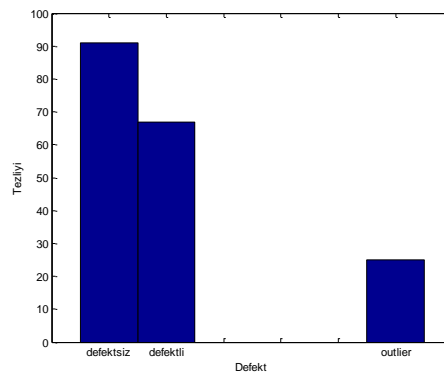
Cədvəl 3.3-dən görüldüyü kimi ayrı-ayrı klassifikatorların nöqsanları aşkarlama dəqiqliyi bütün göstəricilər üzrə klassifikatorlar ansamblının aşkarlama dəqiqliyindən olduqca aşağıdır. Belə ki, TP göstəricisi BFTree, J48, MultilayerPerseptron alqoritmləri üçün uyğun olaraq 0.816, 0.803, 0.711 təşkil etdiyi halda klassifikatorlar ansamblı üçün bu qiymət 0.882 % təkil etmişdir. Bundan əlavə təklif edilmiş metodun yalnish aşkarlama dəqiqliyi də məqsədəuyğun alınmışdır. Belə ki, klassifikatorlar ansamblında FP-nin qiyməti 0.150%, digər alqoritmlərdə isə bu qiymət olduqca böyük alınmışdır. Bundan əlavə metodun aşkarlama dəqiqliyində də yaxşı nəticə alınmışdır. Belə ki, bu göstərici üzrə BFTree 0.705%, J48 0.701%, MultilayerPerseptron 0.711, klassifikatorlar ansamblı 0.8816 faiz təşkil etmişdir.

Şəkil 3.2-də klassifikatorlar ansamblının KC 2 verilənlər bazasının LoC və V(g) parametrlərinə nəzərən nəticəsi vizual olaraq təsvir olunmuşdur. Şəkildə təsvir olunmuş göy rəngli “+” işarəsi xətasız (not-defected), qırmızı rəngli romb işarəsi xətalı (defected), çəhrayı rəngli nöqtələr kənarçıxmaları göstərir.



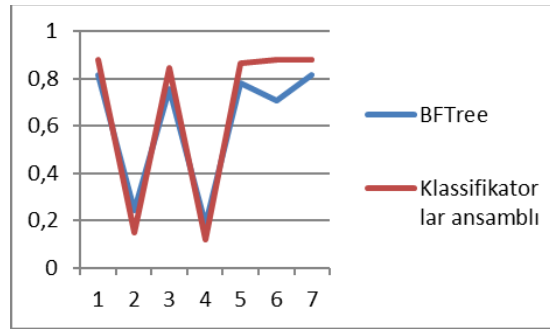
Şəkil 3.2. Klassifikatorlar ansamblının KC 2 verilənlər bazası üzərində klassifikasiya nəticələri (Fərqanə Abdullayeva, 2017)

Şəkil 3.3-də nöqsanların aşkarlanması prosesinin vizual təsviri verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi təklif edilmiş metodda aşkarlama zamanı çox az sayda kənarçıxma alınmışdır. Bu səbəbdən təklif edilmiş metodun aşkarlama dəqiqliyi digər metodlarla müqayisədə daha yüksək alınmışdır.



Şəkil 3.3. Xətaların aşkarlanması prosesinin diaqramı (Fərqanə Abdullayeva, 2017)

Şəkil 3.4-də klassifikatorlar ansamblının BFTree alqoritmi ilə effektivliyinin müqayisəsi təsvir edilmişdir. Buradan aydın şəkildə görünür ki, klassifikatorlar ansablı BFTree alqoritminə nəzərən yüksək effektivliyə malikdir.



Şəkil 3.4. Alqoritmlərin effektivliyinin müqayisəsi (Fərqanə Abdullayeva, 2017)

Proqram məhsullarında defektlərin aşkarlanması sahəsində eksperimentlərin aparılması üçün CM1, PC1-1107, JM1-10876, KC1-2107 verilənlər bazaları da istifadə oluna bilər.

3.2. PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarəetmə modelinin tədqiqi

Bu təcrübə, layihələndirilmiş hibrid güc sistemində qeyri-səlis enerji idarəetmə prosesinin əsaslarını izah edir. Proses tələb gücü (power demand) PD və şarj vəziyyəti (state of charge) SOC kimi giriş dəyişənlərə əsaslanır. Çıxış dəyişəni olaraq isə yanacaq hüceyrəsinin gücü (fuel cell power) istifadə olunur. Bu proses, qeyri-səlis məntiqi idarəetmə prinsiplərinə əsaslanır və real tətbiq strategiyaları ilə təsdiqlənmişdir.

Qeyri-səlisləşdirmə üçün SOC üç kateqoriyaya bölünür: aşağı (L), orta (M) və yüksək (H) vəziyyətlər. PD dəyərləri də beş dərəcəyə bölünür: çox yüksək (VH), yüksək (H), orta (M), aşağı (L) və çox aşağı (VL). Qeyri-səlis çıxış gücü də beş dərəcəyə bölünür: VH, H, M, L və VL. Qeyri-səlis məntiqi idarəetmə üçün parametrlərin aldığı linqvistik qiymətlər Cədvəl 3.4-də verilmişdir.

Cədvəl 3.4. Parametrlərin linqvistik qiymətləri

(Mohamed Nadir Boukoberine, 2019)

P_{fc}		P_D				
		VH	H	M	L	VL
SOC	L	VH	VH	H	M	L
	M	VH	H	M	L	L
	H	H	M	L	VL	VL

Burada, P_D = proses tələb gücü (power demand), SOC= şarj vəziyyətidir (state of charge).

Təcrübə üçün MATLAB proqramından istifadə edilmişdir.

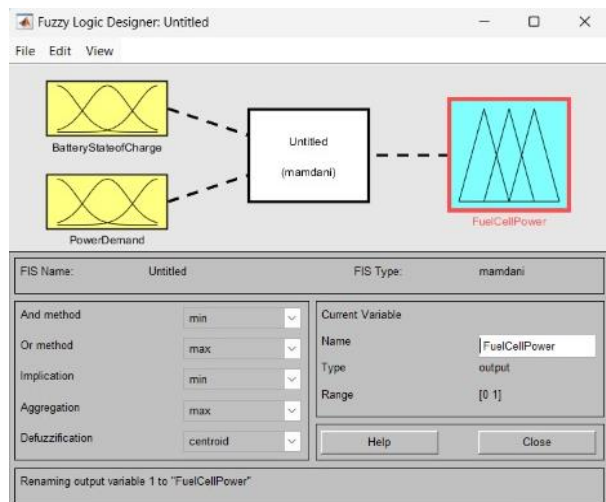
PUA batareyasının yüklülük dərəcəsi aşağıdakı parametrlərə əsasən qiymətləndirilir:

SOC(state of change): low (L), middle (M), high (H);

Demand power (P_D): very high (VH), high (H), middle (M), low (L), very low (VL);

Desired fuel cell power (P_F): VH (100%), H (80%), M (50%), L (30%), VL (5%).

Yuxarıdakı parametrlərə əsasən PUA enerji təminatının Matlab mühitində idarəetmə modelini aşağıdakı kimi qurmaq olar (Şəkil 3.5).

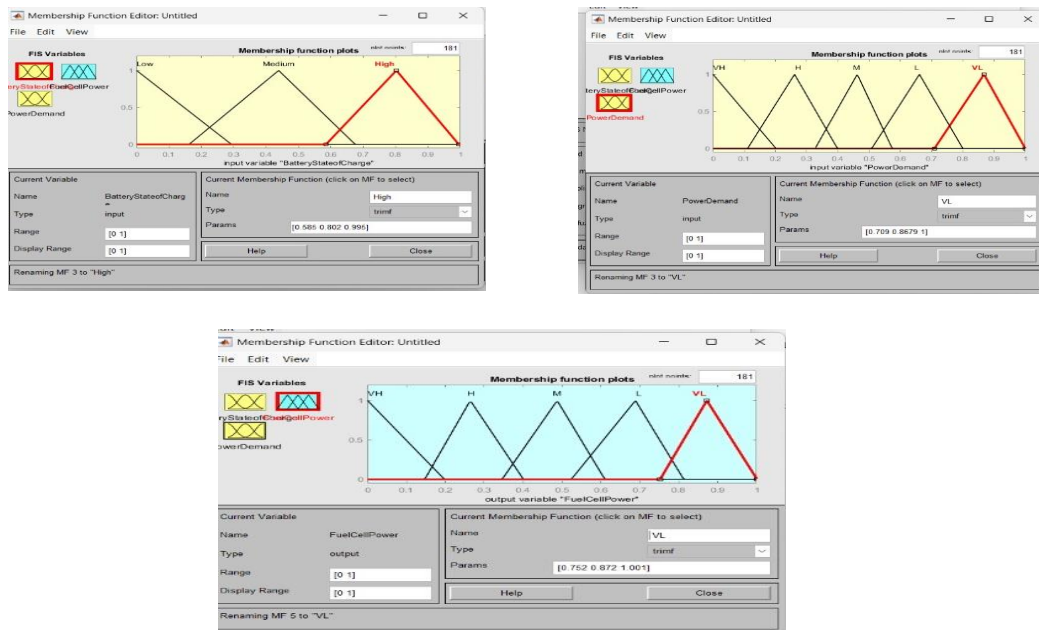


Şəkil 3.5. PUA enerji təminatının idarəetmə modeli

(Məmmədli Kamil, 2024)

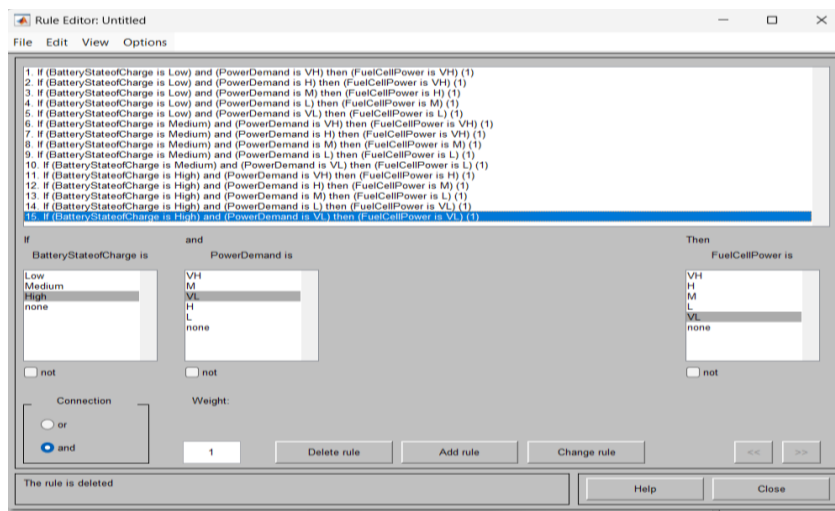
Burada iki giriş parametri və bir çıxış parametri vardır. Tələb olunan enerji (power demand) PD və batareyanın yüklülük vəziyyəti (state of charge) SOC modelin giriş parametrləri, yanacaq hüceyrəli enerji mənbəyi (fuel cell power) isə çıxış parametri kimi götürülmüşdür.

Müəyyən edilmiş parametrlərin hər biri üçün üçbucaq mənsubiyyət funksiyaları təyin edilmişdir (Şəkil 3.6).



Şəkil 3.6. Parametrlərin mənsubiyyət funksiyaları
(Məmmədli Kamil, 2024)

Qurulmuş modelə əsasən PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarə edilməsini təmin etmək üçün 15 qaydadan ibarət biliklər bazası qurulmuşdur (Şəkil 3.7).



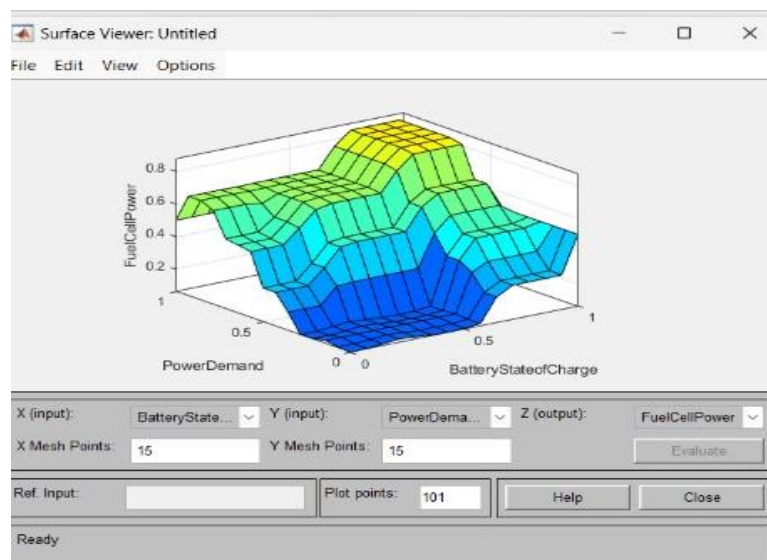
Şəkil 3.7. PUA enerji təminatının idarəetmə sisteminin biliklər bazası
(Məmmədli Kamil, 2024)

Biliklər bazası aşağıdakı qaydalar əsasında qurulmuşdur:

- 1) əgər $soc=L$ və $P_D = VH$ onda $P_{Fc} = VH$
- 2) əgər $soc=L$ və $P_D = H$ ondda $P_{Fc} = VH$
- 3) əgər $soc=L$ və $P_D = M$ onda $P_{Fc} = H$

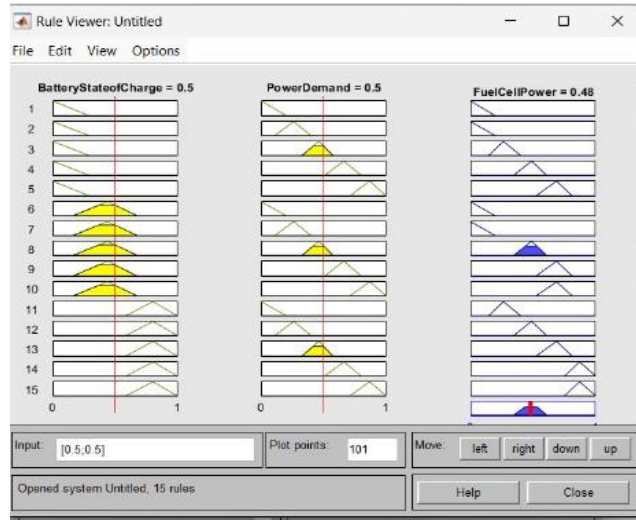
- 4) əgər $\text{soc}=\text{L}$ və $P_D=\text{L}$ onda $P_{Fc}=\text{M}$
- 5) əgər $\text{soc}=\text{L}$ və $P_D=\text{VL}$ onda $P_{Fc}=\text{L}$
- 6) əgər $\text{soc}=\text{M}$ və $P_D=\text{VH}$ onda $P_{Fc}=\text{VH}$
- 7) əgər $\text{soc}=\text{M}$ və $P_D=\text{H}$ onda $P_{Fc}=\text{H}$
- 8) əgər $\text{soc}=\text{M}$ və $P_D=\text{M}$ onda $P_{Fc}=\text{M}$
- 9) əgər $\text{soc}=\text{M}$ və $P_D=\text{L}$ onda $P_{Fc}=\text{L}$
- 10) əgər $\text{soc}=\text{M}$ və $P_D=\text{VL}$ onda $P_{Fc}=\text{L}$
- 11) əgər $\text{soc}=\text{H}$ və $P_D=\text{VH}$ onda $P_{Fc}=\text{H}$
- 12) əgər $\text{soc}=\text{H}$ və $P_D=\text{H}$ onda $P_{Fc}=\text{M}$
- 13) əgər $\text{soc}=\text{H}$ və $P_D=\text{M}$ onda $P_{Fc}=\text{L}$
- 14) əgər $\text{soc}=\text{H}$ və $P_D=\text{L}$ onda $P_{Fc}=\text{VL}$
- 15) əgər $\text{soc}=\text{H}$ və $P_D=\text{VL}$ onda $P_{Fc}=\text{VL}$

Qurulmuş qaydalara əsasən modelləşdirmənin effektivliyinin qiymətləndirilməsi üçün səth modeli qurulmuşdur və şəkil 3.8-də təsvir edilmişdir.



Şəkil 3.8. Power demand, state of charge və Fuel Cell Power parametrlərinin asılılığını göstərən səth modeli (Məmmədli Kamil, 2024)

Qaydaların vizual təsviri Şəkil 3.9-da göstərilmişdir.



Şəkil 3.9. Qaydaların vizual təsviri (Məmmədli Kamil, 2024)

NƏTİCƏ

Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatının və etibarlılığının idarə edilməsi üzrə elmi və praktiki tədqiqatlar nisbətən yaxın dövrlərdə meydana çıxmışdır. PUA yanacağıının səmərəliliyinin və batareyanın xidmət müddətinin artırılması real zamanda işləyən effektiv enerji idarəetmə strategiyalarının işlənməsini tələb edir.

“Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatının və etibarlılığının idarəetmə məsələlərinin analizi” mövzusunda tədqiqatın nəticələrinə əsasən aşağıdakıları demək olar:

- PUAS-ın əsas hissələrinə: Pilotsuz Uçuş Aparatı (PUA); Uçuş Kompüter/Təyyarə İdarəetmə Sistemi; PUA ilə yer stansiyası arasında rabitə və məlumat əlaqələrini təmin edən komanda və idarəetmə sistemi daxildir.

- PUA-ları təsnifatında bir sıra meyarları nəzərə almaq lazımdır. Bu meyarlara ölçü, gövdə (fırlanan, sabit, çırpılan qanadlar), uçuş məsafəsi, uçuş rejimi (havadan yüngül, havadan ağır), maksimum uçuş çəkisi (MTOW) və missiyası (tətbiq sahəsi) daxildir.

- PUA-da ötürmə sistemi bortda enerji istehlak edən əsas hissədir. O, yığılmış elektrik enerjisini motor-pərvanə sistemi tərəfindən yaradılan mexaniki gücə çevirərək PUA-nın hərəkətinə imkan verir. O, PUA-nın çəkisinin yarısından çoxunu təşkil edə bilər.

- Uçuşa nəzarət və əməliyyat sistemi idarəetmə stansiyalarını, rabitə əlaqələrini, məlumat terminallarını, buraxılış və bərpa sistemlərini, yerüstü dəstək avadanlığı və hava hərəkətinə nəzarət interfeysini özündə birləşdirir.

- Rabitə texnologiyasının əsas problemləri rahatlıq, uyğunlaşma, təhlükəsizlik və bant genişliyi, tezlik və məlumat/məlumat axınlarının koqnitiv idarə olunmasıdır.

- Pilotsuz Uçuş Aparatı Sistemlərinin data bağlantısı RF transmitter və qəbuledicidən, antenadan və modemlərdən ibarətdir.

- PUAS üçün ən çox istifadə olunan tezlik diapazonları əsasən RF proqramlarının istifadəsi ilə həyata keçirilir, adətən, PUAS-da peyk rabitəsi əlaqələri ya LOS-da (hərbi tətbiqlər üçün) və ya BLOS rejimində istifadə olunur.

- PUA-larla bağlı potensial problemlər aşağıdakılardır:

-Fərdi məlumatların qorunması, standartlaşdırma, naqilsiz sensorların tətbiqi, emal sürəti, batareya məhdudiyyətləri, PUA-ların yüksək hündürlükdə hərəkətinin təmin edilməsi, PUA enerji təminatı, maneələrdən yayınma, emal qabiliyyətinin məhdudluğu, yüklənmə qabiliyyətinin məhdudluğu, PUA trayektoriyalarında kənarçıxmalar, PUA-ların sığorta problemi, həssas ərazilərdə, PUA kibertəhlükəsizliyi, autentifikasiya strategiyalarının olmaması, uçuş kontrollerinə kiberhücum, məxfi məlumatların oğurlanması və təhlükəsizlik risklərinə qarşı mübarizə.

- Pilotsuz Uçuş Aparatlarının əsas elmi tədqiqat məsələlərinin müəyyən edilməsi zamanı PUA batareyasının enerji təminatının proqnozlaşdırılmasına, PUA proqram təminatında xətlərin aşkarlanmasına və PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarəetmə modelinin işlənməsinə xüsusi diqqət yetirilmişdir.

-Enerji sistemi PUA-da mühüm rol oynayır və bütün əməliyyat sistemini enerji ilə təmin etdiyi üçün sistemin ürəyi kimi görülür. PUA əməliyyatları üçün enerji mənbələrinə əsasən istilik mühərriki, yanacaq elementi, superkondensator, batareya və xarici enerji mənbəyi (günəş, külək və s.) daxildir. Onlar iki kateqoriyaya bölünür: kimyəvi sistem və elektrik yanaşmaları. Hal-hazırda, qalıq yanacaq ehtiyatlarının olmaması və istixana qazları emissiyaları ilə bağlı narahatlıqlar elm adamlarını tədricən kimyəvi enerji mənbələrinə olan marağını azaltmağa və digər yaşıl və təmiz enerji mənbələri axtarmağa vadar etdi. Tədqiqatçıları maraqlandıran başqa bir yanaşma isə, yenidən doldurulmaq üçün yerə qayıtmağa ehtiyac qalmadan PUA-nın dayanıqlığını artırmaq üçün günəş enerjisi və külək enerjisi kimi xarici enerji mənbələrindən istifadə etməkdir.

- Operatorun PUA-nı yerə endirməsi üçün qalan vaxtı dəqiq görə bilməsi şərti ilə, batareyaların geniş çeşiddə faydalı yük və hava şəraiti altında təhlükəsiz və etibarlı şəkildə idarə edilməsi vacibdir. Ümumiyyətlə, batareyanın vəziyyətini ölçən müxtəlif göstəricilər var ki, onlardan ən geniş yayılanı batareyada qalan yükün miqdarını ölçən State-of-Charge (SOC)-dir.

- Batareyaların monitorinqi üçün proqnozlaşdırıcı alqoritmlərin son məqsədi Boşalmanın Sonuna (EOD) və Ömrünün Sonuna (EOL) qədər olan vaxtı təxmin

etməkdir. Komponentin EOD və ya EOL-unu tapmaq məqsədi daşıyan belə bir qiymətləndirmə adətən Qalan Faydalı Ömrün (RUL) qiymətləndirilməsi kimi istinad edilir. RUL proqnozlaşdırması üçün Machine Learning (ML) və dərin təlim üsullarından istifadə effektiv hesab olunur.

- PUA batareyasının enerji təminatının proqnozlaşdırılması metodlarının tədqiqi edərkən üç gizli laydan ibarət neyron şəbəkə və LSTM modeli, həmçinin optimallaşdırma funksiyası olaraq ADAM istifadə edilmişdir.

- Proqram sistemlərinin mürəkkəb quruluşa malik olması bu sistemlərdə yol verilmiş xətalara aşkarlanması prosesini olduqca çətinləşdirir. Xəta verilənləri - proqram məhsullarının qiymətləndirilməsi üçün yaradılmış verilənlər bazalarında (məsələn, KC2) *xətali* və *xətasız* kimi iki sinifdə təsvir edilmişdir. Təklif edilmiş metodun eksperimental yoxlanması WEKA proqramında və KC2 verilənlər bazasının üzərində aparılmışdır. Proqram məhsullarında xətalara aşkarlamaq üçün aşağıdakı əlamətlər və uyğun sərhəd qiymətləri istifadə edilir: Kodun uzunluğu (lines of code – LoC), Dövri mürəkkəblilik (cyclomatic complexity – CC), Əsas mürəkkəblilik (essential complexity – EsC), Unikal operator (unique operator – UOpr), Unikal operand (unique operand – UOpnd), Ümumi operator (total operator – TOpr), Ümumi operand (total operand – TOPnd). Proqram məhsullarında xətalara aşkarlanması modeli qurularkən klassifikatorlar birləşdirilmişdir. Bu klassifikatorları birləşdirməkdə məqsəd sistemin proqram məhsullarında yol verilmiş xətalara aşkarlama keyfiyyətini yüksəltməkdir.

- Təklif olunan metodun eksperimentlərin aparılması üçün NASA KC2 verilənlər bazasından istifadə edilmişdir. Proqram məhsullarında qüsürlü elementlərin aşkarlanması üçün BFTree (Best First Tree), PART, IBk, NNg, IsolationForest, RandomForest alqoritmləri istifadə edilmişdir.

- Təklif edilmiş yanaşmanın effektivliyini qiymətləndirmək üçün doğru müsbət aşkarlama əmsalı (true positive rate – TP), yanlış müsbət aşkarlama əmsalı (false positive rate – FP), F-ölçü (F-measure), doğruluq (accuracy), dəqiqlik (precision), tamlıq (recall) parametrləri istifadə edilmişdir.

- PUA enerji təminatının qeyri-səlis idarəetmə modelinin tətbiqi qeyri-səlis məntiqi idarəetmə prinsiplərinə əsaslanır və real tətbiq strategiyaları ilə təsdiqlənmişdir. Qeyri-səlis enerji idarəetmə prosesi tələb gücü (power demand) PD və şarj vəziyyəti (state of charge) SOC kimi giriş dəyişənlərə əsaslanır. Çıxış dəyişəni olaraq isə yanacaq hüceyrəsinin gücü (fuel cell power) istifadə olunur. Bu proses, qeyri-səlis məntiqi idarəetmə prinsiplərinə əsaslanır və real tətbiq strategiyaları ilə təsdiqlənmişdir.

- Qeyri-səlisləşdirmə üçün SOC üç kateqoriyaya bölünür: aşağı (L), orta (M) və yüksək (H) vəziyyətlər. PD dəyərləri də beş dərəcəyə bölünür: çox yüksək (VH), yüksək (H), orta (M), aşağı (L) və çox aşağı (VL). Qeyri-səlis çıxış gücü də beş dərəcəyə bölünür: VH, H, M, L və VL. Təcrübə üçün MATLAB proqramından istifadə etmişik.

Beləliklə, dissertasiya işi Pilotsuz Uçuş Aparatlarının enerji təminatını və etibarlılığını maşın təlimi və dərin təlim modelləri əsasında analizi məsələlərinə həsr edilmişdir.

İSTİFADƏ EDİLMİŞ ƏDƏBİYYAT

Abdullayeva Fərqanə, “Proqram Məhsullarında Xətlərin Aşkarlanması Metodu”, Proqram mühəndisliyinin aktual elmi-praktiki problemləri I respublika konfransı, Bakı, 17 may 2017-ci il

Алыгулиев Р.М., Имамвердиев Я.Н., Абдуллаева Ф.Д., “Обнаружение аномалий в облачных BIG DATA данных,” XIII-ая международная конференция «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации», 2017, в печати.

Abaunza H., Garcia P. C., Les applications de drones a ´eriens-L’ utilisation civile des UAVs, Techniques de l’Ingenieur (2017).

Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications—a state of the art review, Applied Energy 179 (2016) pp. 350–377.

Belmonte N., Staulo S., Fiorot S., Luetto C., Rizzi P., Baricco M., Fuel cell powered octocopter for inspection of mobile cranes: Design, cost analysis and environmental impacts, Applied energy 215 (2018) pp. 556–565.

Boukoberine M., Zhou Z., Benbouzid M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects, Applied Energy, 2019, val. 255, pp. 1-22

Cai G., Dias J., Seneviratne L., A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends, Unmanned Systems 02 (02) (2014) 175–199 (Apr. 2014).

Cooley J. J., Lindahl P., Zimmerman C. L., Cornachione M., Jordan G., Shaw S. R., Leeb S. B. Multiconverter system design for fuel cell buffering and diagnostics under uav load profiles, IEEE Transactions on Power Electronics 29 (6) (2014) pp. 3232–3244.

Donateo T., Ficarella A., Spedicato L., Arista A., Ferraro M., A new approach to calculating endurance in electric flight and comparing fuel cells and batteries, Applied energy 187 (2017) pp. 807–819.

Fact Sheet – Small Unmanned Aircraft Regulations (Part 107), <https://www.faa.gov/news/fact-sheets/news-story.cfm?newsId=22615>, (Accessed on 18-07-2019).

Galkin B., DaSilva L. A., UAVs as Mobile Infrastructure: Addressing Battery Lifetime, arXiv:1807.00996 [cs] (Jul. 2018).

Gang B. G., Kwon S., Design of an energy management technique for high endurance unmanned aerial vehicles powered by fuel and solar cell systems, *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (20) (2018) pp. 9787–9796.

Gong A., Verstraete D., Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: current status and research needs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, pp. 21311-21333.

Gong A., Palmer J. L., Brian G., Harvey J. R., Verstraete D., Hardware-in-the-loop simulation of a fuel-cell-based UAV propulsion system using real-world flight data, in: *Proceedings of the Fourth Australasian Unmanned Systems Conference*, Australian Association for Unmanned Systems, 2014, p. 7.

Gong A., Verstraete D., Role of battery in a hybrid electrical fuel cell uav propulsion system, in: *52nd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2014 (2014).

Hassanalian M., Abdelkefi A., Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, *Progress in Aerospace Sciences* 91 (2017) pp. 99–131 (May 2017).

Hea P., Lic B., Liua X., Chenb J., Mab Y., “An empirical study on software defect prediction with a simplified metric set,” *Information and Software Technology*, 2015, vol. 59, pp. 170-190.

Khofiyah N. A., Maret S., Sutopo W., Nugroho B. D. A., Goldsmith’s commercialization model for feasibility study of technology lithium battery pack drone, in: *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, IEEE, 2018, pp. 147–151 (2018)

Lee B., Kwon S., Park P., Kim K. Active power management system for an unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 50 (4) (2014) pp. 3167–3177 (Oct. 2014).

- Leonard J., Savvaris A., Tsourdos A., Energy management in swarm of unmanned aerial vehicles, *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 74 (1-2) (2014) pp. 233–250.
- Li H., Ravey A., N'Diaye A., Djerdir A. A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor, *Journal of Power Sources* 395 (2018) pp. 262–270.
- Lu M., Bagheri M., James A. P., Phung T., Wireless charging techniques for uavs: A review, reconceptualization, and extension, *IEEE Access* 6 (2018) pp. 29865–29884.
- Morton S., D'Sa R., Papanikolopoulos N., Solar powered uav: Design and experiments, in: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2015, pp. 2460–2466.
- Norouzi Ghazbi S., Aghli Y., Alimohammadi M., Akbari A., Quadrotors unmanned aerial vehicles: A review., *International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems* 9 (1) (2016).
- Ou K., Wang Y.-X., Li Z.-Z., Shen Y.-D., Xuan D.-J., Feedforward fuzzy-PID control for air flow regulation of PEM fuel cell system, *International Journal of Hydrogen Energy* 40 (35) (2015) pp. 11686–11695.
- Ou K., Yuan W.-W., Choi M., Yang S., Jung S., Kim Y.-B. Optimized power management based on adaptive-PMP algorithm for a stationary PEM fuel cell/battery hybrid system, *51 International Journal of Hydrogen Energy* 43 (32) (2018) pp. 15433–15444.
- Ouyang J., Che Y., Xu J., Wu K., Throughput Maximization for Laser-Powered UAV Wireless Communication Systems, *arXiv:1803.00690 [cs, math]* (Mar. 2018). [arXiv:1803.00690](https://arxiv.org/abs/1803.00690).
- Pan Z., An L., Wen C., Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles, *Applied Energy* 240 (2019) pp. 473–485.
- Peng L., Zheng S., Chai X., Li L. A novel tangent error maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system under fast multi-changing solar irradiances, *Applied energy* 210 (2018) pp. 303–316.

Powerlight Technologies — Power Over Fiber Case Study — Aerial Applications, <https://powerlighttech.com/power-over-fiber-case-study-aerial-applications>, (Accessed on 14-04-2019).

Puchalski Radosław, Giernacki Wojciech, UAV Fault Detection Methods, State-of-the-Art, Drones, 2022, 6(11), pp. 1-39

Ruan J., Walker P. D., Zhang N., Wu J. An investigation of hybrid energy storage system in multi-speed electric vehicle, Energy 140 (2017) pp. 291–306.

Shraim H., Awada A., Youness R., A survey on quadrotors: Configurations, modeling and identification, control, collision avoidance, fault diagnosis and tolerant control, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 33 (7) (2018) pp. 14–33.

Standartization roadmap for Unmanned Aircraft Systems, ANSI, 2018, Version 1.0, p. 250.

T. DRONEII.com, UAV configurations slide – Drone Industry Insights, (Accessed on 14-04- 2019) (Jun. 2016).

Turanoguz E., Alemdaroglu N., Design of a medium range tactical UAV and improvement of its performance by using winglets, in: 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE, 2015, pp. 1074–1083 (2015).

Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J., Handbook of unmanned aerial vehicles, Springer, 2015 (2015).

Varshney A., Gupta D., Dwivedi B., Speed response of brushless dc motor using fuzzy pid controller under varying load condition, Journal of Electrical Systems and Information Technology 4 (2) (2017) pp. 310–321.