Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427516
Derleme Makalesi/ Review Article

Erimiş Tuz Reaktörleri'nin (MSR) Tarihsel Gelişimi, Teknolojik İlerlemeleri ve Gelecek Perspektifleri

Mürselat YÜRÜMEZ[1*]
[1]Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 25240, Erzurum, Türkiye

Özet

Erimiş Tuz Reaktörleri (Molten Salt Reactor/MSR), nükleer enerjide kalıplaşmış anlayışları değiştiren ve sürdürülebilir enerjiye geçişte yenilikçi çözümler sunan önemli bir konsepttir. İlk olarak 1950'lerde Oak Ridge National Laboratory'de (ORNL) gerçekleştirilen Aircraft Reactor Experiment (ARE) ve Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) projeleriyle uygulanabilirliği kanıtlanan bu teknoloji, düşük basınçta güvenli işletim, yüksek sıcaklıklarda verimli enerji üretimi ve çevrim içi yakıt işleme potansiyeli ile öne çıkmaktadır. MSRE'nin Uranyum-233 ile başarılı çalışmaları, Toryum tabanlı yakıt çevrimlerinin uygulanabilir olduğunu kanıtlamıştır. Günümüzde nükleer kapasitenin büyük kısmı hafif su reaktörü (Light Water Reactor/LWR) ve basınçlı su reaktörü (Pressurized Water Reactor/PWR) tipi reaktörlerden oluşuyor olsa da MSR'ler atmosfer basıncına yakın koşullarda çalışıyor olması sayesinde daha güvenilir ve 600–800 °C çıkış sıcaklıklarıyla daha verimlidir. Ayrıca hidrojen üretimi ve endüstriyel ısı uygulamalarında da kullanılma potansiyeline sahiptir. Bu özelliklerinin yanında toryum tabanlı yakıt döngüsü, geniş coğrafi rezervleriyle enerji arz güvenliğini artırmakta nükleer silahlanma riskini ve uzun ömürlü atıkların azaltılmasınada katkı sunmaktadır. Günümüzde araştırmalar, MSR'ın tarihsel temellerine ticari bir boyut kazandırmaktadır. Çin'de yürütülen TMSR-LF1 projesi, Avrupa'daki SAMOFAR projesi ve ABD'deki IMSR ile ThorCon tasarımları; çevrim içi yakıt yönetimi, hızlı spektrumda atık yakma, modüler inşa ve düşük maliyetli enerji arzı gibi yenilikçi yaklaşımlar geliştirmektedir. Bununla birlikte, MSR teknolojisi hala bazı kritik sorunlara sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda korozyonu, tuz kimyasının kararlılığı, fisyon ürünlerinin uzaklaştırılması ve lisanslama süreçlerindeki belirsizlikler çözüm üretilmesi gereken başlıca alanlardır. Böylece MSR'ler, yalnızca elektrik üretiminde değil, karbon nötr hedeflere katkı sağlayacak çok yönlü enerji çözümleriyle küresel enerji dönüşümünde stratejik bir rol üstlenmesi şaşırtıcı olmaz. Ancak bunun gerçekleşmesi için malzeme bilimi, tuz kimyası ve regülasyon alanlarında uluslararası iş birliği ve yoğun araştırmalar gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Erimiş tuz reaktörü (MSR), toryum yakıt çevrimi, enerji güvenliği, pasif güvenlik sistemleri, karbon nötr enerji

The Historical Development, Technological Advances and Future Perspectives of Molten Salt Reactors (MSR)

Mürselat YÜRÜMEZ [1*]
[1]Atatürk University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Engineering, 25240, Erzurum, Türkiye

Abstract

Molten Salt Reactors (MSR) are an important concept that challenges conventional thinking in nuclear energy and offers innovative solutions for the transition to sustainable energy. First demonstrated in the 1950s through the Aircraft Reactor Experiment (ARE) and Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) projects at Oak Ridge National Laboratory (ORNL), this technology stands out for its safe operation at low pressure, efficient energy production at high temperatures, and potential for in-cycle fuel processing. The MSRE's successful work with Uranium-233 has proven the feasibility of Thorium-based fuel cycles. Although most of today's nuclear capacity consists of light water reactors (LWR) and pressurized water reactors (PWR), MSRs are more reliable and efficient with outlet temperatures of 600–800 °C, thanks to their operation at near atmospheric pressure. They also have the potential to be used in hydrogen production and industrial heat applications. In addition to these features, the thorium-based fuel cycle contributes to increasing energy supply security with its extensive geographical reserves, reducing the risk of nuclear proliferation, and minimizing long-lived waste. Today, research is adding a commercial dimension to the historical foundations of MSR. The TMSR-LF1 project in China, the SAMOFAR project in Europe, and the IMSR and ThorCon designs in the US are developing innovative approaches such as online fuel management, fast spectrum waste burning, modular construction, and low-cost energy supply. However, MSR technology still faces some critical challenges. Corrosion at high temperatures, the stability of salt chemistry, the removal of fission products, and uncertainties in licensing processes are the main areas requiring solutions. Consequently, it would not be surprising for MSRs to play a strategic role in the global energy transition, not only in electricity generation but also through versatile energy solutions that contribute to carbon neutrality goals. However, for this to happen, international collaboration and intensive research in materials science, salt chemistry, and regulation are required.

Keywords: Molten salt reactor (MSR), thorium fuel cycle, energy security, passive safety systems, carbon-neutral energy

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Mürselat YÜRÜMEZ (Lisans), e-posta: murselatyr@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2779-6424
**Geliş/Received: 25/09/2025, Düzeltme/Revised: 15/10/2025, Kabul/Accepted: 17/10/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

MSR'ler, nükleer reaktör tasarımları içerisinde stratejik bir konuma sahip olup, nükleer enerji teknolojilerinde kalıplaşmış anlayışları değiştirerek nükleer teknolojilerin geleceğine yön verebilecek potansiyele sahip öncü bir konsept olarak öne çıkmaktadır. Konseptin kökeni, 1950'li yıllarda ORNL tarafından gerçekleştirilen ve süpersonik uçaklarda gerekli olan enerjinin sıvı yakıtlı reaktör ile karşılanması fikri ile ortaya çıkan ARE ile atılmıştır. Burada erimiş tuzun yüksek sıcaklıklarda ve düşük basınç altında güvenli biçimde kullanılabileceği kanıtlanmıştır (Bettis et al., 1957). ARE projesin ardından 1965–1969 yıllarında yürütülen MSRE, Uranyum-235 ve Uranyum-233 ile kritik işletimde başarıya ulaşmış ve sıvı yakıtın yüksek sıcaklıklarda kararlı bir yapıda sürkile olacağını aynı zamanda ise soğutucu olarak kullanabileceğini kanıtlamıştır (Rosenthal et al., 1970). Bu öncü deneyler ışığında yalnızca katı yakıtlı reaktörler ile kısıtlı kalınmayacağı aynı zamanda sıvı yakıtlı tasarımların teknik olarak mümkün olduğu gösterilmiştir.

Klasik hafif su reaktörleri (LWR) ve onların alt türü olan basınçlı su reaktörleri (PWR), günümüzde dünya çapında nükleer kapasitenin temelini oluşturur. PWR'ler ticari reaktörlerin yaklaşık olarak %70'ini oluşturmakta ve bu sayede dünya genelinde en yaygın tercih edilen reaktör tipidir (Schneider & Froggatt, 2023). PWR tasarımlarında uranyum oksit yakıt peletleri ve yüksek basınç altında su kullanılırken, MSR'ler erimiş tuz içinde çözünmüş yakıt kullanır ve yaklaşık olarak atmosfer basıncına yakın koşullarda işletilebilmektedir. Bu fark, basınç kaynaklı kaza risklerini minimum seviyelere indirmektedir (LeBlanc, 2010). Ayrıca MSR'ler 600–800 °C sıcaklık aralığında çalışarak hem daha yüksek termodinamik verimlilik performansı ortaya koyarken hem de hidrojen üretimi ve endüstriyel ısı sağlama gibi yüksek sıcaklık gerektiren uygulamaları da destekleme potansiyeline sahiptir (Serp et al., 2014; Wulandari et al., 2023). Erimiş tuzda yakıtın çevrim içi işlenebilmesi, uzun ömürlü atık miktarını azaltmaktadır ve toryum tabanlı yakıt döngülerini mümkün kılar (Ignatiev et al., 2019). MSR, LWR ve PWR'nin farklılıklarını ayrıntılı biçimde Tablo 1'de kıyaslanmıştır.

Tablo 1. MSR ve PWR reaktörlerinin özelliklerinin karşılaştırması (Barré et al., 2016)
Table 1. *Comparison of the characteristics of MSR and PWR reactors*

Özellik	MSR	PWR
Çalışma basıncı	Atmosfere yakın	Çok yüksek (155 bar=15-16 MPa)
Çıkış sıcaklığı	600–800 °C	300–330 °C
Soğutucu / Yakıt	Erimiş tuz / sıvı yakıt	Basınçlı su / katı yakıt
Güvenlik geri beslemeleri	Negatif sıcaklık katsayısı	Boşluk katsayısı riski
Yakıt çevrimi	Toryum çevrimi, çevrim içi arıtım	Uranyum zenginleştirme
Atık profili	Daha düşük uzun ömürlü atık	Yüksek uzun ömürlü atık
Gelişim durumu	Ar-Ge	Ticari

MSR'lerin tekrar gündeme gelmesinde yalnızca teknik avantajlar değil, aynı zamanda enerji güvenliği ve jeopolitik dinamikler gibi faktörlerde rol oynamaktadır. Geleneksel uranyum tedarik zinciri sınırlı sayıda tedarikçi ülkeye (özellikle Rusya ve Kanada) bağlıdır. Rusya, küresel zenginleştirme kapasitesinin yaklaşık %40'ını kontrol etmekte ve yakıt pazarında stratejik anlamda önemli bir konumda bulunmaktadır (World Nuclear Association, 2025). Uranyum zenginleştirme kapasitesini Amerika özelinde değerlendirecek olursak Amerika'nın mevcut ticari reaktörlerinin ihtiyaç duyduğu yakıtın yalnızca %5'i yerli kaynaklarınca karşılanabilmektedir geri kalan kısmı ise ithal edilmektedir (World Nuclear Association, 2024). Bu durum, enerji güvenliği açısından önemli bir jeopolitik riskler oluşturmaktadır. Ancak uranyum rezervlerine kıyasla toryum rezervleri daha geniş coğrafi dağılıma sahiptir; Hindistan, Türkiye, Brezilya ve ABD gibi ülkeler büyük toryum potansiyeline sahiptir MSR'lerin toryum tabanlı çevrimleri kullanabilmesi nükleer yakıt tedarikinde çeşitliliği artırarak stratejik bağımsızlığa katkı sunabilir. Bununla birlikte, günümüzün en büyük sorunlarından. birisi olan iklim değişikliği ile mücadele bağlamında düşük karbonlu enerji üretimin önemi giderek artmaktadır. MSR'larda elektrik ve ısı üretimi nükleer fisyona dayandığı için yakıt yanması sürecinde CO2 salınımı gerçekleşmez buna ek olarak toryum döngüsünde yüksek yanma oranı ve düşük oranda uzun ömürlü radyoaktif atık üretimi gibi faktörler göz önünde tutulduğunda hem radyoaktif atık üretimi hem de karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli sayesinde küresel iklim politikalarıyla uyumlu çevreci bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Davidson, 2022). Çevreci özelliklerinin yanı sıra yüksek sıcaklıkta kararlı çalışabilmesi, yalnızca elektrik üretiminde değil sahip olduğu çoklu enerji çıkışı potansiyeli sayesinde aynı

zamanda hidrojen üretimi, sentetik yakıt sentezi ve proses ısısı sağlama gibi endüstriyel uygulamalarda da kullanılma potansiyeli olduğunu göstermektedir (Fox et al., 2020).

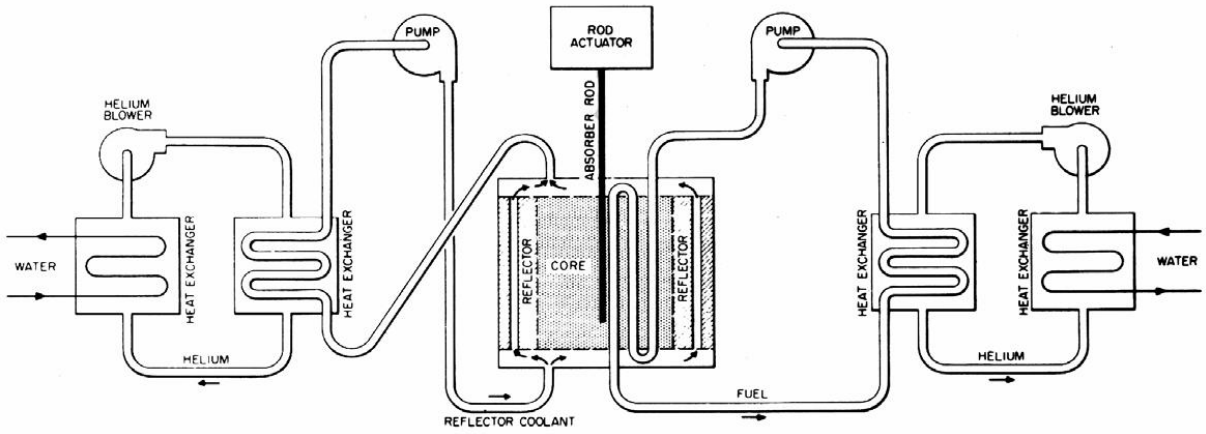
Teknik açıdan ise son yıllarda özellikle malzeme bilimi ve termohidrolik analiz yöntemlerinde önemli ilerlemeler meydana gelmiştir. LiF–BeF_2 gibi tuz karışımlarının korozyon etkileri üzerine yapılan çalışmalar, yapısal malzemelerin yüksek sıcaklık ve radyasyon koşullarında davranışına ışık tutmaktadır (Young et al. 2018). Ayrıca gelişen simülasyon yöntemleri sayesinde MSR'lerin akışkan dinamiği ve güvenlik analizlerinde daha gerçekçi öngörüler sunarak tasarımların son halini almasına katkı sağlamaktadır (Leandro et al., 2019). Bu güncel bulgular MSR'lerin teknik açıdan da hızla geliştiğini ortaya koymaktadır.

Bu nedenlerle Generation IV International Forum (GIF), MSR'leri 4. nesil reaktör tasarımları arasında öncelikli bir alan olarak belirlemiştir (Serp et al., 2014). Dünya üzerinde çeşitli ülklere de yürütülen MSR programları, Çin'de yürütülen TMSR, Avrupa'daki SAMOFAR projesi ve Kuzey Amerika'da geliştirilen IMSR programı, teknolojinin araştırma aşamasından ticarileşmeye doğru hızla ilerlediğini göstermektedir (Fan & Guo, 2024; Allibert et al., 2018).

MSR'ler tarihsel ORNL deneylerinden günümüzdeki enerji güvenliği, iklim politikaları ve jeopolitik stratejilere uzanan çok boyutlu bir bakış acısıyla ele alınarak yeniden gündeme gelmiştir. Ancak MSR'lar hala ticari uygulanabilirliğini sağlayamamış ve literatürde hala çözülmesi gereken sorunları vardır bunları ele alacak olursak, malzeme dayanımı, uzun dönemli yakıt tuzu kararlılığı, toryum döngüsünün ekonomik fizibilitesi ve küresel yakıt arz zincirinin çeşitlendirilmesi gibi faktörlerdir. Bu çalışmada amacımız, söz konusu eksiklikleri de sistematik biçimde ele alarak MSR'lerin bilimsel açıdan gelecekteki potansiyelini değerlendirmektir.

2. Tarihsel ve Teorik Arka Plan

MSR fikri, 1950'li yıllarda ORNL tarafından geliştirilen deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu fikrin ilk önemli adım 1954 yılında geliştirilen ARE projesi olmuştur. Bu proje, süpersonik uçaklara güç sağlamak için tasarlanmış ve bu deneyde yakıt olarak UF_4, taşıyıcı tuz olarak ise FLiBe kullanılmıştır. ARE, yakıt çıkışında yaklaşık olarak 860 dereceye ulaşmış; düşük sistem basınçlarında çalışacak şekilde tasarlanmış ve totalde 221 saat nükleer işletim gerçekleştirmiştir. Bu işletme sürecinin son 74 saatinde ise MW düzeyinde, toplamda ise 96 MW.h (Bettis et al., 1957). Bu deney, erimiş tuzların yüksek sıcaklıklarda güvenle kullanılabileceğini kanıtlamış ve bu konudaki soruları ortadan kaldırmıştır.



Figür 1. ARE'nin tasarım diyagramı
Figure 1. *Design diagram of ARE*

Günümüz MSR fikrinin tarihsel anlamda bugünlere gelmesinde ise bir diğer önemli adım 1965-1969 yılları arasında geliştirilen MSRE projesi olmuştur. Bu projenin deneylerinde reaktör 7 MWt güç seviyesinde çalıştırılmış, başlangıçta uranyum-235 kullanılmasında temel faktör bilinen bir yakıt ile sistemin güvenliğini test edilmesidir. Daha sonra ise başka bir reaktörde toyrum döngüsü ile üretilen uranyum-233 kullanılarak toryum çevrimine yönelik hem kritik veriler elde edilmiş hem de uranyum-233 ile kararlı bir fisyon zinciri başlatılabildiği kanıtlanmıştır. MSRE'nin önemli katkılarından birkaçını ele alacak olursa grafit moderatör ile termal spektrumda kararlı reaktivite sağlanabileceğini ve bunun toryum döngüsünde kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Bir diğer önemli katkı ise, fisyon sonucu ortaya çıkan Ksenon-135 gibi nötron zehirlerinin

helyum sıyırma yöntemiyle uzaklaştırılabilmesidir. Bu uygulama, geçici reaktivite kayıplarını azaltarak reaktörün reaktivite yönetimini kolaylaştırmış ve yakıt verimliliğinin artırılabileceği sonucuna varılmıştır. MSRE'nin dört yıllık çalışma süresinde birçok deney yapılmış ve geniş bir veri setleri elde edilmiştir. Bu deneyler arasında çevrim içi yakıt işleme amacıyla yürütülen florlandırma deneyi de yer almaktadır. Bu deney ile ilk kez çevrim içi yakıt işleme fikri test edilmiştir ve bu deneyler sonucunda ise bu yöntemin uygulanabilirliği doğrulanmıştır. MSRE'nin dört yıllık çalışma sürecinde oluşturulan veri seti, yüksek sıcaklıklarda malzeme davranışları ve korozyon sürecine ilişkin kritik verilerin toplanmasını sağlamıştır (Rosenthal et al., 1970; Rosenthal et al., 1972)

Bu iki deney ile birlikte MSR teknolojisinin güvenlik ve yakıt çevrimi açısından yenilikçi potansiyeli ortaya koymaktadır. Ancak MSR'ın gelişim sürecini etkileyen en önemli faktörlerden biri de 1970'lerde uranyum fiyatlarının düşük olması ve hızlı çoğaltıcı reaktörlere odaklanılmasıydı bu da MSR araştırmalarının uzun bir süre önceliğini yitirmesine neden olmuştur (LeBlanc, 2010). MSR'lerın fiziksel ve kimyasal temellerini ele alacak olursak atmosfere yakın basınçta çalıştığından yüksek basınç dayanımına duyulan ihtiyaç azalır; 600–800 °C aralığında olan çıkış sıcaklıkları ise yüksek verimli Brayton çevrimi ve endüstriyel ısı uygulamaları ile de uyumludur (Serp et al., 2014; Fox et al., 2020). MSR'lerde yakıtın sıvı hâlde olması, nötronik, termal, kimyasal süreçlerin birbirinden etkilenmesine yol açar. Yanma süreci sırasında izotopik dengesi ile kimyasal denge birlikte değişir; bu etkileşim reaktörün güvenlik ve ekonomik işletim potansiyeli açısından kritik bir faktördür (Walker, 2023). MSR'ların yakıt ve birincil soğutucusu olarak kullanılan tuz karışımlarını ele alacak olursak, FLiBe düşük buhar basıncı ve düşük nötron absorbsiyonu ile yüksek nötron ekonomisi sayesinde öne çıkmaktadır. FLiNaK ise berilyumun toksik etkisinin sistemden uzaklaştırılmasına rağmen benzer termofizik performans sunar. Güncel çalışmalar ısıl iletkenlik, viskozite, difüzyon parametreleri için daha dar belirsizlik aralıkları raporlayarak tasarım hesaplarının güvenilirliğini artırmıştır (Rybin et al., 2024).

MSR'lerdeki önemli sorunlardan biri yakıt tuzunun korozyon etkisidir. Bu soruna çözüm olarak Hastelloy-N gibi özel alaşımlar geliştirilmiştir. Ancak günümüzde halen özellikle krom çözünmesi ve tellür nedeniyle meydana gelen gevrekleşme sorunları devam etmektedir. (Young et al., 2018). Yakıt içerisinde mevcut ulan istenmeyen miktarda bulunan oksijen korozyonu hızlandırması nedeniyle redoks potansiyelinin sürekli olarak izlenmesini gerekli kılmaktadır. Bu potansiyelin HF/H_2 tamponu veya Be(0)/Be(II) çiftleriyle dengelenmesi, malzeme ömrünü uzatmaktadır (Wang et al., 2021; Liu et al., 2023).

MSR'larda sıcaklık artışıyla yoğunluk ve moderasyon azalır negatif sıcaklık katsayısı MSR'lere pasif bir güvenlik sistemi kazandırır. MSR'ların sahip olduğu bir diğer pasif önlem ise Freeze-plug (eriyen tıkaç) boşaltma sistemidir. Bu sistem sayesinde çekirdek içerisindeki yakıt tuzu acil bir durumda eriyebilen tıpa sayesinde yerçekimiyle güvenli tanklara transfer edilebilir (Serp et al., 2014; Ignatiev et al., 2019).

Toryum çevriminde Toryum-232'den Protaktinyum-233 elde edilir ve bundan da Uranyum-233 elde edilir, sıvı yakıt mimarisi Protaktinyum-233'ün çevrim içi ayrımını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, Uranyum-233 üretim verimini artırmakta ve toryum çevriminin sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Delpech et al., 2009; Huo et al., 2022). Toryum yakıt çevrimi açısından dikkat çeken önemli avantajlar arasında ise kaynak esnekliği ve uzun ömürlü aktinitlerin azaltılabilmesidir yer almaktadır (Ignatiev et al., 2019; Jyothi et al., 2023).

MSR'ları ölçeklenebilirlik ve ekonomik uygulanabilirlik kapsamında ele aldığımızda ise, sürekli kimyasal işleme ve redoks izleme gibi proses karmaşıklıkları işletme maliyetlerini belirleyici faktörlerdir. Prototip (First of a Kind/ FOAK) tesislerden sonraki nesil tesislere (Next of a Kind/NOAK) geçişte maliyet düşüşleri olması beklenmekle birlikte, literatürde hala belirsizliğini koruyan maliyet öngörüleri olduğu vurgulamaktadır (Abou-Jaoude, 2023). Ayrıca, yakıt tuzlarının nükleer saflıkta üretimi ve malzeme nitelendirmesi sermaye ve işletme maliyetleri üzerindeki etkisini sürdürmeye devam etmektedir. Bu nedenle endüstriyel ölçek için standartlaşmış kimyasal akış şemaları ve kalıcı kalite güvencesi önemli gereksinimler arasında yerini korumaktadır (Walker, 2023).

Güncel olarak yürütülen programlar önemli jeopolitik referanslar sunmaktadır. Çin'de TMSR-LF1 prototipi kapsamında toryum-tuz araştırmaları hız kazanmaya devam etmekte olup, program MSR'lerin yakıt ve güvenlik konseptlerini pilot olarak sınamayı hedeflemektedir (Fan & Guo, 2024). Avrupa'da yürütülen çalışmalarda ise SAMOFAR projesi aracılığıyla MSFR için savunma hatları yaklaşımıyla güvenlik metotları

geliştirilmiş; boşaltma sistemleri, reaktivite kontrolü ve çok-fizikli doğrulama simülasyonları ile sistematik çıktılar elde edilmiştir (Beils et al., 2019).

MSR'ler, düşük basınçta güvenli işletim ve yüksek sıcaklık verimliliği gibi mühendislik üstünlüklerinin yanı sıra enerji güvenliği tartışmalarında da önemli bir konuma sahiptir. Enerji güvenliği, "hayati enerji sistemlerinin düşük kırılganlığı" olarak tanımlanmakta ve üç ana başlık altında incelenmektedir bu başlıklar, egemenlik/jeopolitik, dayanıklılık/altyapı ve sürdürülebilirlik/çevre başlıklarıdır (Cherp & Jewell, 2014). Bu bağlamda Rusya'nın dönüştürme ve zenginleştirme kapasitesindeki yüksek payı (yaklaşık %38 dönüşüm, %46 zenginleştirme), birçok ülkenin yakıt döngüsü konusunda Rusya'ya bağımlılıklarını gün yüzüne çıkarmıştır. Bu durum, yakıt çeşitlendirmesi, yerelleştirilmiş tedarik ve ileri reaktör seçenekleri (MSR dahil) üzerinden yeni politika arayış sürecini hızlandırmaktadır (Szulecki & Overland, 2023).

MSR'lerin enerji güvenliğine katkısı ise üç boyutta ele alınabilir. Teknik açıdan, negatif reaktivite katsayıları ve pasif boşaltma gibi altyapı sistemleri sayesinde gelişmiş bir güvenlik sunmaktadır (Serp et al., 2014; Ignatiev et al., 2019). Yakıt döngüsü boyutunda ise toryum bazlı seçenekler jeolojik ve jeopolitik dağılım bakımından arz esnekliği sağlamakta ve atık envanterini azaltma potansiyeline sahiptir (Yüksel et al., 2023; Jyothi et al., 2023). Politika ve jeopolitik açıdan ise, yakıt ve hizmet tekelleşmesinin risklerine karşı çeşitlendirme ve yerelleşme stratejileriyle uyumludur. Bu Avrupa'da MSFR güvenlik metodolojilerinin kurumsallaşması katkı sağlamaktadır. Araştırma motivasyonu bakımından literatür, uzun dönemli malzeme dayanımı, çevrim içi kimyasal işlemlerin endüstriyel ölçeğe taşınması ve ekonomik belirsizliklerin ortadan kaldırılması halen kritik bir önem taşımaktadır (Walker, 2023; Szulecki, 2023; Beils et al., 2019).

3. Modern Teknolojik Yaklaşımlar ve Uygulamalar

ARE ve MSRE deneyleri sonucunda elde edilen, düşük basınçta çalışma, sıvı yakıt çevrimi ve negatif sıcaklık katsayıları gibi tasarım standartları günümüz modern tasarımlarına aktarılmıştır (Serp, et al., 2014). Günümüzde ise Çin, Avrupa ve ABD merkezli programlar, bu temellerden yola çıkarak daha geniş ölçekli ve ticari uygulanabilir tasarımlara dönüştürmektedir.

Çin'in TMSR-LF programı kapsamında 2021'de işletmeye alınan TMSR-LF1 prototipinde (2 MWt), toryum tabanlı yakıt çevrimi için FLiBe esaslı bir tuz kullanılarak test edilmektedir (Fan & Guo, 2024). Çin'in bu projede hedefi 373 MWt ölçeğinde ticari bir reaktör olup ayrıca enerji güvenliği ve karbonsuzlaştırma politikalarıyla uyumlu bir vizyon ortaya koymaktır (Alang, 2023).

Avrupa'da yürütülen SAMOFAR projesi (2015–2019), erimiş tuz hızlı reaktörü (Molten Salt Fast Reactor /MSFR) konseptini güvenlik ilkeleri doğrultusunda geliştirmiştir. Bu kapsamda, cok katmanlı güvenlik yaklaşımı ile nötron taşınımı, fisyon ürünlerinin davranışı ve çevrim içi yakıt işleme senaryoları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir (Beils et al., 2019). Sonraki araştırmalar ise, MSFR'nin plütonyum ve diğer uzun ömürlü aktinitleri yakma kapasitesi ortaya koyulmuş, bu özelliği ile de Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın (European Green Deal/EGD) 2050 karbon nötr hedefleriyle uyumlu olduğunu kanıtlanmıştır (Allibert et al., 2020).

ABD'de ise bu süreçte özel sektör de yer almakta ve ticari çözümler geliştirmektedir. Terrestrial Energy'nin IMSR tasarımı, 400 MWt güçte olup kartuş tipi yakıt yönetim sistemi ile modüler işletim kolaylığı sağlamaktadır (Carter et al., 2020). ThorCon ise 500 MW ölçekli tasarımlarında, reaktör modüllerini gemi yapımında kullanılan büyük ölçekli çelik konstrüksiyon yöntemleri ile doğrudan tersanelerde üretilip sonrasında ise sahaya taşıyarak kurmayı hedefleyen inşa yaklaşımını benimsemiştir bu yöntemin terixh edilmesinde ise ana faktör sermaye maliyetini düşürmektir.

MSR'ler, literatürde hem güvenlik hem de sürdürülebilirlik açısından öne çıkan avantajlar sunmaktadır. Bu güvenlik faktörlerinden negatif sıcaklık katsayısı özelliği ele alacak olursak sıcaklık artıkça reaktivitenin doğal olarak düşmesi, sistemin kendini dengeleyerek kararlı bir yapıya geçmesini sağlamaktadır (Ignatiev et al., 2019). Ayrıca, atmosfer basıncında çalışması sayesinde PWR tipi reaktörlerde karşılaşılan basınç kapı riskleri ortadan kalkmaktadır bunlara ek olarak sıvı yakıt sayesinde pasif soğutmaya uygun olması önemli bir tasarım üstünlüğü oluşturmaktadır (Serp et al., 2014). Toryum yakıt döngüsü kullanımı ise ağır aktanitlerin üretimini azaltmakta nükleer silah üretimini sınırlamakta ayrıca uzun vadeli radyotoksisiteyi yaklaşık %60–70 oranında azaltarak atık yönetiminde büyük bir avantaj sunmaktadır (Yüksel et al., 2023). Ancak MSR teknolojisinin çözülmesi gereken zorlukları da mevcuttur. Yakıt ortamında krom çözünmesi ve grafit moderatör ile

etkileşimler, korozyon başlıca sorunları arasında yer almaktadır (Young et al. 2018). Aynı şekilde, Ksenon ve Kripton gibi fisyon sonucunda oluşan gazlarının uzaklaştırılması ile redoks potansiyelinin kontrol altında tutulması kritik mühendislik sorunları olarak literatürdeki yerini korumaktadır. (Wang et al., 2021). Ekonomik açıdan ise ilk nesil prototip reaktörlerin sınırlı üretim koşullarında seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin (Levelized Cost of Electricity/LCOE) 100–120 USD/MWh aralığında gerçekleşmesi öngörülmektedir. Ancak seri üretim ve standartlaşmanın sağlanmasıyla birlikte bu maliyetin 60–80 USD/MWh düzeyine düşebileceği tahmin edilmektedir (Mignacca & Locatelli, 2020).

Tablo 2. Güncel MSR projelerinin temel parametreleri
Table 2. *Basic parameters of current MSR projects*

Proje/ Bölge	Güç Seviyesi	Yakıt / Tuz Karışımı	Tasarım Özellikleri	Hedeflenen Uygulama	CAPEX (M$/MWe)	LCOE (USD/MWh)
TMSR-LF1	2 MWt; planlanan 373 MWt	FLiBe + ThF_4 + UF_4	Yüksek sıcaklık (650–700 °C), çevrim-içi yakıt yönetimi	Elektrik, hidrojen, proses ısısı	4000–5000	70–90
MSFR	3000 MWt (konsept)	FLiBe + aktinitler	Hızlı spektrum, çevrim-içi kimya entegrasyonu	Atık yakma, elektrik üretimi	5000+	80–100
IMSR	400 MWt	LEU + FLiBe	7 yıllık kartuş, modüler inşa	Orta ölçekli enerji arzı	3500–4500	65–85
ThorCon	500 MWt	LEU + FLiBe	Tersane üretimi, hızlı kurulum	Gelişmekte olan ülkelere enerji arzı	3000–4000	60–75

MSR'ler yalnızca elektrik üretimiyle sınırlı değildir, çok yönlü enerji çözümleri sağlamaktadır. Karbon nötr hedefler açısından, MSR'ler düşük karbonlu baz yük üretimi sağlayarak yenilenebilir kaynakların sahip olduğu dengesizliği telafi etme kapasitesine sahiptir (Serp et al., 2014). Bunun yanında hidrojen üretimi için de öne çıkan bir uygulama alanıdır. Örneğin Hibrit Kükürt (Hybrid Sulfur/HyS) yöntemiyle hidrojen üretilebileceği öngörülmektedir (Fox, et al., 2020). Ayrıca, MSR tabanlı iyot-kükürt (S-I) çevriminin, PWR tabanlı sistemlere kıyasla yaklaşık %30 daha yüksek termokimyasal verim sunduğu gözlenmektedir (Fallah Vostakola, et al., 2023). Endüstriyel ısı uygulamaları kapsamında ise, MSR'lerin özellikle çelik ve çimento gibi sektörlerinde karbon emisyonlarını potansiyeline sahiptir (Jenet et al., 2024).

Tablo 3. PWR–MSR karşılaştırmalı hidrojen ve ısı üretim potansiyeli
Table 3*. PWR–MSR comparative hydrogen and heat production potential*

Reaktör Tipi	Çıkış Sıcaklığı	Hidrojen Üretimi (ton/saat, 100 MWt)	Endüstriyel Uygunluk
PWR	280–320 °C	<0.5 (SOEC verimsiz)	Düşük – sadece elektrik
MSR	650–700 °C	2–2.5 (SOEC) / %30 daha verimli S-I	Yüksek – hidrojen, proses ısısı

Aslında MSR araştırmaları teknik, ekonomik ve politik boyutlarıyla çok katmanlı bir süreçtir. Malzeme geliştirme alanında, Hastelloy-N türevlerinin 20 yılı aşkın bir süre test edilmesi, yüksek sıcaklıklarda uzun süreli korozyon dayanımı açısından önemli veriler sunmaktadır (Liu et al., 2023). Simülasyon tarafında ise nötronik, termal-hidrolik ve tuz kimyası disiplinlerin birlikte meydana getirdiği çoklu-fizik yaklaşımları, reaktör davranışının daha gerçekçi modellenmesini mümkün kılmaktadır (Wu et al., 2022). Çevrim entegrasyonu açısından ise, MSR'lerin süperkritik karbondioksit (sCO_2) Brayton çevrimiyle birleştirilmesi ile %45'in üzerinde verimlilik potansiyele sahiptir (Lee et al., 2023).

Politik boyutta, Rusya ve Çin'in mevcut yakıt tedarikindeki belirleyici bir rol üstlenmektedir, Avustralya'nın toryum rezervleri ve Hindistan'ın toryum döngüsü Ar-Ge çalışmaları ile birlikte küresel enerji güvenliği dinamiklerini yeniden şekillendirmektedir (Szulecki & Overland, 2023; IAEA, 2020). Nükleer silahsızlanma

kapsamında, MSR teknolojisinin yayılımı NPT çerçevesi ve IAEA denetim mekanizmalarıyla uyumlu bir şekilde geliştirilmelidir. Bu açıdan uluslararası iş birlikleri kritik öneme sahiptir. Euratom, GIF ve IAEA INPRO gibi oluşumlar, güvenlik standartlarının birbiri ile uyumla hale gelmesinde ve ortak yaklaşımların geliştirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir (Nuclear Energy Agency, 2022).

4. Sonuç

MSR'ler 1950'lerde ORNL'de gerçekleştirilen ARE ve ardından MSRE ile nükleer teknolojide yeni bir yaklaşım sunmuştur. Bu deneyler, sıvı yakıt çevrimi, düşük basınçta güvenli işletim ve negatif sıcaklık katsayıları gibi prensiplerin pratikte doğrulanmasını sağlamıştır (Bettis et al., 1957; Rosenthal et al., 1970). Günümüzde ise Çin'in TMSR-LF1 prototipi, Avrupa'daki SAMOFAR programı ve ABD'deki özel girişimler aracılığıyla daha geniş ölçekli, ticari ve sürdürülebilir reaktör tasarımlarına dönüşmektedir (Fan & Guo, 2024; Carter, et al., 2020).

MSR teknolojisinin modern araştırmalarda öne çıkan avantajları, yüksek güvenlikli pasif soğutma mekanizmaları, çevrimiçi yakıt işleme potansiyeli ve düşük atık üretimi gibi konularla sınırlı değildir. Bu konuların yanında hidrojen üretimi ve yüksek sıcaklık endüstriyel ısı uygulamalarıyla karbon nötr enerji sistemlerine katkı sağlamaktadır (Yüksel et al., 2023; Fox, et al., 2020). Bununla birlikte, zorluklar da hala devam etmektedir. Yüksek sıcaklıklarda korozyon, tuz kimyasının kontrolü, fisyon ürünlerinin uzaklaştırılması ve uzun vadeli malzeme testleri mühendislik açısından çözüm üretilmeyi bekleyen önemli konulardır (Young et al. 2018; Liu et al., 2023). Ayrıca, lisanslama süreçlerinde ise belirsizlikler hala devam etmektedir. Mevcut nükleer regülasyon çerçeveleri katı yakıtlı, PWR üzerine kurulu olduğundan, sıvı yakıtlı reaktörler için yeni standartların belirlenmesi gerekmektedir (Belles, 2018).

Enerji politikaları ve jeopolitik bağlamda ise MSR'ler stratejik bir konuma sahiptir. Enerji güvenliği açısından, yakıt çevriminde toryum kullanımı ve yerli kaynakların değerlendirilmesi, özellikle ithalata bağımlı ülkeler için önemli bir avantaj sağlamaktadır (Szulecki & Overland, 2023). Küresel ölçekte, COP26 ve COP28 gibi iklim zirvelerinde vurgulanan karbon nötr hedeflerle uyumlu olarak MSR'ler, yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı üretimini dengeleyebilecek güvenilir baz yük seçeneğidir (IEA, 2023).

Sonuç olarak, MSR'ler yalnızca bir enerji üretim teknolojisi gözüyle bakmak doğru değildir aynı zamanda küresel enerji dönüşümünün yapı taşı olma potansiyeline sahiptir. Ancak bu potansiyelin gerçeğe dönüşebilmesi için malzeme bilimi, tuz kimyası, lisanslama ve ekonomik uygulanabilirlik alanlarında daha fazla araştırma ve uluslararası iş birliği zorunlu bir ihtiyaçtır. Böylelikle, tarihsel deneylerden modern prototiplere uzanan bu teknoloji, sürdürülebilir nükleer enerjinin geleceğinde kritik bir rol üstlenecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest
Yazar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedir./ The author has no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding
Yazar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir./ The author declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review
Dış bağımsız/Externally peer-reviewed.

Yazar Katkıları/Author Contributions: Concept/Tasarım-MY.; Dizayn/Design-MY; Denetleme/Supervision-MY; Kaynaklar/Resources-MY; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation-MY; Literatür Taraması/Literature Search-MY; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript-MY; Eleştirel İnceleme/Critical Review-MY.

Kaynakça

Abou-Jaoude, A. (2023). Literature review of advanced reactor cost estimates. Idaho National Laboratory.

Alang, I., & Rashid, M. D. (2024). Sustainable Electricity Generation Using Molten Salt Nuclear Reactors (MSR). Universiti Teknologi Malaysia: Pagoh, Malaysia.

Allibert, M., Merle, E., Delpech, S., Gerardin, D., Heuer, D., Laureau, A., & Moreau, S. (2020). Preliminary proliferation study of the molten salt fast reactor. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 6, 5.

Andrews, H. B., Ballinger, R., & Bragg-Sitton, S. (2021). Review of molten salt reactor off-gas management considerations. Nuclear Engineering and Design, 382, 111315.

Barré, B., Anzieu, P., Lenain, R., & Thomas, J. B. (2016). Nuclear Reactor Systems. EDP Sciences.

Beils, S., Gérardin, D., Uggenti, A. C., Carpignano, A., Dulla, S., Merle, E., Heuer, D., & Allibert, M. (2019). Application of the lines of defence method to the molten salt fast reactor in the framework of the SAMOFAR project. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 5, 18.

Belles, R., Flanagan, G. F., Holcomb, D. E., & Poore III, W. P. (2018). A safety and licensing roadmap to identify the research and development gaps of commercial molten salt reactors (No. ORNL/TM-2018/944). Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States).

Bettis, E. S., Cottrell, W. B., Mann, E. R., Meem, J. L., & Whitman, G. D. (1957). The aircraft reactor experiment—operation. Nucl. Sci. Eng, 2(6), 841-853.

Bettis, E. S., Schroeder, R. W., Cristy, G. A., Savage, H. W., Affel, R. G., & Hemphill, L. F. (1957). The aircraft reactor experiment—design and construction. Nucl. Sci. Eng, 2(6), 804-825.

Carter, J. P., Heidet, F., O'Grady, D., & Hu, R. (2020). Integral molten salt reactor temperature sensitivities using a surrogate model. Nuclear Engineering and Design, 365, 110728.

Cherp, A., & Jewell, J. (2014). The concept of energy security: Beyond the four As. Energy Policy, 75, 415–421.

Davidson, A. J. (2022). The role of nuclear energy in the global energy transition. Oxford Institute for Energy Studies.

Delpech, M., Anzieu, P., Heuer, D., Laureau, A., & Merle-Lucotte, E. (2009). Reactor physics and reprocessing scheme for innovative molten salt reactor system. Journal of Fluorine Chemistry, 130(11), 1117–1123.

Fallah Vostakola, M., Asadi Amirabedin, S., & Akbarzadeh, M. (2023). Recent advances in high-temperature steam electrolysis for green hydrogen production using SOECs. Energies, 16(8), 3327.

Fan, Z. H. A. N. G., & Bolong, G. U. O. (2024). Molten Salt Reactor Technology: Progress, Challenges, and Prospects. Southern energy construction.

Fox, E. B., Colon-Mercado, H., Gorensek, M. B., & Thompson, A. B. (2020). Hybrid electrical/thermal hydrogen production process integrated with a molten salt reactor nuclear power plant. Savannah River National Laboratory.

Hu, M., Yang, X., Wang, X., Liu, H., Su, X., & Zhou, X. (2024). Effect of Te on the corrosion behavior of GH3535 alloy in molten LiF-NaF-KF salt. Corrosion Science, 227, 111761.

Huo, Y., Zhang, L., Ma, X., & Yue, Y. (2022). Evaporation behaviour of ^{233}Pa in FLiBeZr molten salt during vacuum distillation. RSC Advances, 12(17), 10371–10381.

IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)

Ignatiev, V. V., Kormilitsyn, M. V., Kormilitsyna, L. A., Semchenkov, Y. M., Fedorov, Y. S., Feinberg, O. S., ... & Khaperskaya, A. V. (2019). Molten-salt reactor for nuclear fuel cycle closure on all actinides. Atomic Energy, 125(5), 279-283.

Jenet, A., Beneš, O., Bøgh, S. A., Capelli, E., Caverzan, A., Ferguson, N., Holcomb, D. E., Ivanov, E., Krepel, J., Marchand, O., Martin, A., Maurer, P., Nilsson, K.-F., Pantalos, N., Paviet-Hartmann, P., Perez-Medina, M., Pyy, P. T., Rose, M. A., Smith, A., ...Taucer, F., (2024). Molten salt reactor technologies : putting science into standards, Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2760/49425.

Jyothi, R. K., et al. (2023). An overview of thorium as a prospective natural resource for sustainable energy. Frontiers in Energy Research, 11, 1132611.

Leandro, A. M., Heidet, F., Hu, R., & Brown, N. R. (2019). Thermal hydraulic model of the molten salt reactor experiment with the NEAMS system analysis module. Annals of Nuclear Energy, 126, 59-67.

LeBlanc, D. (2010). Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. Nuclear Engineering and Design, 240(6), 1644–1656.

Lee, W., Lee, S., & Park, J. (2023). Design considerations of the supercritical CO_2 Brayton cycle for a molten salt reactor system. Progress in Nuclear Energy, 159, 104475.

Liu, Q., Liu, X., Hao, G., & Xu, H. (2023). Effect of O2-additive on the corrosion behavior of Hastelloy N alloy in molten FLiNaK. Corrosion Science, 213, 111001.

Magnusson, J., Memmott, M., & Munro, T. (2020). Review of thermophysical property methods applied to fueled and un-fueled molten salts. Annals of Nuclear Energy, 146, 107608.

Mignacca, B., & Locatelli, G. (2020). Economics and finance of molten salt reactors. Progress in Nuclear Energy, 118, 103140.

Park, J., Lee, S. Y., & Lee, I. B. (2019). Study of alternative reactor–separator network in bunsen process of sulfur-iodine cycle for hydrogen production. Journal of Chemical Engineering of Japan, 52(7), 638-649.

Rosenthal, M. W. (1972). The development status of molten-salt breeder reactors (ORNL-4812). Oak Ridge National Laboratory. https://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-4812.pdf

Rosenthal, M. W., Briggs, R. B., & Kasten, P. R. (1970). Foreword: The Status and Technology of Molten-Salt Reactors—A Review of Molten-Salt Reactor Work at the Oak Ridge National Laboratory. Nuclear Applications and Technology, 8(2), 106-106.

Rybin, N., Fedorov, M., & Volkov, A. (2024). Thermophysical properties of molten FLiNaK: MD assessment. Journal of Molecular Liquids, 405, 123456.

Schneider, M., & Froggatt, A. (2023). The world nuclear industry status report 2023. Mycle Schneider Consulting

Serp, J., Allibert, M., Beneš, O., Delpech, S., Feynberg, O., Ghetta, V., ... & Zhimin, D. (2014). The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives. Progress in Nuclear Energy, 77, 308-319.

Szulecki, K., & Overland, I. (2023). Russian nuclear energy diplomacy and its implications for energy security in the context of the war in Ukraine. Nature Energy, 8(4), 413-421.

Walker, S. A. (2023). Depletion-driven thermochemistry of molten salt reactors. Frontiers in Nuclear Engineering, 1, 1214727.

Wang, Y., Sridharan, K., & Couet, A. (2021). Method for identification of redox control parameters for corrosion mitigation in molten fluoride salts. Journal of Nuclear Materials, 543, 152624.

World Nuclear Association. (2024, June). Uranium enrichment. World Nuclear Association. https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment

World Nuclear Association. (2024, June). USA: Nuclear fuel cycle. World Nuclear Association. https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-fuel-cycle

World Nuclear Association. (2025, 23 Oct). Nuclear Fuel Cycle Overview. https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview (world-nuclear.org)

Wu, J., Chen, J., Cai, X., Zou, C., Yu, C., Cui, Y., ... & Zhao, H. (2022). A review of molten salt reactor multi-physics coupling models and development prospects. Energies, 15(21), 8296.

Wulandari, C., Pretorius, G., & Droste, B. (2023). Neutronic design performance of 100 MWe MSR with Th-U(enriched) and Th-Pu-MA fuel. Nuclear Engineering and Design, 398, 111938.

Young, G., Hackett, M. J., & Sham, T. L. (2018). Materials Challenges for Molten Salt Reactors. Proceedings of the Canadian Nuclear Society.