

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Kuazarlar, merkezlerindeki süper kütleli karadeliğin yüksek verimli yığılma diskleri aracılığıyla ürettikleri güçlü ışınım sayesinde, karadeliğin büyümesinin ve kuazar popülasyonunun kozmik zaman boyunca evriminin anlaşılmasını sağlamaktadır.

Soltan (1982) tarafından ortaya konulan argüman kuazarların yaydığı toplam lüminosite ve süper kütleli karadeliklere doğrudan yığılan madde ile kazandığı kütle arasında doğrudan bir ilişki kurmaktadır. Bu ilişki şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\rho_{yığılma} c^2 = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \rho_{bol}$$

Bu ilişki, kuazar aktivitesi ile süper kütleli karadeliğin büyümesinin kozmik evrimini birlikte incelemeye olanak sağlar.

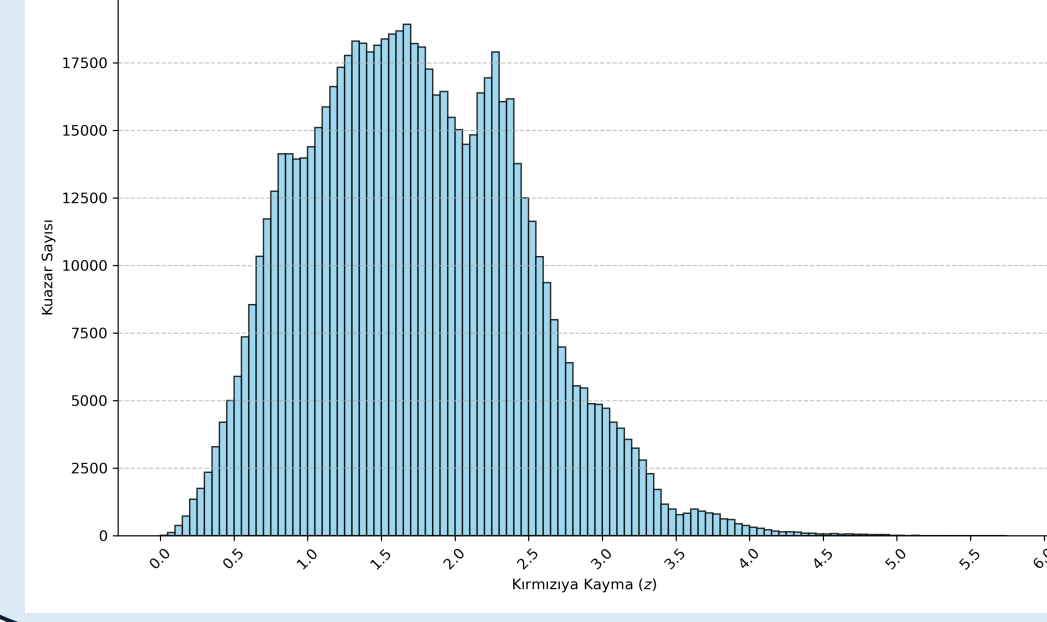
Bu çalışmada, SDSS DR16Q kataloğu ve Planck18 kozmolojik parametreleri kullanılarak $0 \leq z \leq 5.62$ aralığında kuazarların parlaklık ve süper kütleli karadeliğin kütle dağılımlarının kozmolojik evrimi incelenmiştir. Bu dağılımlar kullanılarak ρ_N , ρ_L , ρ_M ve $\dot{\rho}_{BH}$ 'nin kırmızıya kaymaya bağlı evrimi belirlenmiş ve sonuçlar süper kütleli karadeliğin kozmik büyümesi çerçevesinde değerlendirilmiştir.

2. VERİ SETİ ve ÖRNEKLEM SEÇİMİ

Çalışma kapsamında SDSS DR16Q kataloğu Lyke vd. (2020) temel alınarak Wu & Shen (2022) tarafından hazırlanan 750 414 kuazar verisi başlangıç örnekleme olarak kullanılmıştır. Fiziksel olarak anlamlı ve güvenilir alt örneklem oluşturulması için yapılan adımlar şunlardır:

- Fiziksel olarak anlamsız ölçümlere sahip kaynaklar örneklemden çıkarılmıştır. $\log L_{bol} = 0$ olan 172 kaynak, $\log L_{BH} = 0$ olan 3970 kaynak ve $Z_{FIT} < 0$ olan kaynaklar katalogdan temizlenmiştir.
- İkinci aşamada, ölçüm belirsizlikleri üzerinden 3σ eşik değeri uygulanmıştır. Bolometrik lüminosite ve karadeliğin kütlesi hata değerleri 3σ 'nın üzerinde olan kaynaklar örneklemden çıkarılmıştır.
- Son olarak mutlak parlaklık hesaplamalarında SDSS kataloğunda verilen hazır M_i değerleri doğrudan kullanılmıştır. Bunun yerine katalogdaki PSFMAG içerisindeki i bandı görünür parlaklıkları üzerinde (Richards vd., 2006) K düzeltmeleri uygulanmıştır. Bu sayede Planck18 kozmolojik parametreleri altında M_i değerleri yeniden düzenlenmiştir.

Uygulanan tüm bu fiziksel ve istatistiksel filtreleme adımları sonucunda, kuazar uzay sayısı yoğunluğu, bolometrik lüminosite yoğunluğu, yığılma yoğunluğu ve süper kütleli karadeliğin kütle yoğunluğunun hesaplanması için kullanılmak üzere yüksek güvenilirliğe sahip 743 132 kuazardan oluşan nihai veri seti elde edilmiştir.



Nihai olarak elde edilen 743 132 kuazarın sayısı dağılımını göstermektedir. Örneklemdeki kuazarların en yüksek popülasyon yoğunluğunun $z \sim 1.5-2.5$ aralığında yer aldığı görülmektedir. Daha yüksek kırmızıya kayma değerlerine gidildikçe gözlenen kuazar sayısı belirgin bir şekilde azalmaktadır.

3. YÖNTEM

① K – Düzeltmesi

$$M_i(z=2) = m_i - 5 \log_{10} \left(\frac{D_L}{10 \text{ pc}} \right) - K_i(z) + 2.5 \log_{10}(z, 2)$$

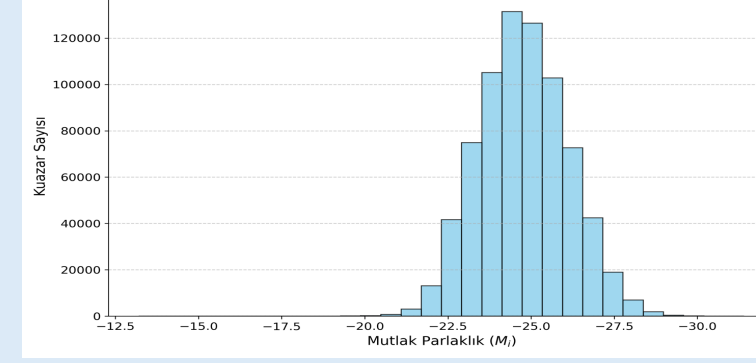
Planck 2018 parametreleriyle (D_L) ve Richards vd. (2006) tarafından sunulan K – düzeltmeleri uygulanarak her bir Kuazar için $z = 2$ 'ye K – düzeltilmiş i - bandı mutlak parlaklıkları yeniden elde edilmiştir.

② Gökyüzü Alan Düzeltmesi

$$\frac{\Delta\Omega}{4\pi} = \frac{\Omega_{gözlem}}{\Omega_{tüm}} = \frac{9720 \text{ deg}^2}{41253 \text{ deg}^2} \approx 0.2356$$

RA ve DEC dağılımından etkin SDSS gözlem alanı $\Omega \approx 9720 \text{ deg}^2$ olarak belirlenmiştir..

③ Parlaklık Limiti Analizi



K - düzeltmesi uygulanarak $z = 2$ referans sistemine dönüştürülen mutlak parlaklık M_i dağılımını göstermektedir. $i_{lim} = 24.0 \text{ mag} \rightarrow @ z_{max,i}$ hesabında kullanılmıştır.

④ $1/V_{max}$ Yöntemi

Schmidt (1968)

$$V_{max,i} = \left(\frac{\Omega}{4\pi} \right) \int_{z_{min}}^{\min(z_{max}, z_{max,i})} \frac{dV}{dz} dz \Rightarrow \rho_N = \sum_i \frac{1}{V_{max,i}}$$

$z_{max,i}$: M_i sabit tutularak $m_{lim} = 24.0 \text{ mag}$ için hesaplanan maksimum kırmızıya kayma.

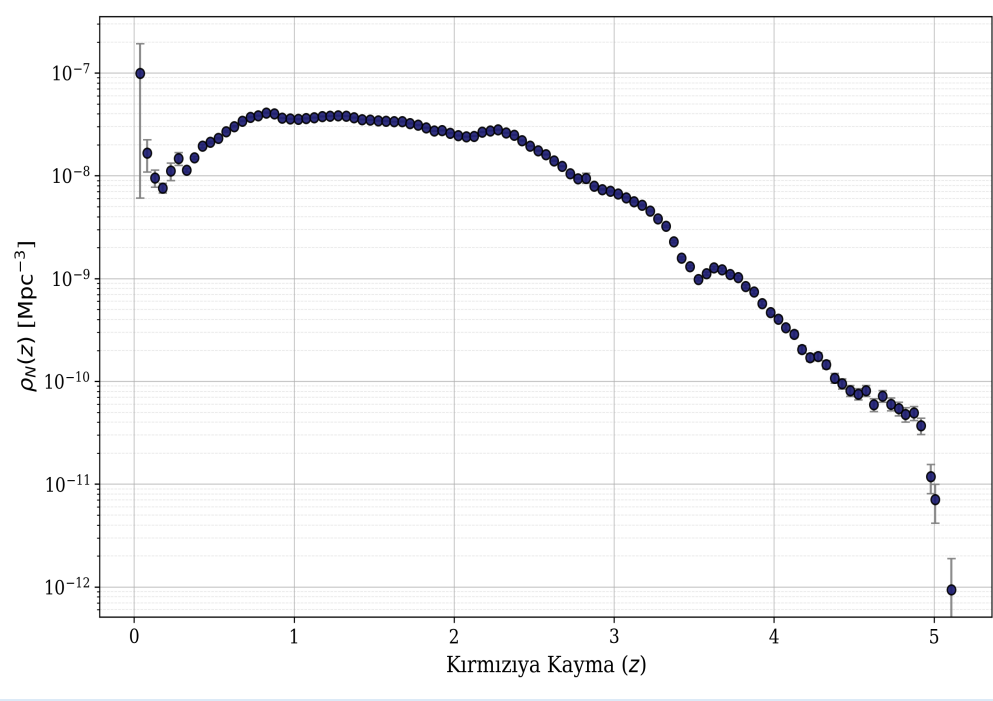
V_{max} :Maksimum gözlenebilir hacim, SDSS gökyüzü alanı $\Omega/4\pi$ ile düzeltilmiştir.

$$\rho_N = \sum_i \frac{1}{V_{max,i}}$$

Akı limiti kaynaklı seçim etkileri düzeltilerek kuazar uzay sayısı yoğunluğu elde edilmiştir.

4. BULGULAR

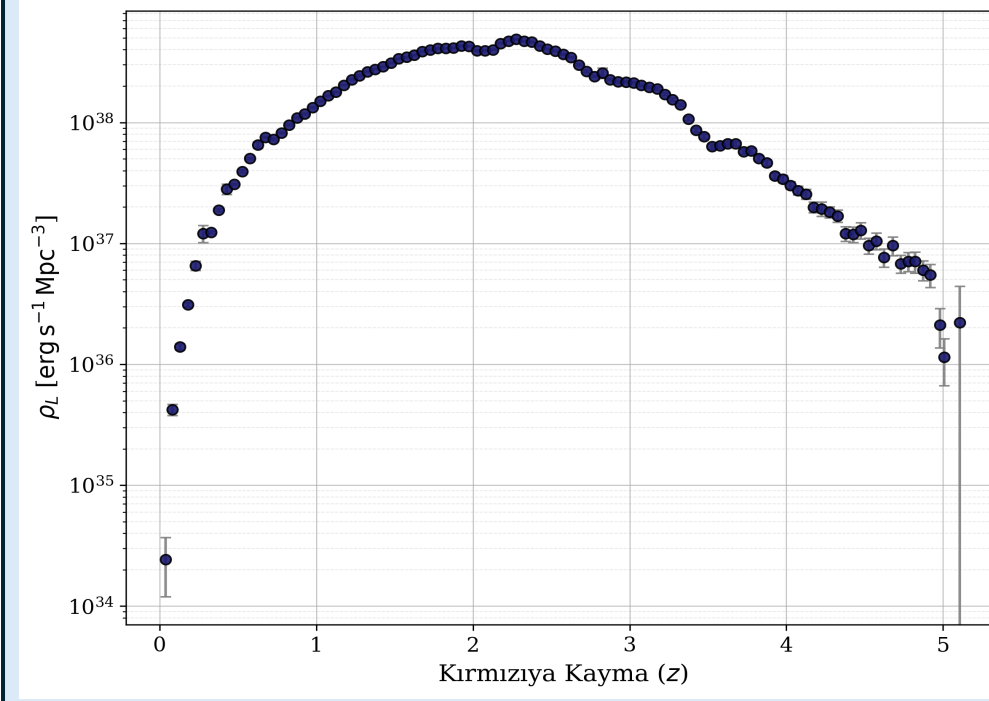
Kuazar Sayı Yoğunluğu ρ_N



$$\rho_N(z) = \sum_i \frac{1}{V_{max,i}}$$

$1/V_{max}$ yöntemi kullanılarak elde edilen akı limiti düzeltilmiş kuazar sayısı yoğunluğunun kırmızıya bağlı değişimini göstermektedir. $z \sim 1.5 - 2.5$ aralığında maksimum uzay sayısı yoğunluğu görülmektedir.

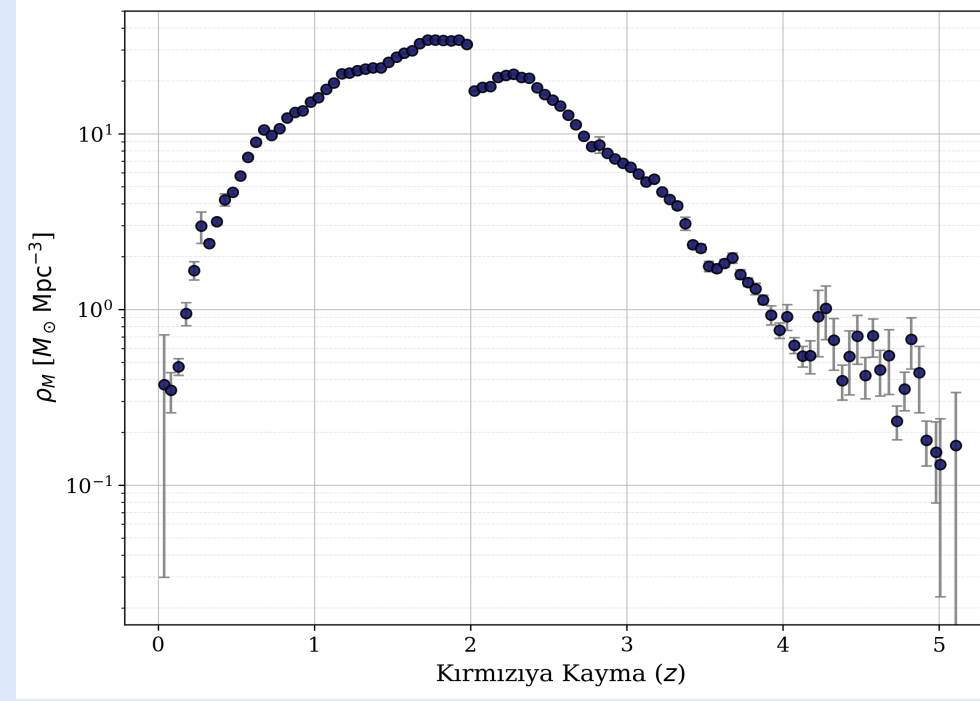
Kuazar Lüminosite Yoğunluğu ρ_L



$$\rho_L = \sum_i \frac{L_i}{V_{max,i}}$$

Kırmızıya kaymanın (z) bir fonksiyonu olarak ρ_L kuazar bolometrik lüminosite yoğunluğunun evrimi gösterilmiştir. Işıma yoğunluğu, kuazar aktivitesinin zirve yaptığı $z \sim 2.0 - 2.5$ aralığında tepe noktasına ulaşmaktadır.

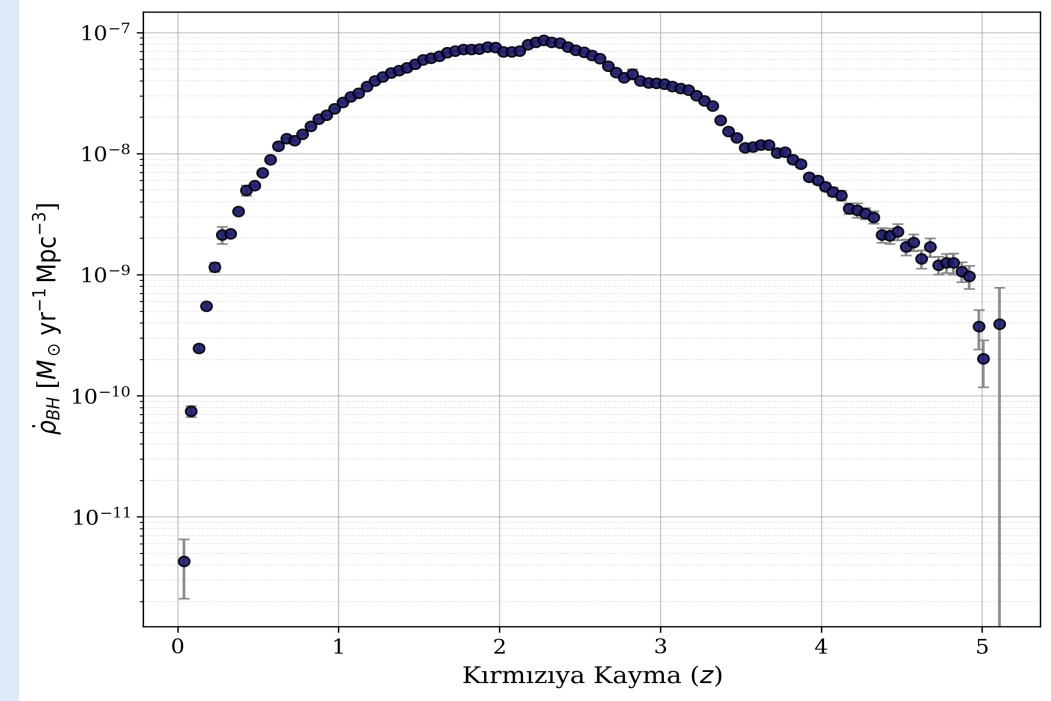
Kuazar Kütle Yoğunluğu ρ_M



$$\rho_{M(KD)} = \sum_i \frac{M(KD)_i}{V_{max,i}}$$

Kırmızıya kaymanın bir fonksiyonu olarak kuazar kütle yoğunluğunun evrimini göstermektedir.

Kuazar Yığılma Yoğunluğu $\dot{\rho}_{BH}$



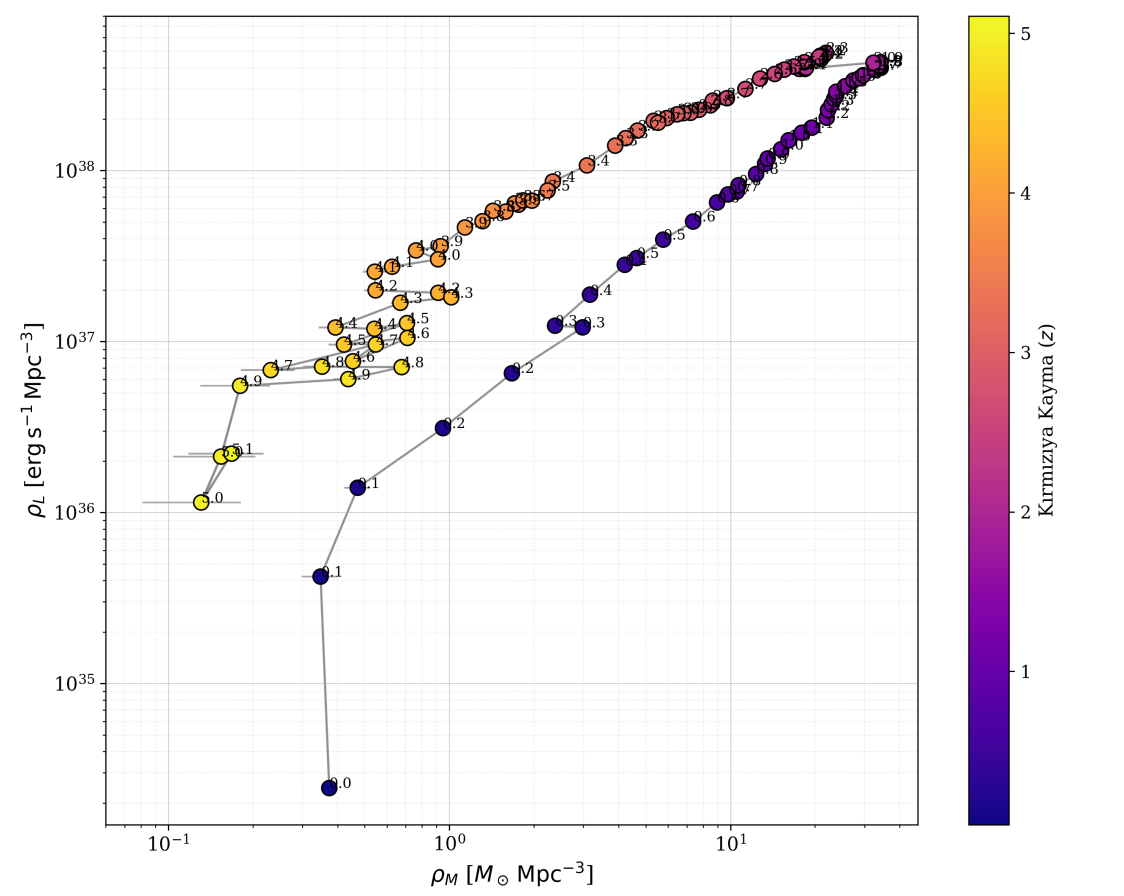
$$L_{bol} = \eta \dot{M} c^2, \quad \lambda_{Edd} = L_{bol} / L_{Edd}$$

$$\dot{\rho}_{BH} = \sum_i \frac{\dot{M}_i}{V_{max,i}}$$

Kozmik zaman içinde süper kütleli karadeliğin kütle yığılma oranı yoğunluğunun $\dot{\rho}_{BH}$ evrimini temsil etmektedir.

5. SONUÇLAR

Süper Kütleli Karadeliğin Evrim Yolu (Growth Track)



- Kuazarların merkezindeki süper kütleli karadeliğin, yığılma süreçleri ile ışımaya yaparlar, Yığılma süreçleri aynı zamanda karadeliğin kütlesinde artışa neden olur. Dolayısıyla yığılma hem lüminosite değişimine hem de kütle değişimine doğrudan etkiyen bir faktördür. Bulgular kısmındaki dört büyüklük birlikte değerlendirildiğinde, aktif süper kütleli karadeliğin kozmik zaman boyunca nasıl oluştuğuna ve büyüdüğüne dair tutarlı bir resim ortaya çıkmaktadır.
 - Sayı yoğunluğu ρ_N ve bolometrik lüminosite yoğunluğunun ρ_L $z \sim 2$ civarında maksimuma ulaşması, evrenin 2-3 Gyr yaşındaki döneminin aktif kuazar dönemi olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, Marconi vd. (2004) ve Shankar vd. (2009) tarafından rapor edilen SMBH büyümesinin en yoğun olduğu kozmik dönem ile örtüşmektedir.
 - Yüksek z düşük kütle ve düşük ışımaya rejiminden başlayan evrim, $z \sim 2$ 'de maksimum ışımaya ve büyüme verimliliğine ulaşmaktadır.
 - Düşük kırmızıya kaymalarda kütle yoğunluğu korunmasına rağmen lüminosite yoğunluğunun keskin biçimde azalması; büyük kütleli SMBH'lerin büyümelerini erken dönemde tamamladığını ve günümüzde sönümlenen beslenme rejimine geçtiğini ortaya koymaktadır.
 - SMBH büyümesi tekdüze değildir; erken evrede hızlı inşa, $z \sim 2$ tepe yığılma aktivitesi ve günümüzde doğru sönümlenen beslenme dinamiği ile karakterize edilir.
 - Elde edilen bulgular, diferansiyel Soltan yaklaşımını temel alan literatür çalışmalarıyla iyi bir uyum göstermektedir.
- ρ_N , ρ_L , ρ_M ve $\dot{\rho}_{BH}$ birlikte değerlendirildiğinde, aktif SMBH büyümesinin tekdüze bir süreç olmadığı; bunun yerine erken evrende hızlı bir inşa evresi, orta kırmızıya kaymalarda maksimum akresyon aktivitesi ve düşük kırmızıya kaymalarda giderek sönümlenen bir beslenme rejimi ile karakterize edilen çok aşamalı bir kozmik evrim izlediği sonucuna ulaşılmaktadır.

