TÜBİTAK

Egzotik Hadronların Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 115F183

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Kazem AZİZİ

Araştırmacı(lar):
Doç. Dr.
Hayriye SUNDU PAMUK
Doç. Dr.
Yasemin SARAÇ

Bursiyer(ler):
Dr. Ulaş ÖZDEM
Birten BARSBAY

KASIM 2018
İSTANBUL

ÖNSÖZ

TÜBİTAK tarafından desteklenen 115F183 numaralı bu proje; egzotik parçacıkların iç yapılarının ve onların kuantum sayılarının belirlenmesinde uluslararası düzeyde önemli rol oynamıştır. Proje zamanlama olarak tam zamanında verilmiş olup proje esnasında bir çok yeni egzotik parçacık keşfedilmiştir. Grubumuz bu yeni keşiflere anında reaksiyon gösterip deneyle paralel hareket ederek yeni bulunan parçacıkların doğası ve iç kuark-gluon yapılarının belirlenmesine önemli katkılar sunmuştur. Proje kapsamında yapılan çalışmalar uluslararası düzeyde yapılan bir çok teorik çalışmaya da yol göstermiştir. Bulunan sonuçların, LHCb, Belle, Fermilab, PANDA ve BES III gibi dünya çapında önemli hadron fiziği laboratuvarlarında egzotik parçacıklarla ilgili gelecekte yapılmaları planlanan deneylere ışık tutacağına inanılmaktadır. Bu proje kapsamında yapılan 31 adet çalışma (28 tanesi alanının en prestijli dergilerinde yayınlanmıştır diğer üçü ise hakem değerlendirme aşamasındadır), egzotik parçacıklar alanında ülke ve dünya bilimine önemli katkılar sunmuştur. Bu sebeple, 115F183 numaralı proje kapsamında, desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
2. LİTARATÜR ÖZETİ 3
3. GEREÇ - YÖNTEM 16
3.1 Borel Dönüşümü 24
4. BULGULAR 26
4.1 Egzotik Parçacıkların Spektroskopik Parametreleri ve Güçlü Bozunumları ... 26
4.2 Egzotik Parçacıkların Elektromanyetik Özellikleri / Zayıf ve Yarı - Leptonik Bozunumları 73
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 88
KAYNAKLAR 92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. m_{X_b} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 27
Şekil 2. f_{X_b} bozunma sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı..... 27
Şekil 3. Sol: m_Λ kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_Λ kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 28
Şekil 4. Sol: λ_Λ rezidü değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: λ_Λ rezidü değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 28
Şekil 5. (a) tan2φ, (b) m_f ve (c) $m_{\acute{f}}$ kütle değerlerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı 29
Şekil 6. Sol: $J^P = \frac{5^+}{2}$ pentakuark için farklı sabit süreklilik parametresi s_0 değerlerinde kütlenin Borel parametresi M^2 ile değişimi. Sağ: $J^P = \frac{5^+}{2}$ pentakuark için farklı sabit süreklilik parametresi s_0 değerlerinde rezidü değerinin Borel parametresi M^2 ile değişimi 31
Şekil 7. Sol: $J^P = \frac{5^+}{2}$ pentakuark için farklı sabit Borel parametresi M^2 değerlerinde kütlenin süreklilik eşiği s_0 parametresi ile değişimi. Sağ: $J^P = \frac{5^+}{2}$ pentakuark için farklı sabit Borel parametresi M^2 değerlerinde rezidü değerinin süreklilik eşiği s_0 parametresi ile değişimi... 31
Şekil 8. Sol: $J^P=\frac{5^+}{2}$ pentaquark için kütlenin cosθ'ya bağımlılığını gösteren grafik. Sağ: $J^P=\frac{5^-}{2}$ pentaquark için kütlenin cosθ'ya bağımlılığını gösteren grafik 34
Şekil 9. Sol: $J^P=\frac{5^+}{2}$ pentakuark için kütlenin Borel parametresi M^2 ile değişimini gösteren grafik. Sağ: $J^P=\frac{5^-}{2}$ pentakuark için kütlenin Borel parametresi M^2 ile değişimini gösteren grafik..... 34
Şekil 10. Sol: $J^P=\frac{5^+}{2}$ pentakuark için rezidü değerinin Borel parametresi M^2 ile değişimini gösteren grafik. Sağ: $J^P=\frac{5^-}{2}$ pentakuark için rezidü değerinin Borel parametresi M^2 ile değişimini gösteren grafik 35
Şekil 11. Sol: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki pozitif pariteli muhtemel pentakuark durumunun kütlesinin farklı Borel parametresi M^2 değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı. Sağ: $\boldsymbol{\Xi_c^*\overline{K}}$ moleküler yapıdaki negatif pariteli muhtemel pentakuar durumunun kütlesinin farklı Borel parametresi M^2 değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.....36
Şekil 12. Sol: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki pozitif pariteli muhtemel pentakuark durumunun kütlesinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı. Sağ: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki negatif pariteli muhtemel pentakuar durumunun kütlesinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı..... 36

Şekil 13. Sol: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki pozitif pariteli muhtemel pentakuark durumunun rezidü değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı. Sağ: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki negatif pariteli muhtemel pentakuar durumunun rezidü değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 37
Şekil 14. $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki pozitif pariteli muhtemel pentakuark durumunun rezidü değerinin farklı Borel parametresi M^2 değerlerinde süreklilik eşiği s^0'a bağımlılığı. Sağ: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki negatif pariteli muhtemel pentakuar durumunun rezidü değerinin farklı Borel parametresi M^2 değerlerinde süreklilik eşiği s^0'a bağımlılığı 37
Şekil 15. m_{Z_c} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 39
Şekil 16. f_{Z_c} bozunma sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı. 39
Şekil 17. $g_{X_bB_s\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 41
Şekil 18. $g_{X_bB_s\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0'a bağımlılığı 41
Şekil 19: m_{X_b} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 43
Şekil 20: f_{X_b} bozunma sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 43
Şekil 21. $G_{X_bX_b\rho}$ güçlü kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 44
Şekil 22. $G_{X_cX_c\rho}$ güçlü kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 45
Şekil 23. m_{X_b} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2' ye bağımlılığı 46
Şekil 24. f_{X_b} mezon-akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı..... 46
Şekil 25. $g_{X_bB_s^*\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 47
Şekil 26. $g_{X_bB_s\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 47
Şekil 27. Sol: m_{Z_q} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{Z_q} mezon-akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlığı 48
Şekil 28. Sol: m_{Z_s} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{Z_s} mezon-akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı 48

Şekil 29. Sol: $g_{Z_qB_c\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{Z_qB_c\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 49
Şekil 30. Sol: $g_{Z_qB_c\eta}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{Z_qB_c\eta}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 49
Şekil 31. Sol: $g_{Z_sB_c\eta}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{Z_sB_c\eta}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 50
Şekil 32. Sol: m_{Z_q} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{Z_q} mezon-akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı..... 51
Şekil 33. Sol: $g_{Z_qB_c\rho}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{Z_qB_c\rho}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 52
Şekil 34. Sol: $m_{x(4140)}$ kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $m_{x(4140)}$ kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 53
Şekil 35. Sol: $f_{x(4140)}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $f_{x(4140)}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 53
Şekil 36. Sol: $m_{x(4274)}$ kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $m_{x(4274)}$ kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı. 54
Şekil 37. Sol: $f_{x(4274)}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $f_{x(4274)}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 54
Şekil 38. Sol: $g_{X(4140)}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{X(4274)}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı 55
Şekil 39. Sol: m_{Z_b} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_{Z_b} kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 57

Şekil 40. Sol: f_{Z_b} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{Z_b} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 57
Şekil 41. Sol: m_{Z_s} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_{Z_s} kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 58
Şekil 42. Sol: f_{Z_s} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{Z_s} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 59
Şekil 43. Sol: $m_{Z_{AV}}$ kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $m_{Z_{AV}}$ kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 59
Şekil 44. Sol: $f_{Z_{AV}}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $f_{Z_{AV}}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 59
Şekil 45. Sol: m_{a_1} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_{a_1} kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 61
Şekil 46. Sol: f_{a_1} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{a_1} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 61
Şekil 47. Sol: $g_{\acute{f}KK}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{\acute{f}KK}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 62
Şekil 48. Sol: m_{a_0} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_{a_0} kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 63
Şekil 49. Sol: f_{a_0} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{a_0} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 64
Şekil 50. Sol: $g_{a\eta\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ:$g_{a\eta\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 65
Şekil 51: Sol: m_Y kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_Y kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 66
Şekil 52: Sol: f_Y mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_Y mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 66

Şekil 53. Sol: g_1 değerinin diğer yardımcı parametrelerin merkezi değeri alındığında Borel parametresi M^2'ye göre değişimi. Sağ: $g_1$değerinin diğer yardımcı parametrelerin merkezi değeri alındığında Borel parametresi M^2'ye göre değişimi 68
Şekil 54. Sol: $\tilde{g}_1$ değerinin diğer yardımcı parametrelerin merkezi değeri alındığında Borel parametresi M^2'ye göre değişimi. Sağ: $\tilde{g}_1$değerinin diğer yardımcı parametrelerin merkezi değeri alındığında Borel parametresi M^2'ye göre değişimi 68
Şekil 55. Şekil 55. Sol: m_T kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_T kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 70
Şekil 56. Sol: f_T mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_T mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 70
Şekil 57. Sabit Q^2 =4 ve s_0 (s_0, s_0') orta nokta değerinde güçlü kuplaj form faktörü $G_s(Q^2)$ nin $M^2(M_1^2, M_2^2)$ Borel kütle parametrelerine bağlılığı 72
Şekil 58. $G_s(Q^2)$ güçlü kuplaj form faktörün Q^2 ye göre davranışı 72
Şekil 59. $Z_c(3900)$ parçacığının ikili ve dörtlü momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı 74
Şekil 60. $Z_b(10610)$ parçacığının ikili manyetik momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. 75
Şekil 61. Z_{cq} parçacığının ikili ve dörtlü manyetik momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı 78
Şekil 62. Z_{cq} parçacıklarının ikili ve dörtlü momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı 79
Şekil 63. $P_c^+(4380)$ parçacığının ikili manyetik, dörtlü elektrik ve sekizli manyetik momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı 81
Şekil 64. P_{cs} parçacıklarının ikili manyetik manyetik momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı..... 83
Şekil 65. G_1 form faktörün q^2 = 4 GeV de M_1^2 ve M_2^2 Borel kütle parametrelerine bağlılığı 84
Şekil 66. G_1 form faktörün q^2 ye göre davranışı 85
Şekil 67. Sol: $T_{bb;\bar{u}\bar{d}}^-$ durumunun kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $T_{bb;\bar{u}\bar{d}}^-$ durumunun kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı 86
Şekil 68. Sol: $Z_{bc;\bar{u}\bar{d}}^0$ durumunun kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $Z_{bc;\bar{u}\bar{d}}^0$ durumunun kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı. 87

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. X(5568) parçacığının kütle ve bozunma sabiti değerleri 27
Tablo 2. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde elde edilen fiziksel sonuçlar 30
Tablo 3. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde pentakuarklar için elde edilen kütle ve rezidü sonuçları 32
Tablo 4. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde alt kuark içeren pentakuarklar için elde edilen kütle ve rezidü sonuçları 35
Tablo 5. KRD toplam kuralları hesaplarından olası pentakuark durumları için elde edilen kütle ve rezidü sonuçları 38
Tablo 6. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $\boldsymbol{X_b(5568) \longrightarrow B_s^0 \pi^+}$ bozunumuna ait güçlü çiftlenim sabiti ve bozunma genişliği 41
Tablo 7. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $\boldsymbol{X_c}$ parçacığına ait fiziksel sonuçlar 42
Tablo 8. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde X_b parçacığına ait fiziksel sonuçlar 44
Tablo 9. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Z_q ve Z_s parçacıklarına ait fiziksel sonuçlar 49
Tablo 10. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_q \rightarrow B_c\pi$, $Z_q \rightarrow B_c\eta$ ve $Z_s \rightarrow B_c\eta$ geçişlerine ait fiziksel sonuçlar 50
Tablo 11. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Z_q ve Z_s parçacıklarına ait fiziksel sonuçlar 51
Tablo 12. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_q \rightarrow B_c\rho$ ve $Z_s \rightarrow B_c\varphi$ geçişlerine ait fiziksel sonuçlar 52
Tablo 13. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde X(4140) ve X(4274) parçacıklarına ait fiziksel sonuçlar 54
Tablo 14. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_c(3900)$ ve Z(4430) parçacıklarına ait fiziksel sonuçlar 55
Tablo 15. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_c(3900) \rightarrow J/\psi\pi;\ \psi'\pi;\ \eta_c\rho$ ve $Z(4430) \rightarrow \psi'\pi; J/\psi\pi;\ \eta_c'\rho;\ \eta_c\rho$ geçişlerine ait fiziksel sonuçlar 56
Tablo 16. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_b(10610)$ parçacığına ait fiziksel sonuçlar 57
Tablo 17. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_b \rightarrow \Upsilon(nS)\pi$, n = 1, 2, 3 geçişlerine ait fiziksel sonuçlar 58
Tablo 18. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Z_s, Z_{PS} ve Z_{AV} durumlarına ait fiziksel sonuçlar 60
Tablo 19. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Z_s, Z_{PS} ve Z_{AV} durumlarına ait fiziksel sonuçlar 60
Tablo 20. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $a_1(1420) \rightarrow K^{*\pm}K^{\mp}, K^{*0}\overline{K}^0$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar 62
Tablo 21. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $f_0(500) \rightarrow \pi\pi$, $f_0(980) \rightarrow \pi\pi$ ve $f_0(980) \rightarrow K\overline{K}$ ve $K_0^*(800)) \rightarrow K^0\pi^0$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar 63

Tablo 22. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $a_0(980)$ and $K_0^*(800)$ mezonlarına ait fiziksel sonuçlar 64
Tablo 23. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $a_0(980) \rightarrow \eta\pi$, $a_0(980) \rightarrow K\overline{K}$, $K_0^*(800)) \rightarrow K^+\pi^-$ ve $K_0^*(800)) \rightarrow K^0\pi^0$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar 65
Tablo 24. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Y(4660) parçacığına ait fiziksel sonuçlar 66
Tablo 25. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Y(4660) parçacığının $J/\psi f_0(980)$, $\psi(2S)f_0(980)$ ve $J/\psi f_0(500)$, $\psi(2S)f_0(500)$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar 67
Tablo 26. Güçlü çiftlenim sabitleri için değerler 68
Tablo 27. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $T_{cc;\bar{s}\bar{s}}^{++}$ ve $T_{cc;\bar{d}\bar{s}}^{++}$ durumlarına ait fiziksel sonuçlar 70
Tablo 28. Form faktörlerin fit fonksiyonunda bulunan parameter değerleri 71
Tablo 29. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $TT_{cc;\bar{s}\bar{s}}^{++} \rightarrow D_s^+ D_{s0}^{*+}(2317)$ ve $TT_{cc;\bar{d}\bar{s}}^{++} \rightarrow D^+ D_{s0}^{*+}(2317)$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar 72
Tablo 30. Z_{cq} parçacıklarının ikili ve dörtlü momentlerinin sayısal değerleri 75
Tablo 31. $P_c^+(4380)$ parçacığının ikili manyetik, dörtlü elektrik ve sekizli manyetik momentlerinin sayısal değerleri 80
Tablo 32. P_{cs} parçacıklarının ikili manyetik ve dörtlü elektrik momentleri değerleri 82
Tablo 33. Form faktörlerin fit fonksiyonunda bulunan parametre değerleri 85
Tablo 34. Farklı lepton kanallarında bozunum genişliğinin nümerik değerleri 86
Tablo 35. Farklı lepton kanallarında bozunum genişliğinin nümerik değerleri 87

EGZOTİK HADRONLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Güçlü etkileşen kuark ve gluonlardan oluşan standart hadronlar, baryonlar ve mezonlardır. Bu etkileşmelerin alan teorisi, Kuantum Renk Dinamiği (KRD) dir. Bu yapılara ek olarak, son yıllarda, çeşitli kuark ve gluon kombinasyonlarından oluşabilecek parçacıklar olabileceği öne sürülmüş ve bazıları deneylerde gözlemlenmiştir. Bu yapılar genel olarak XYZ parçacıkları, hybridler, mezon molekülleri, dörtkuarklar ve beşkuarklar gibi egzotikler olarak bilinmektedir. Projenin temel amacı, bu tür parçacıkların fiziksel özelliklerini incelemek olmuştur.

Proje kapsamında, egzotik parçacıkların spektroskopik özellikleri ile onların güçlü, elektromanyetik ve zayıf geçiş kanalları incelenmiş olup sonuçlar var olan deney dataları ile kıyaslanmıştır. Proje süresince, zaman zaman, Fermilab, LHCb, Belle gibi dünya çapında önemli laboratuvarlar tarafından yeni parçacıklar keşfedilmiş, grubumuz bu keşiflere reaksiyon gösterip yeni parçacıkların iç kuark-gluon organizasyonu ve kuantum sayılarını belirlemeye çalışmıştır. Bazen deneylerde bakılmaları için çeşitli öngörülerde de bulunulmuştur. Çalışmalarımız deneylerle yakın ilişki içerisinde olup, bazı deney sonuçlarına ışık tutmuştur. Örneğin, X(5568) parçacığı, hesaplarımız esnasında Fermilab tarafından keşfedilmiştir. Çalışmalarına daha önce başladığımızdan, bu parçacık ilk olarak grubumuz tarafından teorik olarak incelenmiş olup, kuantum sayıları belirlenip ona kimlik verilmiştir. Proje kapsamında yapılan kütle ve rezidü hesapları ve egzotik parçacıkların elektromanyetik, zayıf ve güçlü bozunum incelemeleri teorik literatüre katkı sağlamanın yanı sıra çeşitli deney sonuçlarının yorumlanmasında kullanılmıştır. İlgili parçacıkların özelliklerinin incelenmesi sonucu, iç yapıları ve kuantum sayıları belirlenip onlara kimlik verilmiştir.

Hadronların bozunum özelliklerini temsil eden yapı faktörlerini hesaplamak için pertürbatif olmayan yöntemler gerekmektedir. Bu yöntemlerin en güvenilir ve uygulanabilirlerinden birisi KRD toplam kurallarıdır. Proje kapsamında yapılan çalışmalarda bu yöntem egzotik parçacıklara genişletilerek kullanılmıştır.

Proje kapsamında 31 adet çalışma gerçekleştirilmiştir: 28 tanesi alanının saygın dergilerinde yayımlanmış olup üçü ise hakem değerlendirmesindedir. Proje kapsamında genç bilim insanları da yetiştirilmiştir. Bir yüksek lisans öğrencisi tezini bitirip doktora eğitimine başlamıştır. Bir doktora sonrası araştırmacı ise proje konusunda uzmanlaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: Egzotik Parçacıklar; KRD Toplam Kuralları; Güçlü, Elektromanyetik ve Zayıf Bozunumlar

INVESTIGATION OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF EXOTIC HADRONES

ABSTRACT

The standard hadrons, made of the strongly interacting quarks and gluons, are mesons and baryons. There have been proposed particles having configurations out of the standard hadrons and some of them have been observed in experiments. These are exotic particles including XYZ particles, hybrids, meson molecules, tetraquarks, pentaquarks etc. The main objective of this project is investigation of physical properties of these particles.

Within this project, the spectroscopy and decays of the exotics have been investigated and the results have been compared with the existing experimental data. During this time, important laboratories like Fermilab, LHCb and Belle have announced some new discoveries that our group has responded and has tried to understand the internal organizations of these particles and fix their quantum numbers. We have been in close relations with experiments; some of our predictions have later been tested in experiments. For instance, we were working on the particle X(5568) that Fermilab announced its discovery. We were the first theory group that determined its properties. The studies on exotic states have made good contributions to theory and have shed light to analyses of the experimental data. The studies on exotic states have helped us determine their nature, fix their quantum numbers and give them identity cards.

The decays of hadrons are defined in terms of some form factors, for calculations of which some non-perturbative methods are needed. One of the reliable and applicable tools in this respect is QCD sum rule formalism. Within this project we have extended this method to exotic states and used it in our analyses.

Within this project we have published 28 papers in reputable journals and 3 papers are under evaluations. Young scientists were also trained: A graduate student completed her thesis and continues her PhD. A post-doctoral researcher was specialized in this field.

Keywords: Exotic Particles; QCD Sum Rules; Strong, Electromagnetic and Weak Decays.

1. GİRİŞ

Standart Model elektrozayıf ve güçlü etkileşimlerin ayar teorisidir. Bu etkileşimler ayar bozonları sayesinde mümkün olmaktadır. Zayıf etkileşimler $W^{\pm}$ ve Z^0 aracılığıyla, elektromanyetik etkileşimler foton aracılığıyla ve güçlü etkileşimler ise gluonlar aracılığıyla gerçekleşmektedir. Elektrozayıf etkileşimlerin doğası Standart Model çerçevesinde açıklanabiliyor iken güçlü etkileşimlerin hesaplanması kolay değildir. Kuantum Renk Dinamiği (KRD) güçlü etkileşimlerin teorisidir ve kuarkların gluonlar aracılığıyla etkileşimlerini açıklar. KRD renormalize edilebilen abeliyan olmayan bir kuantum alan teorisidir. Abeliyan olmayan doğasından dolayı teori bazı yeni özelliklere sahiptir. KRD'de diğer etkileşimlerde olmayan yeni bir kuantum sayısı vardır ve bu kuantum sayısı renk olarak tanımlanır. Bu yeni kuantum sayısı KRD'de diğer etkileşimlerden farklı olarak iki yeni özellik ortaya çıkarır. Bu yeni özelliklerden biri asimptotik özgürlük diğeri ise hapsolma durumudur. Asimptotik özgürlük, kuarklar arası etkileşimlerin minimum olduğu durumdur. Bu durumda kuarklar, serbest parçacık gibi davranırlar. Diğer bir ifade ile asimptotik özgürlük çok küçük mesafelerde kuarkların serbest parçacık gibi davrandığını söyler. Hapsolma ise kuarkların tek başlarına gözlemlenememesine neden olur. Dolaysıyla, yüksek enerjilerde veya kısa mesafelerde kuarklar serbest parçacıklar gibi davranır ve, bu yüzden, bu bölgelerde tedirgeme teorisi ile güvenilir hesaplamalar yapılabilir. Fakat düşük enerjilerde veya uzun mesafelerde kuark-gluon çiftlenim sabitinin büyük olmasından dolayı yani kuarklar arası etkileşimler çok büyük olduğundan pertürbatif olmayan etkiler söz konusu olur. Bu bölgede pertürbatif olmayan yaklaşımlara ihtiyaç duyulur. Pertürbatif olmayan yöntemlere birkaç örnek; Örgü (Lattice) KRD, KRD Toplam Kuralları, Kiral Tedirgeme Teorisi (ChPT), Ağır Kuark Etkin Teori (HQET) ve Kuark model olarak verilir. Her yöntemin avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, Örgü KRD modeli oldukça iyi bir model olmasına rağmen bilgisayarların hesaplama gücü ile sınırlıdır. Kiral Tedirgeme Teorisi pion ve kaon sistemlerinde oldukça güvenilir sonuçlar vermektedir. Ağır kuark etkin teori $b \to c$ kuark geçişlerinde gayet iyi çalışmasına rağmen $b \to u$ geçişlerinde güvenilir sonuçlar vermeyebilir. Kuark model özellikle ağır kuarklarda oldukça iyi çalışmaktadır, bunun yanında hafif kuarklı sistemlerde kısmi başarılar elde edilmiştir. Bu modelde, kuarklar arasında bir potansiyel olduğu kabul edilir ve bu potansiyel kullanılarak Schrödinger denklemi çözülür. Her ne kadar çoğu sistem için başarılı bir şekilde kullanılmış olsa da KRD ile doğrudan ilişki kurmakta sorunlar oluşmaktadır. Özellikle renk hapsi terimini KRD'den hesaplamanın bir yolu henüz mevcut değildir. Diğer bir yaklaşım KRD Toplam Kurallarıdır.

KRD Toplam Kuralları Shifman, Vainstein ve Zakharov tarafından 1970'li yılların sonlarında geliştirilmiştir. KRD Toplam Kuralları KRD Lagranjiyenini temel alan ve hadronların özelliklerini araştırmada kullanılan güçlü, kullanışlı ve güvenilir bir yöntemdir. KRD Toplam Kurallarında hadronlar ara kesit akımları ile ifade edilir. Bu akımlar daha sonra işlemci çarpım açılımı yardımı ile hesaplanır. Burada kısa ve uzun mesafe kuark-gluon etkileşimleri ayırt

edilir. Daha önce pertürbatif KRD ile hesaplanan nicelikler daha sonra vakum yoğuşmaları veya dağılım genlikleri cinsinden tanımlanır. KRD sonuçları dispersiyon bağıntısı yolu ile elde edilen hadron durumları üzerinden toplam alınarak eşitlenir. Böylece istenen hadronik parametre için toplam kuralları elde edilmiş olur. KRD Toplam Kuralları kullanılarak kütle hesabı, leptonik bozunum sabiti gibi basit hesaplamalar veya bunlardan daha karmaşık yapıda olan hadronik dalga fonksiyonu, hadron çokluları arasındaki çiftlenim sabitleri ve zayıf ve elektromanyetik geçişleri temsil eden yapı faktörleri hesaplamaları yapılabilir. Uzun yıllardır, bu yöntem ile yapılan çalışmaların sonuçlarının ve öngörülerinin deneysel verilerle oldukça uyum içinde olduğu görülmüştür. Bu projede KRD toplam kuralları grubumuz tarafından egzotik ve çok kuarklı sistemler için genişletilip kullanılmıştır.

Proje başvurusu esnasında belirtiğimiz gibi, son yıllarda, standart hadronlara ek olarak çeşitli kuark ve gluon kombinasyonlarından oluşabilecek farklı yapıda parçacıklar olabileceği öne sürülmüş ve bunlardan bazıları deneyde gözlemlenmiştir. Bu yapılar genel olarak dört-kuark (tetrakuark), beş-kuark (pentakuark), mezon molekülleri, dibaryonlar, mezon-baryon molekülleri, glueball'lar, hybridler, vb. gibi egzotik parçacıklar olarak bilinmektedir. Bu projenin temel amacı; SM'de önemli başarılar sergileyen KRD toplam kurallarını genişletip onu çoklu-kuark sistemlerine ve farklı yapıdaki parçacıklara uygulayıp, bu tür parçacıkların spektroskopik özellikleri (kütle, bozunum sabiti, vb.) ile bu parçacıkların güçlü, elektromanyetik ve zayıf geçiş kanallarının incelenmesidir. Parçacıklara ait kütle ve bozunum sabiti hesaplarında iki nokta KRD toplam kuralları, geçiş kanallarının incelenmesinde ise Işık Koni KRD ve üç nokta KRD toplam kuralları kullanılmıştır.

Proje kapsamındaki çalışmalarımız, yapılan deneyleri ve teorik literatürü yakından takip edip bu alandaki gelişmelere önemli katkılar sunmuştur. Projemiz zamanlama açısından oldukça etkili bir dönemde önerilmiş olup, ilki 2003'te bulunan (dört-kuark X(3872)) egzotik parçacık adaylarının bazıları projemiz döneminde dünyanın LHCb, Belle, BESIII ve Fermilab gibi önemli laboratuvarları tarafından gözlemlenmiştir. Grubumuz hadron fiziğindeki geçmiş tecrübesine dayanarak bu yeni keşiflere anında tepki verip bazı yeni parçacıkların, örneğin Fermilab'taki D0 işbirliği tarafından 2016 da gözlemlenen ve dört farklı kuark çeşnisinden oluşabilecek X(5568) dörtkuarkı, fiziksel özelliklerini belirleyen ilk teorik ve fenomenolojik grup olmuştur. Yeni parçacıkların spektroskopik özelliklerinin yanı sıra onların güçlü, zayıf ve elektromanyetik bozunum kanallarını temsil eden güçlü çiftlenim sabitleri ve yapı faktörleri tam KRD teorisinde hesaplanarak onların doğası ve iç kuark-gluon organizasyonu hakkında önemli bilgiler edinilmeye çalışılmıştır. Ekibimiz tarafından, çeşitli hesaplamalar sonucu, yeni bulunan parçacıkların kuantum sayılarını sabitlemeye çalışılıp onlara "kimlik" verilmiştir. Bu incelemeler yeni bulunan parçacıkların iç yapısı ve doğasının yanı sıra kuantum renk dinamiğinin perturbatif ve perturbatif olmayan yönleri hakkında da önemli bilgiler verip gelecek deneylerine ışık tutacaktır.

Proje kapsamında ayrıca, var olabilecek bir çok parçacıkta önerilmiştir. Özellikle çeşitli spin-parity'ye sahip, mezon molekülü veya dörtkuark yapılı parçacıklar önerilmiştir. Bu parçacıkların hem kütle hesabı yapılmış, hem de onların olası baskın güçlü, zayıf ve elektromanyetik bozunum kanalları incelenerek genlikleri bulunup gelecek deneylerde araştırılmaları için önerilmişlerdir. Proje kapsamında yapılan çalışmalar gelecek deneylerinde ölçülebilecek bir çok parametre içermektedir. Bu açıdan sonuçlarımızın gelecek deneylerine de ışık tutacağına ve elde edilen veri analizlerine yardım edeceğine inanmaktayız. Proje kapsamında 31 adet çalışma yapılmış olup bunların 28 tanesi parçacık ve hadron fiziği alanındaki dünyanın en saygın dergilerinde yayınlanmıştır. Diğer 3 adedi ise çeşitli dergilerde hakem değerlendirmesi aşamasındadır. Bunun yanı sıra proje konularında genç bilim insanı da yetiştirilmiştir. Projenin sonuç ve çıktıları aynı zamanda grubumuzu ve ülkemizi egzotik parçacıklar alanında dünyaya tanıtmış olup bu alanda söz sahibi grup ve ülkeler arasına koymuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Parçacık Fiziği Standart Modelinin bir parçası olan Kuark Model, bugüne kadar gözlenmiş hemen hemen tüm hadronları başarılı bir şekilde sınıflandırmaktadır. Hadronları; mezonlar (kuark-antikuark çifti) ve baryonlar (üç kuark) ya da anti-baryonlar (üç antikuark) olarak iki aileye ayıran ve az sayıda kuarkın çeşitli kombinasyonları şeklinde karşılaşılan çok sayıda hadronu başarılı bir şekilde açıklayan bu model yardımıyla parçacıkların kuantum sayıları (yük, spin, izospin, acayiplik, vb.) iyi bir şekilde hesaplanmıştır. Güçlü etkileşimlerin temel teorisi olarak kabul edilen Kuantum Renk Dinamiği (KRD), geleneksel kuark modelinde yer almayan hadron durumlarının varlığını yasaklamamakta, aksine basit baryon ve mezonlardan farklı olarak daha zengin bir hadron spektrumunu öngörmektedir. Kuark modelinin dışında var olan bu hadronlara egzotik hadron (dörtkuarklar, beşkuarklar, dibaryonlar, mezon molekülleri, mezon-baryon molekülleri, hibritler, gluontopları (glueballs) vb. ismi verilmektedir (Chow, 1995; Kleiv, 2014; Huang vd., 2011; Wang, 2014; Esposito vd., 2016). Özellikle 1977 yılında Jaffe'nin kuark-torba (quark-bag) modelinde di-mezon ve di-baryon durumları hakkındaki çalışmalarından sonra çoklu kuark durumlarının varlığı birçok yaklaşım aracılığıyla incelenmiştir (Chow, 1995; Jaffe, 1997a, 1997b, 1997c). Bu tip egzotik parçacıklarla ilgili olarak yapılan deneysel ve teorik çalışmalar son yılların oldukça ilgi çekici ve aktif alanı haline gelmiştir. Çünkü geleneksel kuark model ötesindeki hadron durumlarının keşfi evrende yer alan maddeyi bağlayan güçlü kuvvet hakkındaki bilgilerin genişletilmesini sağlayacak ve KRD'nin pertürbatif olmayan dinamikleri üzerine ışık tutacaktır (Jaffe, 1997a, 1997b, 1997c; Ma, 2014). Çoklu kuark konfigürasyonlarını içeren egzotik hadronlar ile ilgili literatürde yer alan teorik ve deneysel çalışmalar aşağı açıklanmıştır.

Dörtkuarklar (tetrakuarklar); bir kuark çifti (di-kuark) ve onun rengini nötralize eden bir antikuark (anti-di-quark) çiftinden oluşan yapılardır. Bununla beraber iki mezonun bağlı durumları olarak tanımlanan mezon molekülleri de dörtkuarklar grubunda yer alır. Bu yapıyla ilgili, ilk kez 2003 yılında Belle deneyinde gözlemlenen X(3872) ismi verilen parçacığın bir dörtkuark adayı olduğu öne sürülmüştür (Harris, 2008). 2007 yılında Belle deneyi bir dörtkuark adayı olarak Z(4430)'un gözlemini duyurmuştur. 2014 yılında LHCb deneyi bu rezonansı doğrulamıştır (O'Luanaigh, 2014; Aaij, 2014). Aynı zamanda dörtkuark yapısında olan Y(4260) egzotik parçacığı ilk olarak BaBar deneyi tarafından gözlemlenmiş, Belle ve CLEO tarafından da doğrulanmıştır (Aubert, 2005a; Belle, 2006; Coan, 2006). 2013 yılında ise BESIII deneyinde $Z_c^+(3900)$, $Z_c^+(4025)$, $Z_c^+(4020)$ ve $Z_c^+(3885)$ parçacıklarının gözlemlenmesi çoklu kuark durumlarının varlığını desteklemektedir (Ablikim, 2013a, 2014a, 2014b; Coito, 2016). Bunlara ek olarak dörtkuark yapıdaki X(5568) egzotik parçacığının 25.02.2016 tarihinde D0 iş birliği tarafından gözlemlendiği rapor edilmiştir (Ablikim, 2014b). Bu parçacığı diğer gözlemlenen egzotik X parçacıklarından ayıran en önemli özelliği, bir ağır ve üç hafif kuark (b, u, d, s) olmak üzere dört farklı kuark çeşnisinden olmasıdır. Ancak kısa bir süre sonra LHCb tarafından X(5568) parçacığının var oluşunun onaylanmadığı bildirilmiştir (Abazov, 2016). İki deney grubu arasındaki bu belirsizlikten dolayı parçacığın teorik olarak daha detaylı incelenmesi önem kazanmıştır. Bunların yanı sıra son on yıl içinde Belle, BaBar, CLEO-c, D0, LHCb ve BESIII deneylerinde pek çok çarmonyum ve botomonyum durumları gözlemlenmiştir. Bunlar, genelde XYZ durumları olarak ifade edilirler (LHCb, 2016). Literatürde dörtkuark durumları ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir: Yapılan bir çalışmada, $ud\overline{ss}$ dörtkuark kütlesi çeşitli akımlar kullanılarak Borel kütlesinin karesinin bir fonksiyonu olarak çizdirilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır (Chen vd., 2006). KRD toplam kuralları kullanılarak $ud\overline{ss}$ dörtkuark kütlesinin yaklaşık olarak 1,5 GeV mertebesinde beklendiği belirtilmiştir. Yine KRD toplam kuralları ile yapılan diğer bir çalışmada, deneysel olarak keşfedilen X(3872), Z(4430), $Z_2(4250)$ parçacıklarının muhtemel yapılarının incelendiği görülmektedir (Lee vd., 2008). Yapılan bu çalışmada X(3872) parçacığının D^*D molekül durumu olduğu, Z(4430) parçacığının D^*D_1 molekül durumu olduğu ve $Z_2(4250)$ parçacığının D_1D molekül durumu olduğu şeklinde yorumlarda bulunulmuştur. Farklı bir çalışmada KRD spektral toplam kuralı kullanılmış ve X(3872) durumu için dörtkuark $(c\overline{c}q\overline{q})$ yorumu yapılarak kütle ve bozunum sabiti değerleri hesaplanmıştır (Matheus vd., 2007). KRD toplam kurallarının kullanıldığı bir diğer çalışmada, D_sD^* molekül durumunun kütlesi hesaplanmış ve bu kütle X(3872) durumuna yakın bulunduğundan bu parçacık molekül olarak yorumlanmıştır (Lee vd, 2009a). Ayrıca bulunan kütle değerinin X(3940) ve Z(3930) durumlarına da yakın olduğundan bahsedilmiştir. Yine

aynı çalışmada X(3940) durumunun $D^*\bar{D}$ molekül yapısı olduğu, Z(3930) durumunun ise $D\bar{D}$ molekül yapısı olduğu yorumuna rastlanmaktadır. Çalışmanın devamında ise, deneysel olarak elde edilmiş veri ile uyumlu olarak X(3872) durumu için kütle değeri $m_X = (3,88 \pm 0,06)$ GeV olarak hesaplanmıştır. $Z^+(4430)$ durumunun olası yapıları hakkında yorumlara yer verilerek KRD toplam kuralları ile bu durumun kütle hesaplamaları yapılmıştır (Bracco vd., 2009). Bu bağlamda $J^P = 0^-$ 'li akımlar için $m_Z = (4,52 \pm 0,09)$ GeV ve rezidü $\lambda_{Z_{(0^-)}} = (3,75 \pm 0,48) \times 10^{-2}$ GeV^5 ve $J^P = 1^-$ 'li akımlar için $m_Z = (4,84 \pm 0,14)$ GeV ve rezidü $\lambda_{Z_{(1^-)}} = (8,36 \pm 0,85) \times 10^{-5}$ GeV^5 değerleri bulunmuş ve bu durum molekül olarak yorumlanmıştır. Ayrıca $Z^+(4430)$ durumu için $D^*\bar{D}_1$ molekül yapısı olduğu hakkında yorumlara rastlanırken, bu durumun dörtkuark olarak yorumlandığı görülmektedir (Bracco vd., 2009; Meng vd., 2007; Rosner, 2007; Maiani vd., 2007; Gershtein vd., 2007). Yapılan bir çalışmada KRD toplam kuralları yöntemi ile hesaplamalar yapılmıştır (Lee vd., 2009b). $m_{D^*D^*} = (4,15 \pm 0,12)\,\mathrm{GeV}$ ve rezidü $\lambda_{Z_1} = (4,20 \pm 0,96) \times 10^{-2}$ GeV^5 olarak bulunmuş ve $Z_1^+(4050)$ olarak yorumlanmıştır. Yine bu çalışmada $m_{D_1D} = (4,19 \pm 0,22)$ GeV ve rezidü $\lambda_{Z_2} = (1,88 \pm 0,77) \times 10^{-2}$ GeV^5 şeklinde hesaplanarak mümkün $Z_2(4250)$ durumu şeklinde düşünülmüştür. Farklı bir çalışmada ise $D_{s_0}^+(2317)$ ve X(3872) durumları incelenmiş ve bu durumlar dörtkuark mezon olarak yorumlanmıştır (Terasaki, 2011). KRD Laplace toplam kuralları yöntemi kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada X(3872) ve $Y_b(10890)$ durumları $J^{PC} = 1^{++}$ dörtkuark durumu olarak yorumlanmıştır (Kleiv vd., 2013). Yine bu çalışmada elde edilen sonuçların $Z_b(10610)$ ve $Z_b(10650)$ durumları için dörtkuark yorumunu güçlendirdiği söylenmektedir. Ayrıca X(3872)'nin (Close vd., 2004; Voloshin, 2004; Swanson, 2004;Tornqvist, 2004; Alfiky vd., 2006; Thomas vd., 2008; Liu vd., 2009; Lee vd., 2009)'de dörtkuark molekül durumu olarak düşünüldüğü; farklı bir çalışmada ise dörtkuark durumu olarak öngörüldüğü görülmektedir (Maiani vd., 2005; Ebert vd., 2006; Terasaki, 2007; Dubnicka vd., 2010). Ayrıca KRD toplam kuralları yöntemi kullanılarak mümkün bazı dörtkuark durumları için kütle hesaplamaları yapıldığı görülmektedir (Chen vd., 2014a). Y(4660), X(3872), $Z_c(3900)$ ve $Z_c(4025)$ durumunun dörtkuark olarak yorumlandığı yer almakta ve KRD toplam kuralları kullanılarak bazı dörtkuark sistemleri için kütle değerlerinin hesaplanmış olduğuna rastlanmaktadır (Chen vd., 2014b). 1^{--} $qc\bar{q}\bar{c}$ dörtkuark durumununun kütlesi $m_X = (4,64 \pm 0,09)$ GeV olarak ölçülmüş ve bulunan bu kütlenin Y(4660) durumu ile

uyumuna dikkat çekilmiştir. 1^{++} ve 1^{+-} $qc\overline{qc}$ dörtkuark durumu için bulunan değerlerin $Z_c(3900)$ ve $Z_c(4025)$ durumlarının dörtkuark olarak yorumlanmasını desteklediği yer almaktadır. Ek olarak; Y(4660) durumunun $sc\overline{sc}$ yapısı ile dörtkuark olarak yorumlandığı görülmektedir (Ebert vd., 2008; Albuquerque vd., 2009). Ayrıca $Z_c(4025)$ durumunun, $D^*\overline{D}^*$ molekülü ve $cu\overline{cd}$ dörtkuarkı olarak yorumlandığı görülmektedir (Chen vd., 2014c; He vd., 2013; Wang vd., 2014; Cui vd, 2013; Qiao vd., 2014). Bunun yanı sıra, KRD toplam kuralları yöntemleri ile $Z_c(4025)$ durumu için 4,04± 0,24 GeV kütle değeri, 4,04± 0,28 GeV kütle değeri ve $J^P = 1^-$ için 4,54± 0,20 GeV ve $J^P = 2^+$ için 4,04± 0,19 GeV kütle değerleri bulunmuştur (Chen vd., 2015; Wang, 2014). $Z_c(4200)$ durumunun doğasını belirlemek için bu durumun hadronik bozunumları $Z_c(4200)^+ \to J/\psi\pi^+$, $Z_c(4200)^+ \to \eta_c\rho^+$ ve bir çarmonyum benzeri dörtkuark olarak $Z_c(4200)^+ \to D^*\overline{D}^{*0}$ çalışılmıştır (Fabian vd., 2017). KRD toplam kurallarının kullanıldığı bu çalışmada bozunum genişlikleri ve bağlaşım sabitleri çıkartılmış ve tüm durumları içeren toplam bozunum genişliğinin Belle iş birliği tarafından bildirilen deneysel değer ile tutarlı olduğu söylenmiş, bu durumun $Z_c(4200)$'ün dörtkuark yorumunu desteklediği belirtilmiştir. KRD toplam kurallarının kullanıldığı bir diğer çalışmada $Z_c(4020)$ ve $Z_c(4025)$ durumlarının $J^{PC} = 0^{++}, 1^{+-}$ veya 2^{++} $D^*\overline{D}^*$ molekül durumunu, Y(4140) durumunun $J^{PC} = 0^{++}$ $D_s^*D_s^*$ molekül durumunu, $Z_b(10650)$ durumunun $J^{PC} = 1^{+-}$ $B^*\overline{B}^*$ molekül durumunu desteklediği; Y(3940) durumunun ise $(J^{PC} = 0^{++})$ molekül durumunu desteklemediği söylenmektedir (Wang, 2014). (Ma vd., 2014b)'de XYZ parçacıkların Işınımsal bozunumları araştırılmıştır. $Z_b(10610)$ ve $Z_b(10650)$ parçacıkların bazı bozunum kanalları final durum etkileşimi yardımıyla incelenmiş ve elde edilen sonuçların yakın zaman içinde deneysel olarak test edilebiliecekleri öngürüsü yapılmıştır (Xiao vd., 2017). $Z_c(3900)$, $Z_c(4430)$ ve $X_b(5568)$ parçacıklarının dörtlükuark yapısında olduğu varsayımı yapılarak güçlü bozunum kanalları incelenmiştir ve elde edilen sonuçların literatürde yer alan sonuçlar ile uyumlu olduğu yorumu yapılmıştır (Fabian vd., 2016). $Z_b(10610)$ ve $Z_b(10650)$ parçacıkların güçlü bozunumları moleküler akım kullanılarak kovaryant kuark model yardımıyla elde edilmiştir ve elde edilen sonuçlardan bazı bozunum kanallarının baskın olduğu gözlenmiştir (Fabian vd., 2017). $X_b(5568)$ ve onun tılsım (charm) kuark içeren partnerinin ikili manyetik momenti bu parçacıkların dörtlü kuark yapısında olduğu varsayımı yapılarak Işık konisi KRD Toplam Kuralları yöntemi yardımıyla elde edilmiştir ve elde edilen sonuçların ileriki deneylerde ölçülebilecek kadar büyük olduğu yorumu yapılmıştır (Agamaliev vd., 2017). (Chen vd., 2017a)'de yürütülen bir çalışmada KRD toplam kuralları kullanılarak $J^P = 0^+$, 1^+, 2^+, 0^- ve 1^- kuantum sayılarına sahip olası tüm açık çeşnili egzotik durumların sprektroskopik özellikleri

iki-kuark-ikiantikuark yapısı göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmıştır ve elde edilen sonuçların bazılarının BESIII, Belle II, PANDA vb. deney iş birlikleri tarafından araştırılması gerektiği önerisi yapılmıştır. $Z_c(3900)/Z_c(3885)$ parçacıklarının kökeni Y(4260) egzotik durumunun πJ/ψ-$\overline{D}$*D bozunum kanalları yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan $Z_c(3900)$ ve $Z_c(3885)$ aynı kökene sahip olduğu ve bu iki bozunum kanalı arasında D*D kanalının daha baskın olduğu gösterilmiştir (He vd., 2018). (Ikone vd., 2018)'de Bc mezonun semileptonik bozunumları incelenerek X(3930)(2^{++}), X(3940)(0^{++}) and X(4160)(2^{++}) parçacıklarının iç yapıları vektör-vektör etkileşimi yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlardan X(3930) ve X(3940) parçacıklarının $D^{*}\overline{D}^{*}$molekül yapısında olduğu görülmüştür. (Wang, 2017)'de $Z_c(3900)$ parçacığının $J^P = 1^{+-}$ kuantum sayılarına sahip bir dörtkuarklı yapıda olduğu varsayımı yapılarak ikili manyetik momenti KRD toplam kuralları yardımıyla elde edilmiştir ve elde edilen sonuçların ileriki deneysel çalışmalarda ölçülebilecek bir büyüklükte olduğu tespiti yapılmıştır. (Anwar vd., 2018)'da full-ağır kuark içeren olası dörtlü kuarkların spektroskopik özellikler etkin alan teorisi çerçevesinde incelenmiştir. En düşük bb $\overline{bb}$ durumunun kütlesinin 18.7 GeV mertesinde olması gerektiği sonucu öngörülmüştür. (Abreu vd., 2018)'de $Z_b(10610)$ parçacığının hadron gazı bulunan ortamda bozunum kanalları incelenmiştir ve bu ortam etkisinin bozunum kanallarına önemli etkisi olmadığı gösterilmiştir. (Karliner vd., 2017)'de full-ağır kuark içeren olası durumların spektroskopik özellikleri incelenmiştir. Bu olası durumların $J^P=0^{++}$ kuantum özelliklerine sahip olduğu varsayımı yapılarak cc$\overline{cc}$ durumları için 6.19 GeV ve bb$\overline{bb}$ durumlarının ise 18.82 GeV kütle mertebesinde olması gerektiği öngörülmüştür. (Xing vd., 2018)'de kararlı iki ağır kuark içeren dörtlü kuark durumlarının zayıf bozunumları Sakharov-Zeldovich formülü çerçevesinde incelenmiştir. Elde edilen iki-cisim ve üç-cisim bozunumlarının LHCb ve Belle II deney iş birliklerinde araştırılması gerektiği öngürüsünde bulunulmuştur. (Ali vd., 2018)'te dört hafif Y-egzotik durumunun kütle analizi etkin hamiltoniyen yaklaşımı çerçevesinde yapılmıştır. Bu çalışmada Y-durumlarının $J^P = 1^{--}$ kuantum sayılarına sahip olduğu ve iki-kuark-ikiantikuark içeriğin sahip olduğu düşünülmüştür. Elde edilen sonuçların ileriki deneysel çalışmalarda bulunabileceği öngörülmüştür. (Wang vd., 2018)'de iki tılsım içeren ağır dörtkuark durumlarının spektroskopik özellikleri KRD toplam kuralları yardımıyla elde etmiştir. Bu çalışmalarda skaler, aksiyal ve tensör kuark akımları kullanılmıştır ve elde edilen olası durumların ileriki deneysel çalışmalarda elde edilebileceği öngörülmüştür. (Ahmed vd., 2018)'de yürütülen çalışmada LHC'de keşfedilmesi olası olan dörtkuark durumları çalışılmıştır ve bu durumların güçlü bozunum durumlarında kararlı olacağı öngörülmektedir. Yürütülen bir başka çalışmada KRD toplam kuralları yöntemi kullanılarak full ağır kuark içeren dörtkuark yapıları çalışılmıştır. Bu çalışmada iki-kuark-ikianti-kuark çerçevesi düşünülmüş ve $J^{PC}= 0^{++}$, 0^{-+}, 0^{--}, 1^{+-}, 1^{-+},1^{--} ve 2^{++} kuantum sayıları içeren tüm durumlar

hesaba dahil edilmiştir. Ve çalışmanın sonucunda bazı bozunum kanallarının deney iş birlikleri tarafından araştırılması gerektiği öngörüsü sunulmuştur (Chen vd., 2017b) . Yürütülen bir başka çalışmada LHCb iş birliği tarafından keşfedilen Ξ_{cc} baryonundan esinlenerek iki alt kuark içeren T(bb$\overline{ud}$) ağır dörtkuark yapısı çalışılmıştır ve elde edilen durumun kütlesinin 10,389 GeV mertebesinde olacağını öngörmüşlerdir (Karliner vd., 2017). Yine bu çalışmada iki tılsım kuark içeren T(cc$\overline{ud}$) durumunun kutlesi 3,882 GeV olarak öngörülmüştür. (Liu vd., 2015)'te yürütülen son çalışmada ise qq$\overline{QQ}$ dört kuark durumları renk manyetik etkileşimi de hesaba dahil edilerek kütleleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda renk karışımın 0^+ durumuna katkısının önemli derecede olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra olası bozunum kanalların tartışılması yapılmıştır.

Beşkuarklar (pentakuarklar); dört kuark ve bir antikuarkın birleşmesinden ya da onların moleküler yapılarından oluşan atomaltı parçacıklardır. Beşkuarkların varlığı 1987 yılında Michal Praszatowicz tarafından öngörülmüştür (Jezabek vd., 1987). Beşkuark yapılardaki $P_c^+(4380)$ ve $P_c^+(4450)$ egzotik parçacıklarının 2015 yılında LHCb tarafından gözlemlendiği rapor edilmiştir (Aaij, 2015). Beşkuarklar ile ilgili yapılan teorik araştırmalar sonucunda ise; yapılan bir çalışmada KRD toplam kurallarından faydalanılarak $\theta_c(3250)$ beşkuarkın varlığının mümkünlüğü araştırılmıştır (Albuquerque vd., 2013). Aynı çalışmada dağılım ilişkisi tekniği ile (dispersion relation technique) olası beşkuark durumları için kütle hesapları yapıldığı görülmektedir. (Guo vd., 2016)'da yürütülen çalışmada X_{c1p} parçacığının etrafında oluşan üçgen anamolisinden dolayı kütle spektrumunda 4450 MeV mertebesinde bir pik oluşmuştur ve bu $P_c^+(4450)$ parçacığı olarak yorumlanmıştır. Yürütülen bir çalışmada $P_c^+(4450)$ beşkuarkının ve Y(4274) dörtkuark durumu moleküler durumu göz önüne alınarak kütle hesaplamaları quasipotential Bethe-Salpeter denklemi düşünülerek yürütülmüştür (He, 2017). Elde edilen sonuçların deneysel gözlemlerle uyumlu olduğu görülmüştür. (Eides vd., 2018)'de yürütülen çalışmada LHCb de keşfedilen beşkuark durumlarının QCD bazlı bir teori yaklaşımı ile ele alınarak standart baryonların uyarılmış durumları olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada $P_c^+(4380)$ beşkuarkı için uyumlu bir sonuç bulunamazken $P_c^+(4450)$ beşkuarkı için spin-$3/2^-$ durumu öngörülmüştür. Ve $P_c^+(4450)$ beşkuarkı için bazı bozunum kanalları önerilmiştir. (Huang vd., 2018)'de gizli-tılsımlı beşkuark yapısından esinlenerek gizli-garip beşkuark yapıları önerilmiş ve spektroskopik özellikleri çalışılmıştır ve bu çalışmalarda mezon-baryon moleküler yapısı düşünülmüştür. Elde edilen kütle sonuçlarından PDG'de yer alan $N^*(2100)$ parçacığının bir beşkuark adayı olacağı öngörüsü yapılmıştır. (Park vd., 2017)'te tılsım ve beauty kuark içeren olası beş kuark adaylarının spektroskopik özellikleri mezon-baryon molekülü yapısı düşünülürek çalışılmıştır ve elde edilen sonuçların deneysel olarak bulunabileceğini öngörülmüştür. (Jaffe, 1977)'te yürütülen çalışmada $P_c^+(4380)$

beşkuarkının renk-spin potansiyeli düşünülerek spektroskopik özellikleri çalışmıştır ve elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile uyumlu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, uyarılmış durumların kütlesi eşik durumlarının çok üzerinde elde edilmiştir.

Altıkuarklar (hegzakuarklar); altı kuarktan ya da onların moleküler yapılarından (di-baryonlar) oluşan varsayımsal parçacıklardır. Robert Jaffe 1997 yılında iki uds kuark yapılı hyperon birleştirerek kuark bileşimi udsuds olan olası kararlı H di-baryon varlığını önermiştir (Belz, 1996). Di-baryon bozunumlarını ve etkileşimlerini tespit etmek için deneyler öne sürülmüş, 1990'larda bazı aday di-baryon bozunumları gözlemlenmiş ancak doğrulanmamıştır (Stotzer, 1997; Alavi-Harati, 2000; Adlarson, 2014). 2014 yılında Almanya'da bulunan ve polarize olmuş nötron-proton saçılımını çalışan COSY deneyinde di-baryon sisteminde yeni bir durum için yeni kanıt bulunmuştur. Altı valans kuark içeren bu yapı bir di-baryon oluşturur veya bir egzotik kompakt parçacık ya da hadronik molekül olabilir. 2800 MeV'lik bir kütle, 80 MeV'lik bozunum genişliği ve I (J^P) = 0 (3^+) kuantum sayılı yeni rezonans COSY deneyi tarafından yürütülen yüksek hassasiyetli ölçümlerde gözlemlenmiştir (Gerasyuta vd., 2011). Altıkuarklar ile ilgili yapılan teorik araştırmalar sonucunda ise; (Gerasyuta vd., 2012)'da yapılan çalışmada dağılım ilişkisi tekniği kullanılarak $q = u,d,\ Q = c,b$ olmak üzere $qqqqqQ$ durumu için olası 38 dibaryon kütle hesabı bulunmaktadır. Dağılım ilişkisi tekniğinin kullanıldığı bir çalışmada çeşitli dibaryon durumları için kütle hesabı yapılmıştır (Bashkanov vd., 2013). Ayrıca yine bu çalışmada Y(4630) durumunun $\Lambda_c\bar{\Lambda}_c$ molekül durumu olarak düşünüldüğünden bahsedilmektedir. $Z_c^+(4025)$ için mümkün bazı yorumlar olduğundan bahseden çalışmada; bu durumun dörtkuark ya da hadronik molekül olabileceği şeklindeki görüşler yer almaktadır (Yamaguchi vd., 2014). Ayrıca $\Delta\Delta$ dibaryonunun yine bu çalışmada incelendiği görülmektedir. Farklı bir çalışmada $\bar{D}^*NN$ ve $B^{(*)}NN$ dibaryonlarının rezonans durumlarının kütle spekturumu çalışılmıştır (Huang vd., 2014). $\Delta\Delta$ dibaryon adaylarının kütle ve bozunum genişliği hesaplamaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur (Gal vd., 2013). COSY iş birliği tarafından gözlemlenen $D_{03}(2370)$ durumunun $\Delta\Delta$ dibaryon adayı olarak gösterildiği görülmektedir (Khrykin, 2014). Yine bu çalışmada D_{12} durumunun $N\Delta$ dibaryon adayı olabileceği söylenmiştir. Diğer bir çalışmada ise $d_1^*(1956)$ dibaryonunun varlığı hakkında araştırmalar yapıldığı görülmektedir (Meyer vd., 2015).

Hibritler; kuark-antikuark çifti ve bir veya daha fazla gluondan meydana gelen yapılar hibrit mezon, üç kuark ve gluondan meydana gelen yapılar ise hibrit baryon olarak adlandırılır. $J^{PC} = 1^{-+}$ olan π (1400), π (1600) ve π (2015) egzotik parçacıklarının hibrit mezon

olabileceklerine dair deneysel sonuçlar vardır (Yao, 2006). BaBar tarafından rapor edilen Y(4260) durumunun da bir hibrit çarmonyum olabileceğine dair görüşler bulunmaktadır (Kim vd., 2009). Hibritle ile ilgili yapılan teorik araştırmalar sonucunda ise; AdS/KRD model çerçevesinde $J^{PC} = 1^{-+}$ hibrit egzotik mezonlar araştırılmıştır (Yang, 2007). Yapılan bu çalışmada temel seviye için hibrit egzotik mezon kütlesi 1476 MeV olarak öngörülmüş ve deneysel veri ile karşılaştırıldığında $\pi_1(1400)$ parçacığı ile uyumlu olduğu söylenmiştir. Ayrıca yine aynı çalışmada π_1 (1400)'ün bozunum sabiti $F_{\pi_1} = 10,6$ MeV olarak öngörülmüştür. Farklı bir çalışmada yine 1^{-+} egzotik mezonların kütlesi geliştirilmiş renormalizasyon KRD toplam kuralı kullanılarak hesaplanmıştır ve $(1,26 \pm 0,15)\ \mathrm{GeV}$ olarak elde edilen kütle değerinin $\pi_1(1400)$ durumunun verisiyle uyumlu olduğu yorumlanmıştır (Jin vd., 2003). KRD toplam kuralları yöntemi ile 1^{-+} hafif hibrit mezon kütlesi için yaklaşık 1,6 GeV değeri elde edilmiştir (Chetyrkin vd., 2000). KRD spektral toplam kuralları ile hafif hybridlerin bozunum genlikleri, kütleleri ve bozunum genişlikleri hesaplanmıştır (Narison, 2009). KRD spektral toplam kuralı ile 1^{-+} hibrit kütleleri ve bağlaşımları hesaplanmıştır (Hedditch vd., 2005). Sonuç olarak hibrit kütlesi $M_H = 1,81(6)\ \mathrm{GeV}$ ve $M_H \le 2,2(2)\ \mathrm{GeV}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca yine aynı çalışmada dörtkuark durumu için $M_{4q} = 1,70(4)\ \mathrm{GeV}$ ve $M_{4q} \le 2,4(1)\ \mathrm{GeV}$; molekül durumu için ise 1,3(1) GeV kütle değerleri bulunduğu söylenmiştir. Örgü yöntemi ile 1^{-+} hybrid kütlesi bulunmuş ve $\pi_1(1600)$ ile uyuştuğu belirtilmiştir (McNeile vd.,2006). Yine örgü KRD yönteminin kullanıldığı farklı bir çalışmada $J^{PC} = 1^{-+}$ egzotik hibrit mezon bozunumu araştırılmıştır (Page vd., 1999). Hibrit mezon için 400(120) MeV'lik πb_1'e ve 90(60) MeV'lik πf_1'e kısmi genişlikli bir hibrit mezon durumu 2,2(2) GeV'de bulunmuştur. Yapılan diğer çalışmada hafif $s\bar{s}$, ağır $c\bar{c}$ ve $b\bar{b}$ hibrit mezonların kısmi bozunum genişlikleri sunulmuştur (Burns ve Close, 2006). Örgü KRD ve flux tube modelde hibrit mezon özellikleri incelenmiştir ve $J^{PC} = 1^{-+}$ kuantum sayılı hibrit mezon için yaklaşık 1,9 GeV kütle değeri bulunmuştur (Zhu, 1999). KRD toplam kuralları yönteminin kullanıldığı çalışmada $J^{PC} = 1^{-+}$ hibrit mezonların bozunumlarında pionik bağlaşım sabitleri hesaplanmıştır (Huang vd., 2011). Bu çalışmada $1^{-+} \to \rho\pi, f_1\pi, \pi\gamma$ süreçlerinin bozunum genişlikleri sırasıyla yaklaşık olarak $40, 100, 0,3\ \mathrm{MeV}$ civarında bulunmuştur. Işık Koni KRD toplam kuralı yönteminin kullanıldığı başka bir çalışmada, $1^{\pm} \to \rho\pi, f_1\pi, b_1p, \eta\pi, \eta'\pi, \alpha_1\pi, f_1\eta$ bozunum modlarının bağlaşım sabitleri hesaplanmıştır (Chen vd., 2011). KRD toplam kuralları çerçevesinde 1^{-+} hibrit mezonların pionik bağlaşım sabitleri çıkartılarak farklı modların bozunum genişlikleri hesaplanmıştır (Ebert vd., 2009). Şimdiye kadar yapılan

deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen $J^{PC} = 1^{-+}$ için üç aday $\pi_1(1400)$, $\pi_1(1600)$, $\pi_1(2000)$ durumlarının bulunduğu belirtilmiştir. Literatürde hibrit mezon kütlelerinin teorik olarak hesaplandığı pek çok çalışma bulunmaktadır (Dudek vd., 2010; Kisslinger, 2009; Dudek vd., 2009; Iddir ve Semlala, 2008). Constituent glue modelde hibrit mezonların kütleleri ve bozunum genişlikleri hesaplanmıştır (Huang vd., 1999a). Gerçekleştirilen diğer çalışmada KRD toplam kuralları formalizmi kullanılarak hibrit mezonların kütlesi çalışılmıştır (Qiao vd., 2012). 1^{--} çarmonyum ve bottomonyum hibritlerin kütleleri KRD toplam kuralları yöntemi ile hesaplanmıştır (Kisslinger ve Das, 2016). Charm sektöründe taban durumu hibrit $m_{H_c} = 4{,}12 \sim 4{,}79$;bottom sektöründe ise $m_{H_b} = 10{,}24 \sim 11{,}15$ GeV kütle değerleri elde edilmiştir. Yine KRD toplam kurallarının kullanıldığı çalışmada, mixed upsilon-hibrit upsilon kütlesi $M^2_{\Upsilon-H\Upsilon} \cong$ 10,4 GeV olarak bulunmuştur (Huang vd., 2015). $\Psi'(2S)$ ve $\Upsilon(3S)$ durumlarının mixed mezon-hibrit mezon durumu olarak düşünüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca yine bu çalışmada mixed çarmonyum-hibrit çarmonyum kütlesi ≅3,69 GeV şeklinde bulunmuştur. KRD toplam kuralı yöntemi ile 1^{-+} hafif hibrit mezon kütlesi hesaplanmış ve bu değer 2,26 GeV civarında öngörülmüştür (Chen vd., 2014d). Sonuç olarak $\pi_1(1600)$ ve $\pi_1(1400)$ ile kıyaslandığında $\pi_1(2015)$ durumunun daha iyi bir hibrit adayı olduğu söylenmektedir. Yine KRD toplam kurallarının kullanıldığı çalışmada alt-tılsımlı hibrit $\bar{b}Gc$ sistemlerinin kütle spektrumu çalışılmıştır (Chen vd., 2013a). KRD toplam kuralları ile çeşitli J^{PC} kuantum sayılı çarmonyum ve bottomonyum hibrit durumlarının çalışıldığı görülmektedir (Chen vd., 2013b). KRD toplam kuralının kullanıldığı çalışmada $J^{PC} = 1^{++}$ çarmonyum hibrit ve $\bar{D}D^*$ molekül akımlarının bağlaşımlarının karışım durumu olarak X(3872)'nin tanımlanıp tanımlanamayacağı araştırılmıştır (Guo vd., 2014). Çarmonyum mezonları için $c\bar{c}$ hibritlerin en düşük çokluları ve geleneksel çarmonyum arası ışınımsal geçişler tanımlanmıştır (Zhu, 2005). Bu tanımlama için Coulomb ayarında KRD-Hamiltonyen'in rölativistik-olmayan limiti düşünülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçlar potansiyel kuark modelleri ve örgü hesaplamaları ile karşılaştırılmıştır. Y(4260) durumunun çarmonyum hybrid durumu olarak yorumlandığı görülmektedir (Kou ve Pene, 2005; Close ve Page, 2005; Meyer ve Swanson, 2015). Yapılan diğer çalışmada hibrit hadronların teorik ve deneysel durumları sunulmuştur (Kisslinger ve Henley, 2011). Gluelump spektrumu, adyabatik potansiyeller, ağır ve hafif hibritler ve geçiş matris elemanları üzerindeki teorik örgü sonuçları tartışılmış ve bunlar bag, string, flux tube ve constituent gluon modelleri ile karşılaştırılmıştır. Yine aynı çalışmada güçlü ve elektromanyetik bozunum modları tanımlanmış ve örgü ayar teori sonuçları ile karşılaştırılmıştır. $\Lambda(1405)$'in hibrit baryon olma ihtimali gözönüne alınarak KRD toplam kuralları metodu ile parçacığın kütlesi hesaplanmıştır (Ochs, 2013). Gluontopları

(glueball'lar); Sadece gluonlardan meydana gelen hadronik durumlardır. Gluonların bağlı durumları olan glueball'ların varlığı KRD'de gluonların kendi etkileşimlerinin sonucudur. 1972 yılında bu durumların hadronların kuark-gluon teorisinde $q\bar{q}$ durumuna benzer yapıda görüleceği düşünülmüştür (Mathieu vd., 2009). Öne sürülen bu yapı sıradan mezon durumları ile karıştığından dolayı glueball'ların parçacık hızlandırıcılarında tespit edilmesi oldukça zordur (Hsiao ve Geng, 2013). Teorik hesaplamalar bu durumların mevcut çarpıştırıcı teknolojileri ile erişilebilir enerji aralıklarında var olabileceğini göstermektedir. Ancak bahsedilen zorluk nedeniyle glueball'ların şimdiye kadar gözlemlenmesi ve kesin olarak tespit edilmesi henüz gerçekleştirilememiştir (Lü vd., 2013). Teorik ve deneysel çalışmalar sonucu aşağıdaki parçacıklar güçlü glueball adayı olarak görülmektedir.

Gluon topları (Glueball) ; X(3020), BaBaR deneyi tarafından gözlemlenen bu parçacık yaklaşık $3{,}02\ \mathrm{GeV/c^2}$ 'lik bir kütle ile $2^{-\pm}, 1^{+-}$ veya 1^{--} glueball durumlarının uyarılmış durumu için adaydır (Lü vd., 2013). $f_0(500)$, aynı zamanda σ^{--} olarak da bilinen bu parçacığın özellikleri 1000 MeV veya 1500 MeV kütleli bir glueball ile büyük olasılıkla uyumludur (Mathieu vd., 2009). $f_0(980)$, bu kompozit parçacığın yapısı hafif bir glueball varlığı ile uyumludur (Mathieu vd., 2009). $f_0(1370)$, varlığı tartışmalı olan bu rezonans bir glueball-mezon karışım durumu için adaydır (Mathieu vd., 2009). $f_0(1500)$, varlığı tartışmasız olan bu rezonansın durumu bir glueball-mezon karışım durumu veya temiz glueball olarak iyi belirlenmemiştir (Mathieu vd., 2009). $f_0(1710)$, varlığı tartışmasız olan bu rezonansın durumu bir glueball-mezon karışım durumu veya temiz glueball olarak iyi belirlenmemiştir (Mathieu vd., 2009). Bu glueball adaylarının çoğu yıllardır aktif araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmalarla beraber, yapılan bir çalışmada mevcut deneysel veriler ile doğrulanmış hafif kuarklar için çeşni SU(3) simetrisi kullanılarak B bozunumlarında skaler bir glueball yakalamak için sezgisel bir yol önerilmiştir (Chen vd., 2006). Örgü KRD simülasyonları ile en temel skaler glueball kütlesi yaklaşık 1,5-1,8 GeV olarak bulunmuştur (Loan vd., 2006; Buisseret vd., 2013). Farklı bir çalışmada ayar grubu $SU(N_c)$ 'li (2+1)-boyutlu örgü KRD'de gözlemlenen gluebalların kuantum sayılarını ve kütle hiyerarşisini birleştiren bir resim ile uyuştuğu gösterilmektedir (Eshraim ve Janowski, 2013). Sözdeskaler glueball, $J^{PC} = 0^{-+}$ ve skaler ve sözdeskaler mezonlar arası etkileşimi tanımlayan $N_f = 3$ kiral lagrangien düşünülerek sözdeskaler gluebalların bozunum genişlikleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada yaklaşık 2,6 GeV kütleli durum incelenmiştir (Gregory vd., 2012). Yapılan çalışmada 10 glueball durumu için örgü KRD yöntemi ile kütleler rapor edilmiştir (Morningstar ve Peardon,

2004). Yine örgü KRD yöntemi ile skaler glueball kütlesinin etkili hesaplanması için teknikler tanımlanmıştır (Ochs, 2013). Diğer bir çalışmada glueballların durumları hakkında bilgiler yer almaktadır (Hsiao ve Geng, 2013). KRD örgü ve toplam kuralları içindeki hesaplamalar en hafif glueball'ın skaler olması ve yaklaşık $1000-1700\ \mathrm{MeV}$ aralığında kütleye sahip olması şeklindeki sonuçlara ulaştırmıştır. $f_0(500)$, $f_0(980)$ ve $f_0(1500)$ hafif skalerlerin çeşni yapısı sonuçları yine bu çalışmada sunulmuştur ve $f_0(1370)$ için kanıt incelenmiştir. $\overline{B}^0 \to p\bar{p}D^0$ bozunumunun $m_{p\bar{p}}$ spektrumunda BaBar iş birliği tarafından yaklaşık 3 GeV civarında gözlemlenen bilinmeyenin doğası incelenmiş ve $(m_X, \Gamma_X) = (3020 \pm 8{,}17 \pm 30)\ \mathrm{MeV}$ 'li X(3020)'nin 3 GeV civarındaki ilk glueball olabileceğine dikkat çekilerek bu durum glueball ile ilişkilendirilmiştir (Janowski, 2013). skaler-izoskaler rezonanslar $f_0(1370)$, $f_0(1500)$ ve $f_0(1710)^*$ durumlarının kuarkonyum ve glueball karışımları incelenmiştir (Li ve Zhang, 2014). $f_0(1710)$ rezonansının baskın olarak skaler bir glueball adayı olduğu söylenmektedir. Yapılan çalışmada temel skaler glueball'ın kütlesi $0{,}96^{+0{,}04}_{-0{,}07}\ \mathrm{GeV} < m_G < 1{,}36^{+0{,}05}_{-0{,}10}\ \mathrm{GeV}$ bulunmuştur (Mathieu vd., 2009). Glueballların örgü KRD yöntemi ile çalışıldığı görülmektedir. (Huang vd., 1999b)'da $f_0(1810)$ yeni bir glueball adayı olarak öngörülmüştür (Yang vd., 2013; Chen vd., 2013; Bicudo vd., 2007). Coulomb ayar modelinde toplam glueball bozunum genişliği yaklaşık 100 MeV hesaplanmış ve keşfedilen skaler hadronun glueball adayı olarak düşünüldüğü vurgulanmıştır. KRD toplam kuralları ile skaler glueball kütlesi tanımlanmış ve 0^{++} glueball kütlesi analiz edilmiştir (Morningstar ve Peardon, 1999). İzotropik olmayan örgüde glueball kütlesi 1,7 GeV olarak öngörülmüş, $J^{PC} = 2^{++}$'lı en hafif tensör glueball kütlesi 2,4 GeV olarak ve en hafif 0^{-+} sözdeskaler glueball kütlesi 2,6 GeV olarak bulunmuştur (Loan vd., 2006; Close ve Kirk, 2000). $f_0(1500)$ ve $f_0(1710)$'un farklı karışım senaryolarında glueballları oluşturduğu öne sürülmektedir (Cheng vd., 2006; Kochelev ve Min, 2006). X(1835)'in en düşük sözdeskaler glueball durumu olarak yorumlanabileceği belirtilirken, bu durumun 0^{-+} glueball olma olasılığı incelenmiştir (Li, 2006; Choi, 2003).

Yukarıda bahsedildiği gibi deneysel olarak belirlenen ve kuark modelin içinde yorumlanamayan hadronların genellikle egzotik hadronlar olduğu iddia edilmektedir ve geçtiğimiz birkaç yıl boyunca egzotik hadron araştırmalarında önemli deneysel ilerlemeler gerçekleştirilmiştir. 2003 yılından beri, birçok çarmonyum ve bottomonyum benzeri durumlar deneysel olarak gözlemlenmiş; bu yeni durumların bazıları geleneksel kuark modeline uymadığından dolayı egzotik durumlara aday olabileceği düşünülmüştür. Bu olasılığı

araştırmak için egzotik hadronların beklenen özelliklerini teorik hesaplamalarla belirlemeye ihtiyaç duyulmuştur. Bazı egzotik parçacıklarla ilgili çeşitli deneysel özellikleri ve gözlemlendikleri deneyler Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Bazı egzotik parçacıkların deneysel durumu

Parçacık	J^{PC}	M (MeV)	Γ (MeV)	Bozunum Modları	Gözlemlenmesi
$X(3872)$	1^{++}	$3871{,}4 \pm 0.6$	$< 2{,}3$	$\gamma J/\psi, D\overline{D}^{*}$	Belle (Aubert, 2005), CDF (Wang, 2014), D0 (Huang vd., 2011),BaBar (Uehara, 2006)
$Z_c(3900)$	1^{+}	3899 ± 6	46 ± 22	$\pi^{\pm} J/\psi$	Belle, BESIII* (Lee vd., 2009b)
$Z(3930)$	2^{++}	3929 ± 5	29 ± 10	$D\overline{D}$	Belle(Ablikim, 2013b)
$Z_c(4020)$	1^{+-}	4024 ± 2	10 ± 3	$h_c\pi^{+}$	BESIII (Mizuk ve Chistov, 2008)
$Z_1(4050)^{+}$	?	4051^{+24}_{-43}	82^{+51}_{-29}	$\pi^{\pm}\chi_{cl}$	Belle (Chilikin, 2014)
$Z(4200)$	1^{+-}	4196^{+35}_{-32}	370^{+99}_{-149}	$J/\psi\pi^{+}$	Belle (Choi, 2008)
$Z_2(4250)^{+}$	?	4248^{+185}_{-45}	177^{+321}_{-72}	$\pi^{\pm}\chi_{cl}$	Belle (Chilikin, 2014)
$Z(4430)^{+}$	1^{+}	4458 ± 15	166^{+37}_{-32}	$\pi^{\pm}\psi^{l}$	Belle (LHCb, 2014), LHCb(Uehara vd., 2009)
$X(3915)$	$0/2^{++}$	3914 ± 4	28^{+12}_{-14}	$\omega J/\psi$	Belle (Abe, 2005)
$X(3940)$	$?^{?+}$	3942^{+9}_{-8}	37^{+27}_{-17}	$D\overline{D}^{*}$	Belle (Choi ve Olsen, 2005)
$Y(3940)$	$?^{?+}$	3943 ± 17	87 ± 34	$\omega J/\psi$	Belle (Aubert, 2008), BaBar (Yuan, 2007)

Tablo 2.1 (Devam) Bazı egzotik parçacıkların deneysel durumu

$Y(4008)$	1^{--}	4008^{+82}_{-49}	226^{+97}_{-80}	$\pi^+\pi^- J/\psi$	Belle (Aaltonen, 2009)
$Y(4140)$	$?^{?+}$	$4145{,}8 \pm 2{,}6$	18 ± 8	$J/\psi\phi$	CDF (Aaltonen vd., 2017; Abazov, 2014), D0 (Chatrchyan, 2014), CMS (Pakhlov, 2008)
$X(4160)$	$?^{?+}$	4156^{+29}_{-25}	139^{+113}_{-65}	$D^*\overline{D}^*$	Belle (Aubert, 2007)
$Y(4260)$	1^{--}	4264 ± 12	83 ± 22	$\pi^+\pi^- J/\psi$	Belle (Maiani vd., 2007), BaBar*(Rosner, 2007), CLEO (Gershtein vd., 2007)
$Y(4350)$	1^{--}	4361 ± 13	74 ± 18	$\pi^+\pi^-\psi^l$	Belle, BaBar* (Wang, 2007;Aubert, 2006)
$X(4630)$	1^{--}	4634^{+9}_{-11}	92^{+41}_{-32}	$\Lambda_c^+\Lambda_c^-$	Belle (Bondar, 2012)
$Y(4660)$	1^{--}	4664 ± 12	48 ± 15	$\pi^+\pi^-\psi^l$	Belle (Wang, 2007;Aubert, 2006)
$Y_s(2175)$	1^{--}	2175 ± 8	58 ± 26	$\phi f_0(980)$ $\pi^+\pi^- J/\psi$	Belle, BaBar* (Bondar, 2012), BESII (2006)
$Z_b(10610)$	1^+	$10{,}607 \pm 2$	$18{,}4 \pm 2{,}4$	$\pi^\pm h_b(1,2P), \pi^\pm \Upsilon(1,$	Belle (Krokovny, 2013; Garmash, 2015; Bondar, 2012; Adachi, 2012)
$Y_b(10890)$	1^{--}	$10{,}890 \pm 3$	55 ± 9	$\pi^+\pi^-\Upsilon(1,2,3S)$	Belle (Aaij, 2015)

Tablo 2.1 (Devam) Bazı egzotik parçacıkların deneysel durumu

$X(5568)$	0^{++}	$5567{,}8 \pm 2{,}9^{+0{,}9}_{-1{,}9}$	$21{,}9 \pm 6{,}4^{+5{,}0}_{-2{,}5}$	$B_s^0\pi^{\pm}$	D0 (Abazov, 2016)
$P_c(4380)^+$	$3/2^-$	$4380 \pm 8 \pm 29$	$205 \pm 18 \pm 86$	$J/\psi p$	LHCb (Aaij, 2015)
$P_c(4450)^+$	$5/2^+$	$4449{,}8 \pm 1{,}7 \pm 2{,}5$	$39 \pm 5 \pm 19$	$J/\psi p$	LHCb (Aaij, 2015)

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Güçlü etkileşmenin teorisi olarak ortaya çıkan KRD'nin kuark-gluon çiftlenim sabiti incelendiği bölgenin momentum skalasına bağlıdır. Yüksek momentum transferi içeren süreçler için, asimtotik özgürlük özelliğinden dolayı çiftlenim sabitinin küçük olması neticesinde, bilindik pertürbasyon teorisi kullanılabilmekte iken düşük momentumda gerçekleşen güçlü etkileşme süreçleri pertürbasyon teorisi ile ifade edilemez. Özellikle hadronik skalada güçlü etkileşme sabitinin çok büyük olması pertürbasyon teorisinin uygulanmasını imkansız hale getirir. Bu nedenle bu durumlar için pertürbatif olmayan bir yönteme ihtiyaç duyulur. Bu projede genişleterek ele alacağımız KRD toplam kurallarının yanı sıra Örgü KRD Teorisi (Lattice QCD), Torba Modeli, Efektif Lagrange Yöntemi, Potansiyel Model, Fenomenolojik Kuark Modeli, Ağır Kuark Efektif Teorisi (Heavy Quark Effective Theory), Kiral Pertürbasyon Teorisi (CPT Theory), Nambu-Jona-Lasinio (NJL) modeli bu amaçla kullanılan yöntemler arasındadır.

KRD toplam kuralları hadronların kütleleri, bozunum sabitleri, güçlü etkileşimlerini temsil eden kuplaj (çiftlenim) sabitleri, onların elektromanyetik ve yarıleptonik bozunumlarını temsil eden yapı faktörleri gibi çeşitli fiziksel parametreleri kuark ve gluon alanlarından oluşturulan yerel işlemcilerin beklenen değerleri ve KRD parametreleri cinsinden ifade eden bir hesaplama yöntemidir. Bu yöntemin başlangıç noktası, hesaplanacak fiziksel parametreye uygun olarak seçilen bir korelasyon fonksiyonudur. Hesaplanacak fiziksel parametre hadronların kütlesi veya bozunma sabiti gibi parçacığa ait spektroskopik özellik ise ara kesit akımlarının Fourier dönüşümü uygulanmış korelasyon fonksiyonu iki nokta korelasyon fonksiyonudur ve,

$$\Pi(q^2) = i\int d^4x e^{iq.x} \left\langle 0 \left| T[J(x)\bar{J}(0)] \right| 0 \right\rangle \qquad (3.1)$$

şeklinde verilir. Bu ifadede $|0\rangle$ pertürbatif olmayan vakumu, T ise zaman sıralama işlemcisini temsil etmektedir. J(x) ara kesit kuark akımıdır. Bu akım çalışılan hadronun kuantum sayıları dikkate alınarak, quark alanları kullanılarak oluşturulur ve mezonlar için,

$$J(x) = \bar{q}_i(x)\Gamma q_j(x) \tag{3.2}$$

baryonlar için ise,

$$J(x) = \varepsilon_{abc}(q_i^a(x)\Gamma_1 q_j^b(x)\Gamma_2 q_k^c(x)) \tag{3.3}$$

şeklinde verilir. Bu ifadelerde görülen i,j,k kuark çeşnilerini, a,b,c renk indislerini belirtir ve $\Gamma = 1, \gamma_5, \gamma_\mu, \gamma_5\gamma_\mu$ gibi Dirac matrislerini belirtir. Ekzotik hadronların ara kesit akımları için örnek vermek gerekir ise;

Dörtkuark içeren yapıların ara kesit akımları için iki farklı oluşum düşünülebilir; dikuark-antidikuark tipi $(qq)(\bar{q}\bar{q})$ ve molekül-tipi $(q\bar{q})(q\bar{q})$.

$QQ\bar{q}\bar{q}$ dörtkuark yapıları için ara kesit akımları farklı kuantum sayıları için aşağıdaki gibi yazılabilir;

$J^P = 0^-$ için,

$$J_1 = Q_a^T C Q_b (\bar{q}_a \gamma_5 C \bar{q}_b^T + \bar{q}_b \gamma_5 C \bar{q}_a^T),$$
$$J_2 = Q_a^T C \gamma_5 Q_b (\bar{q}_a C \bar{q}_b^T + \bar{q}_b C \bar{q}_a^T),$$
$$J_3 = Q_a^T C \sigma_{\mu\nu} Q_b (\bar{q}_a \sigma^{\mu\nu} \gamma_5 C \bar{q}_b^T - \bar{q}_b \sigma^{\mu\nu} \gamma_5 C \bar{q}_a^T),$$
$$J_4 = Q_a^T C \gamma_\mu Q_b (\bar{q}_a \gamma^\mu \gamma_5 C \bar{q}_b^T - \bar{q}_b \gamma^\mu \gamma_5 C \bar{q}_a^T),$$
$$J_5 = Q_a^T C \gamma_\mu \gamma_5 Q_b (\bar{q}_a \gamma^\mu C \bar{q}_b^T + \bar{q}_b \gamma^\mu C \bar{q}_a^T),$$

$J^P = 0^+$ için,

$$J_1 = Q_a^T C Q_b (\bar{q}_a C \bar{q}_b^T + \bar{q}_b C \bar{q}_a^T),$$
$$J_2 = Q_a^T C \gamma_5 Q_b (\bar{q}_a \gamma_5 C \bar{q}_b^T + \bar{q}_b \gamma_5 C \bar{q}_a^T),$$
$$J_3 = Q_a^T C \gamma_\mu Q_b (\bar{q}_a \gamma^\mu C \bar{q}_b^T - \bar{q}_b \gamma^\mu C \bar{q}_a^T),$$
$$J_4 = Q_a^T C \gamma_\mu \gamma_5 Q_b (\bar{q}_a \gamma^\mu \gamma_5 C \bar{q}_b^T - \bar{q}_b \gamma^\mu \gamma_5 C \bar{q}_a^T),$$
$$J_5 = Q_a^T C \sigma_{\mu\nu} Q_b (\bar{q}_a \sigma^{\mu\nu} C \bar{q}_b^T - \bar{q}_b \sigma^{\mu\nu} C \bar{q}_a^T),$$

$J^P = 1^-$ için,

$$J_1 = Q_a^T C\gamma_\mu\gamma_5 Q_b(\bar{q}_a\gamma_5 C\bar{q}_b^T + \bar{q}_b\gamma_5 C\bar{q}_a^T),$$
$$J_2 = Q_a^T C\gamma_5 Q_b(\bar{q}_a\gamma_\mu\gamma_5 C\bar{q}_b^T + \bar{q}_b\gamma_\mu\gamma_5 C\bar{q}_a^T),$$
$$J_3 = Q_a^T C\sigma_{\mu\nu} Q_b(\bar{q}_a\gamma^\nu C\bar{q}_b^T - \bar{q}_b\gamma^\nu C\bar{q}_a^T),$$
$$J_4 = Q_a^T C\gamma^\nu Q_b(\bar{q}_a\sigma_{\mu\nu} C\bar{q}_b^T - \bar{q}_b\sigma_{\mu\nu} C\bar{q}_a^T),$$
$$J_5 = Q_a^T C\gamma_\mu Q_b(\bar{q}_a C\bar{q}_b^T - \bar{q}_b C\bar{q}_a^T),$$

$$J_6 = Q_a^T C Q_b(\bar{q}_a\gamma_\mu C\bar{q}_b^T + \bar{q}_b\gamma_\mu C\bar{q}_a^T),$$
$$J_7 = Q_a^T C\sigma_{\mu\nu}\gamma_5 Q_b(\bar{q}_a\gamma^\nu\gamma_5 C\bar{q}_b^T - \bar{q}_b\gamma^\nu\gamma_5 C\bar{q}_a^T),$$
$$J_8 = Q_a^T C\gamma^\nu\gamma_5 Q_b(\bar{q}_a\sigma_{\mu\nu}\gamma_5 C\bar{q}_b^T + \bar{q}_b\sigma_{\mu\nu}\gamma_5 C\bar{q}_a^T),$$

Yukarıda olduğu gibi aynı kuantum sayısına ait birden fazla ara kesit akımı yazılabilir;

$J^P = 1^+$ için,

$$J_1 = Q_a^T C\gamma_\mu\gamma_5 Q_b(\bar{q}_a C\bar{q}_b^T + \bar{q}_b C\bar{q}_a^T),$$
$$J_2 = Q_a^T C Q_b(\bar{q}_a\gamma_\mu\gamma_5 C\bar{q}_b^T + \bar{q}_b\gamma_\mu\gamma_5 C\bar{q}_a^T),$$
$$J_3 = Q_a^T C\sigma_{\mu\nu}\gamma_5 Q_b(\bar{q}_a\gamma^\nu C\bar{q}_b^T - \bar{q}_b\gamma^\nu C\bar{q}_a^T),$$
$$J_4 = Q_a^T C\gamma^\nu Q_b(\bar{q}_a\sigma_{\mu\nu}\gamma_5 C\bar{q}_b^T - \bar{q}_b\sigma_{\mu\nu}\gamma_5 C\bar{q}_a^T),$$
$$J_5 = Q_a^T C\gamma_\mu Q_b(\bar{q}_a\gamma_5 C\bar{q}_b^T - \bar{q}_b\gamma_5 C\bar{q}_a^T),$$
$$J_6 = Q_a^T\gamma_5 C Q_b(\bar{q}_a\gamma_\mu C\bar{q}_b^T + \bar{q}_b\gamma_\mu C\bar{q}_a^T),$$
$$J_7 = Q_a^T C\sigma_{\mu\nu} Q_b(\bar{q}_a\gamma^\nu\gamma_5 C\bar{q}_b^T - \bar{q}_b\gamma^\nu\gamma_5 C\bar{q}_a^T),$$
$$J_8 = Q_a^T C\gamma^\nu\gamma_5 Q_b(\bar{q}_a\sigma_{\mu\nu} C\bar{q}_b^T + \bar{q}_b\sigma_{\mu\nu} C\bar{q}_a^T),$$

u, d, c kuarklarını içerip dörtkuark ve bir antikuarkın birleşmesinden oluşan beşkuark yapıların ara kesit akımları,

$J^P = \frac{3}{2}^-$ için;

$$J_\mu^{\bar{D}^*\Sigma_c} = \left[\bar{c}_d\gamma_\mu d_d\right]\left[\varepsilon_{abc}(u_a^T C\gamma_\theta u_b)\gamma^\theta\gamma_5 c_c\right],$$

$J^P = \frac{5}{2}^+$ için;

$$J_{\mu\nu}^{\bar{D}\Sigma_c^*} = \left[\bar{c}_d \gamma_\mu \gamma_5 d_d\right]\left[\varepsilon_{abc}(u_a^T C \gamma_\nu u_b) c_c\right] + \{\mu \leftrightarrow \nu\},$$
$$J_{\mu\nu}^{\bar{D}^*\Sigma_c} = \left[\bar{c}_d \gamma_\mu u_d\right]\left[\varepsilon_{abc}(u_a^T C \gamma_\nu \gamma_5 d_b) c_c\right] + \{\mu \leftrightarrow \nu\},$$

Kuarkonyum hibrit $\bar{Q}GQ$ için ara kesit akımları,

$J^{P(C)} = 1^{-(+)}, 0^{+(+)}$ için,

$$J_\mu = g_s \bar{Q}_1 \frac{\lambda^a}{2} \gamma^\nu G_{\mu\nu}^a Q_2,$$

$J^{P(C)} = 1^{+(-)}, 0^{-(-)}$ için,

$$J_\mu = g_s \bar{Q}_1 \frac{\lambda^a}{2} \gamma^\nu \gamma_5 G_{\mu\nu}^a Q_2,$$

$J^{P(C)} = 2^{-(+)}, 1^{+(+)}, 1^{-(+)}, 0^{-(+)}$ için;

$$J_{\mu\nu} = g_s \bar{Q}_1 \frac{\lambda^a}{2} \sigma_\mu^\alpha \gamma_5 G_{\mu\nu}^a Q_2,$$

$J^{PC} = O^{--}$ gluontopu (glueball) için ara kesit akımı;

$$J = g_s^3 d^{abc}\left[g_{\alpha\beta}^t G_{\mu\nu}^a(x)\right]\left[\partial_\alpha \partial_\beta G_{\nu\rho}^b(x)\right]\left[G_{\rho\mu}^c(x)\right]$$

Burada a, b ve c renk indislerini; $\mu, \nu, \rho, \alpha, \beta$ Lorentz indislerini; d^{abc} simetrik $SU_c(3)$ sabitini göstermektedir. $g_{\alpha\beta}^t = g_{\alpha\beta} - \partial_\alpha \partial_\beta / \partial^2$ gluon alan şiddet tensörü ve $G_{\mu\nu}^a = \frac{1}{2}\varepsilon_{\mu\nu\kappa\tau} G_{\kappa\tau}^a$ dual gluon alan şiddet tensörüdür.

Eşitlik (3.1)'de verilen korelasyon fonksiyonunun hesaplanmasında, iki yol takip edilir. Bunlardan ilki operatör çarpım açılımı (OPE) veya KRD olarak adlandırılır ve korelasyon fonksiyonunun KRD parametreleri cinsinden hesaplanmasını içerir. Bu yöntem yerel olmayan iki operatörün zaman sıralı çarpımının çeşitli yerel operatörler ve Wilson katsayıları cinsinden seriye açılımıdır ve,

$$T\left\{J(x)\bar{J}(0)\right\} = \sum_{d} C_d(x^2) O_d \tag{3.4}$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadede bulunan $C_d(x^2)$ katsayıları Wilson katsayılarıdır, kısa mesafe fiziğini içerir ve pertürbatif olarak hesaplanır. O_d ise boyutlarına göre sıralanan yerel operatör setini temsil eder ve pertürbatif olmayan uzun mesafelerden gelen katkıları içerir. Diğer bir deyişle kısa ve uzun mesafe kuark-gluon işlemcileri ayırt edilmiş olur . En düşük boyutlu (d=0) operatör, pertürbatif katkı sağlayan birim operatördür.
Vakum renksiz olduğundan dolayı KRD'de düşük boyutlarda (d=1,2) renksiz operatör yoktur. Diğer d=3, 4, 5 ve 6 boyutlu operatörler ise;

d=3 $\quad O_3 = \bar{\psi}\psi$

d=4 $\quad O_4 = G^{a}_{\mu\nu}\, G^{a\mu\nu}$

d=5 $\quad O_5 = \bar{\psi}\, \sigma_{\mu\nu}\, \frac{\lambda^a}{2} G^{a\mu\nu}\, \psi$ (3.5)

d=6 $\quad O_6 = (\bar{\psi}\, \Gamma_r \psi)\, (\bar{\psi}\, \Gamma_s \psi)$

d=6 $\quad O_6 = f^{abc} G^{a}_{\mu\nu} G^{bv}_{\sigma} G^{c\sigma\mu}$

şeklindedir. Burada λ^a , SU(3) Gell-Mann renk matrisleridir ve $\sigma_{\mu\nu} = \frac{1}{2} i[\gamma_\mu, \gamma_\nu]$ ' dür. Denklem (3.4), Denklem (3.1) ile verilen korelasyon fonksiyonuna yerleştirilirse,

$$\Pi(q^2) = \sum_{d} C_d(q^2) \langle O_d \rangle \tag{3.6}$$

elde edilir ve bu ifadede $\langle O_d \rangle = \langle 0 | O_d | 0 \rangle$, KRD operatörlerinin vakum beklenen değeridir ve yoğuşma (kondensat) olarak allandırılır. Daha açık bir ifade ile ara kesit kuark akımları ve Wick teoremi kullanılarak Denklem (3.1) ile verilen korelasyon fonksiyonu,

$$\Pi(q^2) = i \int d^4x e^{iq.x} Tr\left[\Gamma_1 S_q(x) \Gamma_2 S_Q(x)\right] \tag{3.7}$$

olarak yazılabilir. Bu denklemde yer alan $S_q(x)$ ve $S_Q(x)$ ifadeleri sırasıyla hafif ve ağır kuark ilerleticileridir (propagatörleridir) ve hem pertürbatif olan hem de pertürbatif olmayan katkıları içerirler. Bunların açık ifadeleri konum uzayında şu şekilde verilir:

Hafif kuark ilerleticisi $S_q^{ab}(x)$,

$$S_q^{ab}(x) = i\delta_{ab}\frac{\not{x}}{2\pi^2x^4} - \delta_{ab}\frac{m_q}{4\pi^2x^2} - \delta_{ab}\frac{\langle\bar{q}q\rangle}{12}$$
$$+i\delta_{ab}\frac{\not{x}m_q\langle\bar{q}q\rangle}{48} - \delta_{ab}\frac{x^2\langle\bar{q}g_s\sigma Gq\rangle}{192} + i\delta_{ab}\frac{x^2\not{x}m_q}{1152}\langle\bar{q}g_s\sigma Gq\rangle \qquad (3.8)$$
$$-i\frac{g_sG_{ab}^{\alpha\beta}}{32\pi^2x^2}\left[\not{x}\sigma_{\alpha\beta} + \sigma_{\alpha\beta}\not{x}\right] - i\delta_{ab}\frac{x^2\not{x}g_s^2\langle\bar{q}q\rangle^2}{7776} - \delta_{ab}\frac{x^4\langle\bar{q}q\rangle\langle g_s^2G^2\rangle}{27648} + \ldots$$

Ağır kuark ilerleticisi ise $S_Q^{ab}(x)$,

$$S_Q^{ab}(x) = i\int\frac{d^4k}{(2\pi)^4}e^{ikx}\left(\frac{\delta_{ab}(\not{k}+m_Q)}{k^2-m_Q^2} - \frac{g_sG_{ab}^{\alpha\beta}}{4}\frac{\sigma_{\alpha\beta}(\not{k}+m_Q)+(\not{k}+m_Q)\sigma_{\alpha\beta}}{(k^2-m_Q^2)^2}\right.$$
$$+\frac{g_s^2G^2}{12}\delta_{ab}m_Q\frac{k^2+m_Q\not{k}}{(k^2-m_Q^2)^4} + \frac{g_s^2G^3}{48}\delta_{ab}\frac{(\not{k}+m_Q)}{(k^2-m_Q^2)^6} \qquad (3.9)$$
$$\left.\times\left[\not{k}(k^2-3m_Q^2)+2m_Q(2k^2-m_Q^2)\right](\not{k}+m_Q)+\ldots\right)$$

Denklem (3.8) ve Denklem (3.9) denklemlerindeki gluon alan şiddet tensörleri;

$$G_{ab}^{\alpha\beta} = G_A^{\alpha\beta}t_{ab}^A,$$
$$G^2 = G_{\alpha\beta}^AG_{\alpha\beta}^A, \qquad (3.10)$$
$$G^3 = f^{ABC}G_{\mu\nu}^AG_{\nu\delta}^BG_{\delta\mu}^C$$

şeklinde yazılır. Burada a, b =1, 2, 3 ve A, B, C=1, 2...8 renk indisleri $t^A = \lambda^A/2$ ve λ^A ise Gell-Mann matrisleridir.

Korelasyon fonksiyonunu hesaplamada takip edilen ikinci yol ise fiziksel ya da fenomenolojik kısım olarak adlandırılır ve korelasyon fonksiyonunun hadronik parametreler cinsinden hesabını içerir. Bu kısmın hesabı için korelasyon fonksiyonuna ara kesit kuark akımları ile aynı kuantum sayılarına sahip ara hadron durumlarının bir tam seti yerleştirilir ve,

$$2\,\mathrm{Im}\,\Pi(q^2) = \sum_h\int\langle 0|J|h\rangle\langle h|\bar{J}|0\rangle d\tau_h(2\pi)^4\delta^{(4)}(q-p_h)$$
$$= 2\pi f_h^2\delta(q^2-m_h^2) + 2\pi\rho_h(q^2) \qquad (3.11)$$

ifadesi elde edilir. Buradaki $\sum$ toplam, J ara kesit kuark akımının yaratabileceği bütün olası hadronik durumlar üzerindendir. $\rho_h(q^2)$ yüksek durumlardan ve süreklilikten gelen katkıyı ve $f_h = \langle 0|J|h\rangle$ leptonik bozunma sabitini ifade eder.

Korelasyon fonksiyonunun her iki yol ile hesaplanmasından sonra elde edilen sonuçlar bir dispersiyon bağıntısı ile eşitlenerek istenilen fiziksel büyüklük için KRD toplam kuralları elde edilir. Yüksek durumlardan ve süreklilikten gelen katkıları baskılamak için her iki kısma Borel dönüşümü ve süreklilik çıkarımı (continuum subtraction) adı verilen dönüşümler uygulanır.

KRD toplam kurallarında, süreklilik eşiği s_0 ve Borel kütle parametresi M^2 olmak üzere iki yardımcı parametre bulunmaktadır. Bu yardımcı parametreler tam fiziksel bir anlam taşımadıkları için elde edilen fiziksel büyüklükler bu parametrelere çok bağlı olmamalıdır. Bu sebepten dolayı KRD toplam kurallarında, bu yardımcı parametreler için çalışma bölgesi denilen fiziksel sonuçların bu parametrelere göre çok değişim göstermediği bölgeler belirlenmesi gerekmektedir. Borel kütle parametresi için çalışma bölgesi, yüksek mertebeden ve süreklilikten gelen katkılar ve ayrıca az katkı veren yüksek mertebeli operatörlerden gelen katkılar ortadan kaldırılarak hesaplanır. Fiziksel nicelikler için toplam kuralları yakınsaktır ve tüm katkının önemli bir kısmı pertürbatif kısımdan gelir. Böylece Borel parametresinin üst sınırı aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$\frac{\int_{s_{\min}}^{s_0} \rho(s) e^{-s/M^2} ds}{\int_{s_{\min}}^{\infty} \rho(s) e^{-s/M^2} ds} > 1/2. \qquad (3.12)$$

Pertürbatif katkının pertürbatif olmayan katkıdan büyük olduğu bölgede M^2'nin alt sınırı belirlenir. Süreklilik eşiği s_0'ın sınırlarının belirlenmesi için ise elde edilen M^2 aralığının orta noktası alınarak süreklilik eşiği s_0'a göre pole ve süreklilik katkısı grafiği çizdirilir. Daha sonra pole ve süreklilik katkısının kesiştiği yerde süreklilik eşiği s_0'ın alt sınırı belirlenir. Süreklilik eşiğinin üst sınırının belirlenmesi için aynı kuantum numarasına sahip uyarılmış durumun kütle bilgisine ihtiyaç duyulur. Böylece süreklilik eşiğinin çalışma bölgesi yapılan analiz sonucunda elde edilir.

Parçacıkların güçlü ve yarıleptonik bozunumlarını temsil eden yapı faktörlerini veya çiftlenim (kuplaj) sabitleri üç nokta korelasyon fonksiyonuna ile hesaplanır. Bu durumda korelasyon fonksiyonu,

$$\Pi(p^2,p'^2) = i^2 \int d^4x d^4y e^{-ip.x} e^{-ip'.y} \langle 0|T\{J_1(x)J_3(0)\bar{J}_2(y)\}|0\rangle \quad (3.13)$$

şeklinde verilebilir. Güçlü bozunumlarda J_1, J_2 ve J_3 her parçacığa karşılık gelen ara kesit akımlarıdır. Yarıleptonik bozunumlarda ise J_1 ve J_2 ilk ve son durumlar için ara kesit akımları; J_3 ise geçiş akımıdır.

Bu hesaplarda $\langle 0|J_1|h_1\rangle$ ve $\langle 0|J_2|h_2\rangle$ matris elemanlarının yanı sıra ortaya çıkan $\langle h_1|J_3|h_2\rangle$ matris elemanı form faktörler veya çiftlenim sabitleri cinsinden parametrize edilir. Örneğin; $Z_c^+(4200) \to J/\psi\pi^+$ güçlü bozunumu için Denklem (3.13), x ve y integrali alındıktan sonra,

$$\Pi_{\alpha\beta}^{Z_c J/\psi\pi}(q) = \frac{\langle 0|J_\alpha^\psi|J/\psi(p')\rangle\langle 0|J^\pi|\pi(q)\rangle\langle 0|J_\beta^Z|Z_c(p)\rangle\langle J/\psi(p')\pi(q)|Z_c(p)\rangle}{(p^2-m_{Z_c}^2)(p'^2-m_{J/\psi}^2)(q^2-m_\pi^2)} + \ldots \quad (3.14)$$

ifadesi elde edilir. Burada matris elemanları aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{aligned}
&\langle 0|J_\alpha^\psi|J/\psi(p')\rangle = f_{J/\psi}\varepsilon_\alpha(p'),\\
&\langle 0|J^\pi|\pi(q)\rangle = \frac{2i\langle\bar{q}q\rangle}{f_\pi},\\
&\langle Z_c(p)|J_\beta^Z|0\rangle = f_{Z_c}\,\varepsilon_\beta(p),\\
&\langle J/\psi(p')|\pi(q)|Z_c(p)\rangle = g_{Z_c^+ J/\psi\pi} g_{\mu\nu}\varepsilon^\mu\varepsilon^\nu,
\end{aligned} \quad (3.15)$$

burada f bozunum sabitlerini, ε polarizasyon vektörü ve $g_{Z_c^+ J/\psi\pi}$ güçlü çiftlenim sabitini göstermektedir (Chen vd., 2015).

$B_s \to D_{s2}^*(2573)\ell\bar{\nu}_\ell$ yarıleptonik bozunumu için Denklem (3.13), x ve y integrali alındıktan sonra,

$$\Pi_{\mu\alpha\beta}^{B_s D_{s2}^*(2573)\ell\bar{\nu}_\ell} = \frac{\langle 0|J_{\alpha\beta}^{D_{s2}^*}|D_{s2}^*(p',\varepsilon)\rangle\langle D_{s2}^*(p',\varepsilon)|J_\mu^{tr}|B_s(p)\rangle\langle B_s(p)|J_{B_s}^t|0\rangle}{(p^2-m_{B_s}^2)(p'^2-m_{D_{s2}^*}^2)} + \ldots \quad (3.16)$$

elde edilir.

Burada matris elemanları aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{aligned}
&\langle 0|J^{D_{s2}^*}_{\alpha\beta}|D^*_{s2}(p',\varepsilon)\rangle = m^3_{D^*_{s2}} f_{D^*_{s2}} \varepsilon_{\alpha\beta},\\
&\langle B_s(p)|J^t_{B_s}|0\rangle = -i\frac{f_{B_s} m^2_{B_s}}{m_s+m_b},\\
&\langle D^*_{s2}(p',\varepsilon)|J^{tr}_{\mu}|B_s(p)\rangle = h(q^2)\varepsilon_{\mu\nu\alpha\beta}\varepsilon^{*\nu\lambda}P^{\lambda}P_{\alpha}q^{\beta} - iK(q^2)\varepsilon^{*\mu\nu}P^{\nu}\\
&-i\varepsilon^{*\alpha\beta}P^{\alpha}P^{\beta}\left[P_{\mu}b_+(q^2)+q_{\mu}b_-(q^2)\right],
\end{aligned} \tag{3.17}$$

burada $q = p - p', P = p + p'$; f leptonik bozunum sabitlerini; ε polarizasyon tensörü; $h(q^2), K(q^2), b_+(q^2)$ ve $b_-(q^2)$ geçiş form faktürlerini göstermektedir (Azizi vd., 2015).

Üç nokta korelasyon fonksiyonu, q→0 limitinden farklı olduğu durumlarda yeterli değildir. Bu durumda Işık Konisi KRD toplam kuralları yöntemi kullanılabilir. Bu sayede geçiş genliği, dallanma oranı, kuplaj sabiti gibi hadronik niceliklerin yanında manyetik alınganlık terimini de elde edebiliriz (Aliev vd., 2017). Işık Konisi KRD toplam kurallarında, üç nokta korelasyon fonksiyonu yerine dış alanda iki nokta korelasyon fonksiyonu düşünülebilir ve güçlü bozunum $X_b \to B_s^0\pi$ kanalına ait korelasyon fonksiyonu;

$$\Pi(p,q) = i\int d^4x e^{ip.x}\langle \pi(q)|T\left\{J^{B_s}(x)J^{X_b^+}(0)\right\}|0\rangle \tag{3.18}$$

şeklinde ifade edilir. Burada p, q ve p' = p + q sırasıyla B_s^0, π ve X_b'nin momentumları, J(x) ise ara kesit akımıdır.

İstenilen fiziksel parametreler hesaplanır. Hesaplamalar ağır ve oldukça uzun matematiksel işlemler içerdikleri için elde yapılması mümkün değildir; bundan dolayı hem analitik hem de nümerik hesaplamalar, oluşturulacak Mathematica programlamaları yardımı ile yapılabilir. Bu sebeple yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır.

3.1. Borel Dönüşümü

Korelasyon fonksiyonunun fiziksel parametrelerin fonksiyonu olan fiziksel kısmı ile q^2, α_s, kuark kütlesi ve operatörlerin vakum beklenen değerlerinin fonksiyonu olan KRD kısmı elde edilir ve bu iki temsil eşitlenir. Ancak bu aşamada KRD kısmında yüksek boyutlu operatörlerden gelen katkılar, yeterli düzeyde bastırılamamış ve fiziksel kısmında kütle spektrumu en düşük kütle seviyesine indirgenememiştir. Bu nedenle her iki kısma Borel dönüşümü adı verilen yöntem uygulanır. Borel dönüşümü yönteminin amacı $Q^2 = -q^2$ ye

göre yeteri kadar türev almaktır. Q^2 değeri arttığında türev sayısı n de keyfi olarak artar ve limit alınır. $Q^2 \to \infty$ durumu ortaya çıktığında, sonsuz kere türev alarak sonsuzluktan ve süreklilikten gelen katkılar bastırılmış olur.

Bu durumda $\frac{Q^2}{n} \equiv M^2$ sabitlemesi seçilebilir ve Q^2 yerine M^2 Borel kütlesi denilen yeni bir yardımcı değişken tanımlanır. Bu parametre fiziksel bir anlam taşımaz, hesaplamalarda matematiksel kolaylık sağlar. Bu sebeple hesaplarda karşılaşılan fiziksel nicelikler bu parametreden bağımsız olmalıdır. KRD toplam kurallarına, yüksek boyutlu yoğuşmalardan gelen katkıların ihmal edilmesi nedeniyle M^2'nin çok küçük değerleri uygulanamaz, bununla beraber M^2'nin oldukça büyük değerlerinde de kuark-hadron ikiliği yaklaşımına güvenilemez. Sonuç olarak Borel dönüşümü;

$$B_{M^2}\Pi(Q^2) = \lim_{\substack{Q^2,n\to\infty \\ \frac{Q^2}{n}\to M^2}} \frac{(Q^2)^{n+1}}{n!}\left(\frac{d}{dQ^2}\right)^n \Pi(Q^2) \tag{3.19}$$

şeklinde tanımlanır.

Bazı fonksiyonların Borelleri için Denklem (3.19) eşitliği kullanılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir (Aliev ve Shifman, 1982);

$$B_{M^2}(Q^2)^n = 0\,,\ n \geq 0 \tag{3.20}$$

$$B_{M^2}\frac{1}{(m^2 - Q^2)^n} = \frac{1}{(n-1)!}\frac{1}{(M^2)^{n-1}} e^{-\frac{m^2}{M^2}} \tag{3.21}$$

$$B_{M^2}(e^{-\alpha Q^2}) = \delta\left(\frac{1}{M^2} - \alpha\right) \tag{3.22}$$

Kütle ve bozunum sabiti hesaplamalarında kullanılan Borel dönüşümünün genel ifadesi;

$$B\frac{1}{(p^2 - m^2)^s} \to (-1)^s \frac{1}{\Gamma(s)} e^{-\frac{m^2}{M^2}} \frac{1}{(M^2)^{s-1}} \tag{3.23}$$

Etkileşme (kuplaj) sabiti hesaplamalarında kullanılan çift Borel dönüşümünün genel ifadesi ise;

$$B\frac{1}{(p^2-m_1^2)^s(p'^2-m_2^2)^n}\rightarrow(-1)^{s+n}\frac{1}{\Gamma(s)}\frac{1}{\Gamma(n)}e^{-\frac{m_1^2}{M^2}}e^{-\frac{m_2^2}{M'^2}}\frac{1}{(M^2)^{s-1}}\frac{1}{(M'^2)^{n-1}} \quad (3.24)$$

şeklinde tanımlanır. Burada M ve M' sırasıyla p^2 ve p'^2 momentumlarına karşılık gelen Borel kütle parametrelerini temsil eder.

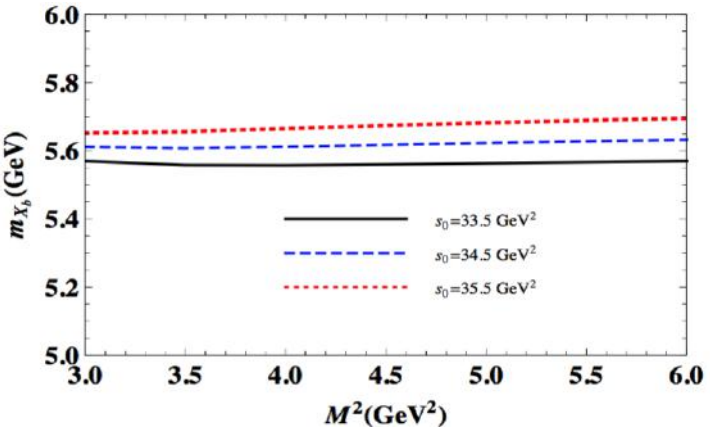
4. BULGULAR

4.1 Egzotik Parçacıkların Spektroskopik Parametreleri ve Güçlü Bozunumları

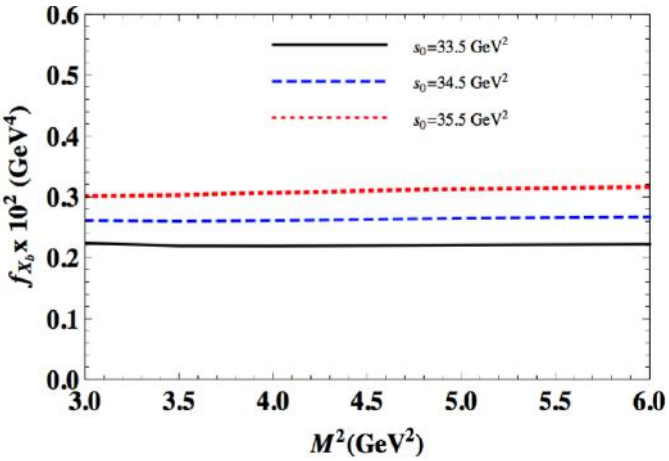
Egzotik parçacıkların kütle ve bozunma sabiti gibi spektroskopik özellikleri iki nokta Kuantum Renk Dinamiği Toplam Kuralları (KRDTK) çerçevesinde çalışılmış; deneysel ve diğer teorik modellerdeki sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Ayrıca bu egzotik parçacıkların güçlü etkileşimleri Işık Koni Toplam Kuralları (IKTK) kullanılarak incelenmiş; geçişlere ait güçlü kuplaj sabitleri elde edilerek bozunma genişlikleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle ve literatürdeki diğer teorik modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Proje kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda verilmektedir.

Makale: Mass and Decay Constant of The Newly Observed Exotic X(5568) State (Phys. Rev. D 93, no. 7, 074024 (2016)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Proje kapsamında yapılan çalışma, 25.02.2016 tarihinde D0 İşbirliği tarafından gözlemlendiği rapor edilen dörtkuark yapıdaki $X(5568)$ egzotik parçacığı üzerinedir. Bu parçacığın özelliği bir ağır üç hafif kuark (b,u,d,s) olmak üzere dört farklı kuarktan oluşmasıdır ve bu özelliğinden dolayı önemli bir paçacıktır çünkü dört farklı kuarktan oluşan ilk egzotik parçacıktır. D0 İşbirliğinin raporundan hemen sonra bu parçacığın kütle ve bozunma sabiti teorik olarak literatürde ilk defa çalışılmıştır. KRD toplam kuralları, Borel kütle parametresi M^2 ve süreklilik eşiği s_0 olmak üzere iki yardımcı parametre içerir. Bu yardımcı parametreler fiziksel nicelikler olmadıklarından elde edilen sonuçların bu parametrelere çok bağlı olmaması istenir. X(5568) parçacığının kütle ve bozunma sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 1 ve Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 1. m_{X_b} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.



Şekil 2. f_{X_b} bozunma sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı

X(5568) egzotik parçacığı için elde edilen kütle ve bozunma sabiti değerleri Tablo 1.' de verilmiştir.

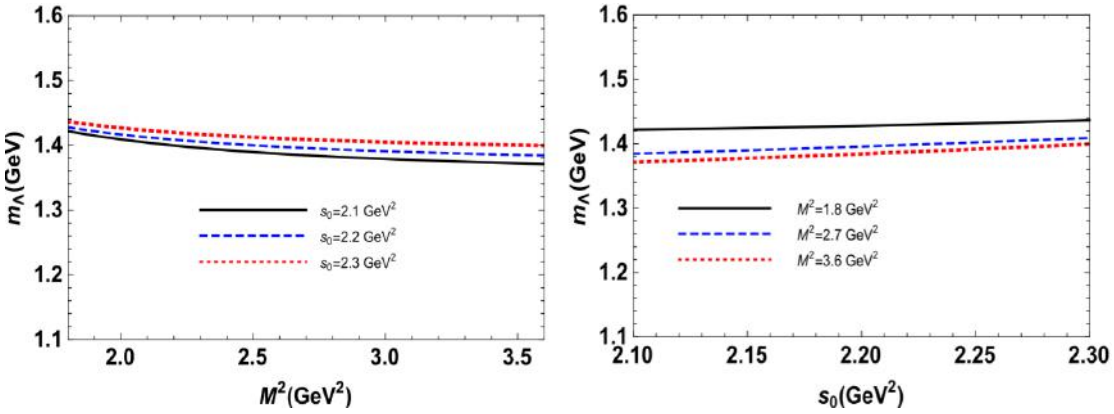
Tablo 1. X(5568) parçacığının kütle ve bozunma sabiti değerleri.

m_{X_b}(MeV)	5584±137
f_{X_b}(GeV^4)	(0.24±0.02) x10^{-2}

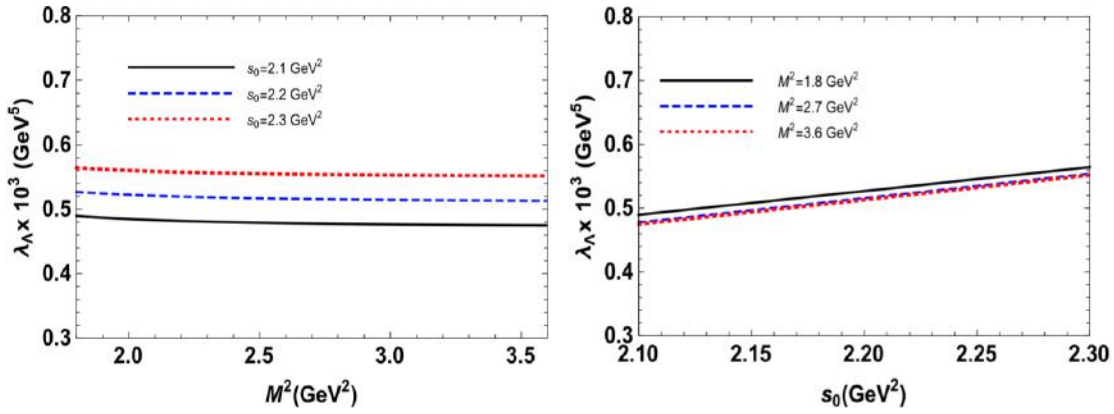
Bu çalışmada $X(5568)$'in kuantum sayısı $J^{PC} = 0^{++}$ olan skalar parçacık olduğu ve dikuark-antidikuark yapıdaki arakesit akımı göz önüne alınarak iki nokta KRDTK yöntemiyle incelenmiştir. Kütle için elde edilen sonuç hata payı çercevesinde deneysel sonuç ile uyuşmaktadır. Bozunma sabiti için elde edilen sonuç gelecekte bu parçacık için yapılacak deneylere ve teorik çalışmalara ışık tutacaktır (Agaev vd., 2016a).

Makale: Mass and residue of Λ(1405) as a hybrid baryon (Eur. Phys.J. Plus 133, no.3, 121 (2018)), K. Azizi, B. Barsbay , H. Sundu

Farklı bir çalışmada, CLAS İşbirliği tarafından $\overline{K}$N rerezonans ve I(J^P)=0(1/2$^-$) kuantum numarasına sahip $\Lambda(1405)$ egzotik parçacığının qqqg hybrid baryon olma durumu göz önüne alınarak bu parçacığın kütle ve rezidüsü iki nokta KRDTK metodu ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, on boyuta kadar kuark, gluon ve karışık kondensatlar hesaba katılmıştır. $\Lambda(1405)$ parçacığının kütle ve rezidüsünün Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 3 ve Şekil 4' de verilmiştir.



Şekil 3. Sol: m_Λ kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_Λ kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



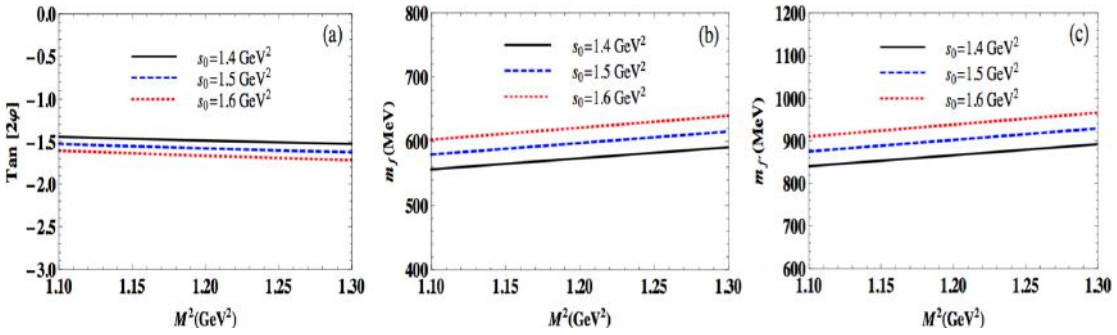
Şekil 4. Sol: λ_Λ rezidü değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: λ_Λ rezidü değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

Bu çalışma proje kapsamında yapılan ve hibritler ile ilgili ilk çalışmamızdır. Kütlesi 1403^{+33}_{-32} MeV ve rezidüsü $(0.52^{+0.05}_{-0.04}\times10^{-3}GeV^5$) olarak elde edilmiştir. $\Lambda(1405)$'in kütlesi için elde edilen sonucun deneysel veri ($1405.1^{+1.3}_{-1.0}$MeV) ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu

parçacığın iç yapısı hakkında çeşitli teoriler mevcuttur. Teorik olarak bulduğumuz kütlenin deney datasına çok yakın olması bu konuya önemli açıklamalar getirip bu parçacığın iç yapısını anlamamızda önemli rol üstlenecektir. Ayrıca Doktora öğrencisi bursiyerimiz bu çalışmaya yüksek lisans tezinde yer vermiştir (Barsbay, 2017; Azizi vd., 2018a).

Makale: The Structure, Mixing Angle, Mass and Coupling of The Light Scalar $f_0(500)$ and $f_0(980)$ Mesons (Phys. Lett. B 781 (2018) 279-282), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Dört-kuark (tetrakuark) yapısında olan $f_0(500)$ ve $f_0(980)$ skaler mezonlarının karışım açıları, kütleleri ve mezon-akım kuplaj sabitleri iki nokta KRDTK metodu ile hesaplanmıştır. KRD toplam kurallarında yardımcı parametreler fiziksel nicelikler olmadıklarından elde edilen sonuçların bu parametrelere çok bağlı olmaması istenir. Elde edilen m_f ve $m_{\acute{f}}$ kütle değerlerinin Borel kütle parametresine ve süreklilik eşiğine bağlılığını gösteren grafikler Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 5. (a) tan2φ, (b) m_f ve (c) $m_{\acute{f}}$ kütle değerlerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.

$f_0(500)$ ve $f_0(980)$ mezonların skaler dikuark-antidikuark bileşenleri, ağır I H > $=\frac{([su][\bar{s}u]+[sd][\bar{s}\bar{d}])}{\sqrt{2}}$ ve hafif I L > = $[ud][\bar{u}\bar{d}]$ olarak ele alınmıştır. Toplam kurallarından, bu durumların karışım açıları φ_H ve φ_L çıkarılarak, $f_0(500)$ ve $f_0(980)$ parçacıklarının kütleleri ve kuplajları elde edilmiştir. Elde edilen fiziksel sonuçlar Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde elde edilen fiziksel sonuçlar

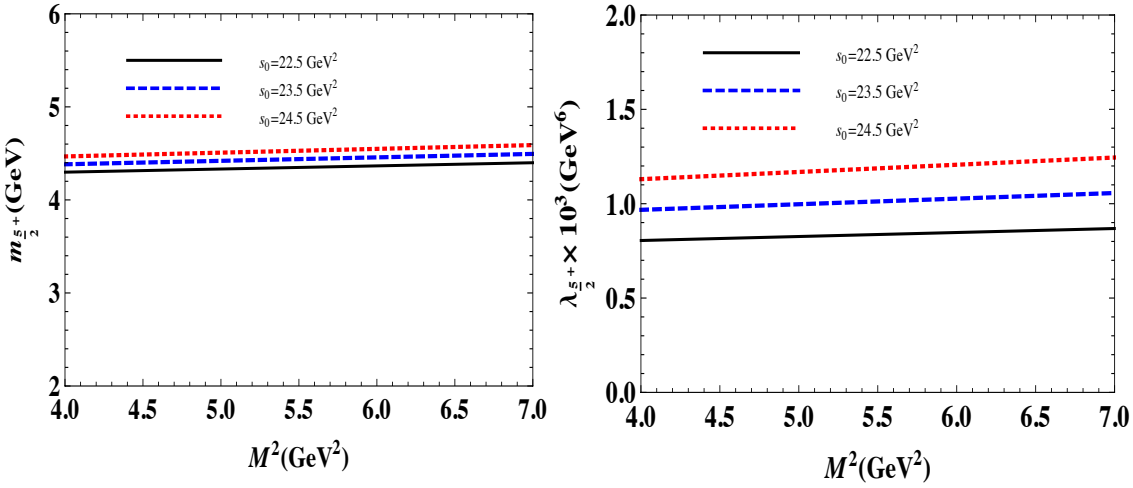
Karışım açıları-Kütleleri-Kuplajları	Sonuçlarımız
φ_H	$-28^0.87\pm0^0.42$
φ_L	$-27^0.66\pm0^0.31$
m_f	(518±74) MeV
$m_{\acute{f}}$	(996±130) MeV
$F_H.10^{-3}$	(1.35±0.34) GeV^4
$F_L.10^{-3}$	(0.68±0.17) GeV^4

Elde edilen kütle değerlerinin deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmadaki asıl amaç; kütlelerin yanı sıra mezon akım kuplaj sabitlerinin de hesaplanmasıdır. Çünkü bu fiziksel parametreler $f_0(500)$ ve $f_0(980)$ skaler mezonlarının güçlü, zayıf ve elektromanyetik bozunmalarıyla ilgili bir çok parametrenin hesaplanmasında temel girdileri oluşturmaktadır (Agaev vd., 2018a).

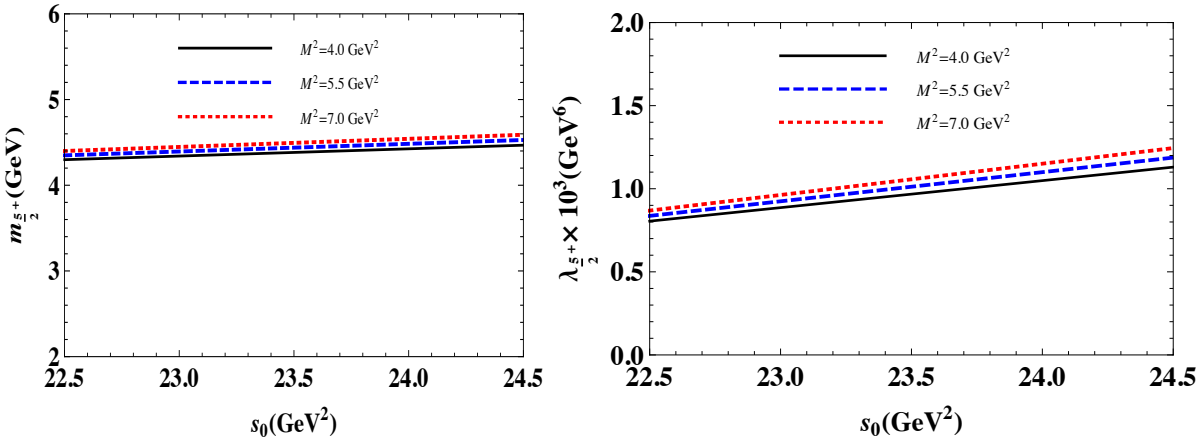
Makale: Analysis of $P_c(4380)$ and $P_c(4450)$ as pentaquark states in the molecular picture with QCD sum rule (Phys. Rev. D 95, 094016 (2017)), K. Azizi, Y. Sarac, H. Sundu

Proje kapsamında, LHCb İşbirliği tarafından 2015 yılında gözlemlendiği rapor edilen beş-kuark (pentakuark) yapılardaki $P_c(4380)$ ve $P_c(4450)$ egzotik parçacıklarının kütleleri ve rezidüleri KRDTK metodu ile incelenmiştir. Hesaplamalarda, $P_c(4380)$ durumu için moleküler bir akım ve $P_c(4450)$ durumu için de moleküler karışım akımı göz önüne alınmıştır. Son yıllarda deneysel alanda gerçekleşen gelişmeler pentakuark durumlarının doğası ve içyapısı hakkında bilgi edinmek için daha derinlemesine çalışılmalar yapılması ihtiyacını doğurmuştur. Bu parçacıkların spektroskopik ve elektromanyetik özelliklerinin yanı sıra güçlü ve zayıf geçişleri üzerine yapılan teorik araştırmalar gelecek deneysel çalışmalara önemli bilgiler sağlayabilir. Bunun yanı sıra yeni teorik bulguların var olan teorik ve deneysel bilgilerle karşılaştırılmasının hem bu parçacıkların doğasının hem de güçlü etkileşme dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasında etkisi olacaktır. Bu motivasyon ile bu çalışmada spin-pariteleri $J^P = \frac{3^\pm}{2}$ ve $J^P = \frac{5^\pm}{2}$ olan gizli-tılsımlı pentakurakların kütle ve rezidü değerleri hesaplanmıştır.

Bu çalışma neticesinde elde edilen kütle ve rezidü sonuçlarına örnek olması için pozitif pariteye sahip $J = \frac{5}{2}$ pentakuark durumunun kütle ve rezidü değerlerinin M^2 ve s_0 parametreleri ile değişimini gösteren grafikler Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Sol: $J^P = \frac{5^+}{2}$ pentakuark için farklı sabit süreklilik parametresi s_0 değerlerinde kütlenin Borel parametresi M^2 ile değişimi. Sağ: $J^P = \frac{5^+}{2}$ pentakuark için farklı sabit süreklilik parametresi s_0 değerlerinde rezidü değerinin Borel parametresi M^2 ile değişimi.



Şekil 7. Sol: $J^P = \frac{5^+}{2}$ pentakuark için farklı sabit Borel parametresi M^2 değerlerinde kütlenin süreklilik eşiği s_0 parametresi ile değişimi. Sağ: $J^P = \frac{5^+}{2}$ pentakuark için farklı sabit Borel parametresi M^2 değerlerinde rezidü değerinin süreklilik eşiği s_0 parametresi ile değişimi.

Bu çalışmada spin-pariteleri $J^P = \frac{3^\pm}{2}$ ve $J^P = \frac{5^\pm}{2}$ olan gizli-tılsımlı pentakuraklar için elde edilen kütle ve rezidü değerleri Tablo 3' te verilmiştir.

Tablo 3. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde pentakuarklar için elde edilen kütle ve rezidü sonuçları

	m (GeV)	λ (GeV^6)
$\frac{3^+}{2}$	4.24 ± 0.16	$(0.59 \pm 0.07)\times10^{-3}$
$\frac{3^-}{2}$	4.30 ± 0.10	$(0.94 \pm 0.05)\times10^{-3}$
$\frac{5^+}{2}$	4.44 ± 0.15	$(1.01 \pm 0.23)\times10^{-3}$
$\frac{5^-}{2}$	4.20 ± 0.15	$(0.51 \pm 0.09)\times10^{-3}$

Kütleler ve rezidüler için elde edilen sonuçlar, LHCb'nin deneysel verileri ve diğer teorik tahminlerle karşılaştırılmıştır. Kütleler için elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu hesapta hem pozitif hem de negatif pariteli parçacıklar ele alınmış ve spin-$\frac{3}{2}$ pentakuark durumu için antitılsımlı mezon-tılsımlı baryon $\overline{D}^*\Sigma_c$ moleküler yapıda bir akım ve spin-$\frac{5}{2}$ pentakuark durumu için de $\overline{D}\Sigma_c^*$ ve $\overline{D}^*\Lambda_c$ antitılsımlı mezon-tılsımlı baryon karışım bir akım kullanılmıştır. Sonuçlarımızın LHCb dataları ile kıyaslaması, $P_c(4380)$ parçacığının negatif pariteli spin-3/2 anti-tılsımlı meson—tılsımlı baryon molekülü olma durumunu ve $P_c(4450)$ parçacığının pozitif pariteli spin-5/2 anti-tılsımlı meson—tılsımlı baryon molekülü olma durumunu göstermektedir. Karşıt-pariteye sahip parçacıklar için elde edilen sonuçlar, bu parçacıkların deneyde araştırılmasına ışık tutabilir. Elde edilen kütle ve rezidüler, beşkuark yapılardaki egzotik parçacıkların elektromanyetik özelliklerinin ve güçlü bozunumlarının analizinde temel oluşturmaktadır. Bu nedenle bu tip çalışmalar, bu parçacıkların iç yapılarının ve geometrik şekillerinin, yük dağılımlarının ve güçlü etkileşmelerinin araştırılmasında oldukça ihtiyaç duyulan ve büyük öneme sahip çalışmalardır. Elde edilen teorik bulguların var olan ve gelecekte yapılacak deneysel çalışmalardan elde edilecek datalar ile karşılaştırılması bu parçacıkların kuark yapılarını anlamamızda ve egzotik parçacıkların kuantum renk dinamiği üzerine faydalı bilgiler sağlayacaktır (Azizi vd., 2017a).

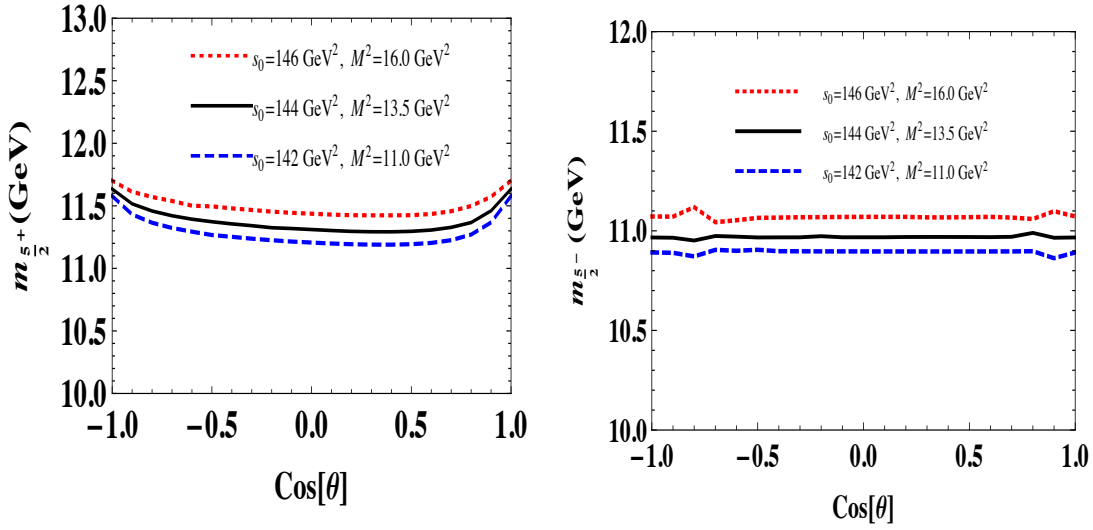
Makale: Hidden Bottom Pentaquark States with Spin 3/2 and 5/2 (Phys. Rev. D **96**, no. 9, 094030 (2017)) , K. Azizi, Y. Sarac, H. Sundu

Yakın zamanda LHCb işbirliği tarafından gözlemlenen beş-kuark iç yapısına sahip pentakuark durumlarının teorik çalışmaları bu parçacıkların iç yapıları ve doğaları hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu pentakuarkların ve pentaquark sınıfına ait benzer yapılar içeren parçacıkların kütle ve rezidü gibi spektroskopik parametrelerinin çalışılmasına gerek duyulmaktadır. Çünkü kütle ve rezidü gibi değerler pentakuarkların diğer parçacıklarla elektromanyetik, güçlü ve zayıf etkileşmelerinin araştırmalarında ana girdi parametreleri olarak kullanılmaktadır. Eğer parçacık fiziğinin tarihsel gelişimine bakılacak olursa, parçacıkların gözlemlenmesi bir sıra içerisinde gerçekleşir. Alt kuark içeren baryonların gözlemlenmesi tılsımlı kuark içeren baryonların gözlemlenmesini takip eder. Bu nedenle gözlemlenmiş olan tılsımlı pentakuark durumlarının peşi sıra bunların benzeri olan ve alt kuark içeren pentakuarkların gözlemlenmesinin beklenmesi oldukça doğaldır. Bu nedenle olası alt pentakuark durumlarının spektroskopik ve elektromanyetik özelliklerininin yanı sıra güçlü ve zayıf geçişlerinin araştırılması gelecek deneysel araştırmalara önemli bilgiler sağlar. Bu tip teorik çalışmalar, elde edilen sonuçların var olan teorik ve deneysel bulgular ile karşılaştırılması vasıtasıyla, aynı zamanda hem bu parçacıkların doğalarını hem de güçlü etkileşmenin dinamiklerini anlamamız açısından oldukça yararlıdır. Bu çalışma bu motivasyon gözönüne alınarak ortaya konulmuştur.

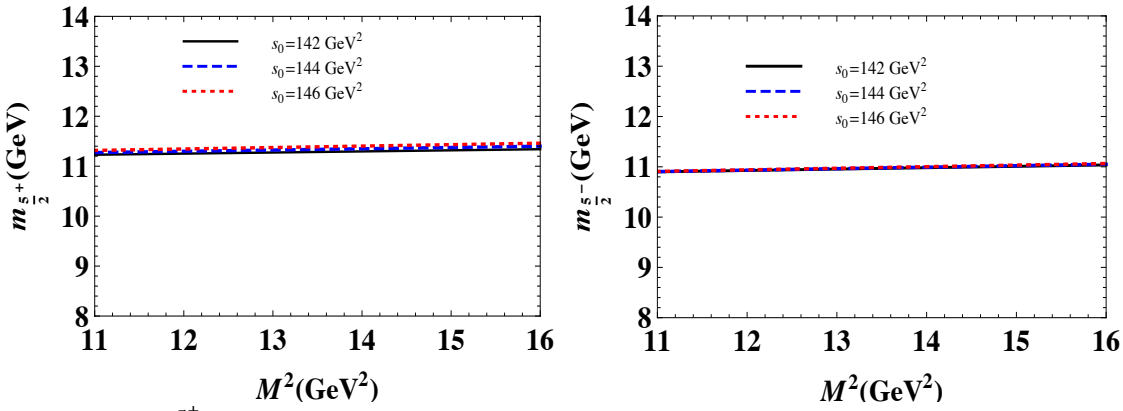
Bu çalışmada hem pozitif hem de negatif pariteye sahip alt kuark içeren spin-3/2 ve spin-5/2 pentakuark durumlarının kütle ve rezidü değerleri kuantum renk dinamiği toplam kuralları kullanılark hesaplanmıştır. Hesaplamalarda spin-3/2 pentaquark durumu için moleküler yapıdaki akım ve spin-5/2 durumu için de moleküler karışım bir akım kullanılmıştır.

KRD toplam kuralları hesabından elde edilen kütle ve rezidü sonuçlarının bağımlı olduğu yardımcı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler sırası ile Borel parametresi M^2, süreklilik eşiği parametresi s_0 ve spin-5/2 parçacığa ait akım içerisinde bulunan β parametresidir. Bu parametreler fiziksel parametreler olmadığından sonuçların bunlara bağımlılığının oldukça zayıf olması gerekir. Örnek olması adına çalışma neticesinde spin-5/2 pentakuark durumu için elde ettiğimiz sonuçların bahsedilen parametrelerle değişimini gösteren grafikler aşağıda (Şekil 8, 9 ve 10) verilmiştir. Bu grafiklerden ilki spin-5/2 parçacığa ait akım içerisinde yer alan β parametresi için olan grafiktir. Burada parametrik çizim kullanılmıştır ve $\beta=\tan\theta$ olarak alınır. Şekil 8'de verilen grafikte görüldü üzere bu parametre için $-0.5 \leq \cos\theta \leq 0.5$ aralığında hem pozitif hem de negatif pariteli duruma ait kütleler için

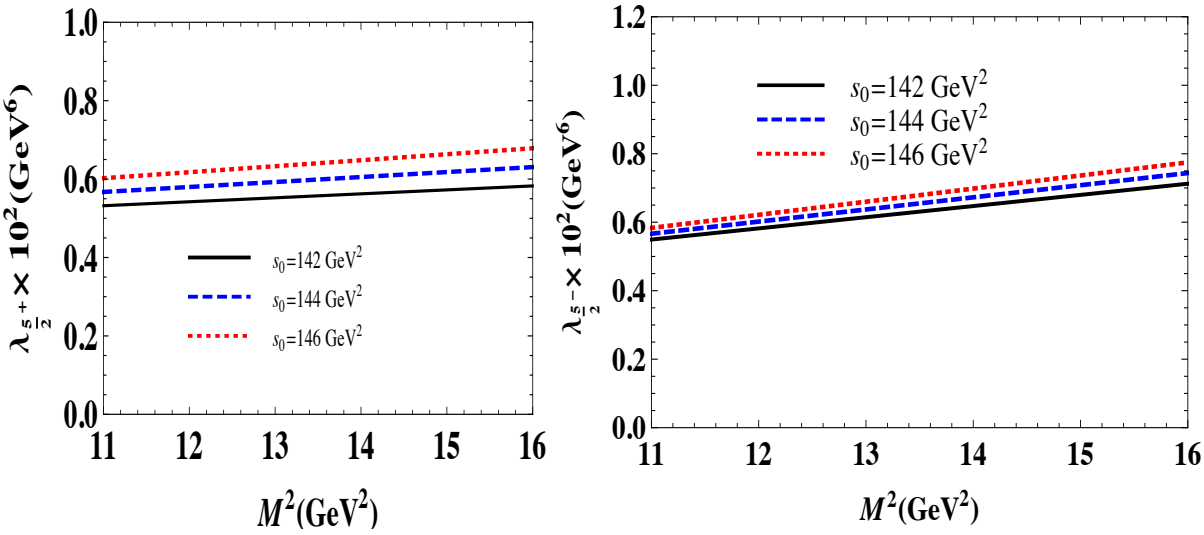
istenilen zayıf bağımlılık elde edilmektedir. Spin-5/2 pentakuark için hem pozitif hem de negatif pariteli durumlara ait kütle ve rezidü sonuçlarının Borel parametresine olan bağımlılığını gösteren grafikler Şekil 9 ve Şekil 10' da verilmiştir. Yine bu grafiklerde de elde edilen sonuçların bahsedilen parametrelere olan bağımlıklıklarının oldukça zayıf olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Sol: $J^P=\frac{5^+}{2}$ pentaquark için kütlenin cosθ'ya bağımlılığını gösteren grafik. Sağ: $J^P=\frac{5^-}{2}$ pentaquark için kütlenin cosθ'ya bağımlılığını gösteren grafik.



Şekil 9. Sol: $J^P=\frac{5^+}{2}$ pentakuark için kütlenin Borel parametresi M^2 ile değişimini gösteren grafik. Sağ: $J^P=\frac{5^-}{2}$ pentakuark için kütlenin Borel parametresi M^2 ile değişimini gösteren grafik.



Şekil 10. Sol: $J^P=\frac{5^+}{2}$ pentakuark için rezidü değerinin Borel parametresi M^2 ile değişimini gösteren grafik. Sağ: $J^P=\frac{5^-}{2}$ pentakuark için rezidü değerinin Borel parametresi M^2 ile değişimini gösteren grafik.

KRD toplam kuralları hesabından hem spin-3/2 hem de spin-5/2 durumları için elde edilen kütle ve rezidü sonuçları Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 4. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde alt kuark içeren pentakuarklar için elde edilen kütle ve rezidü sonuçları.

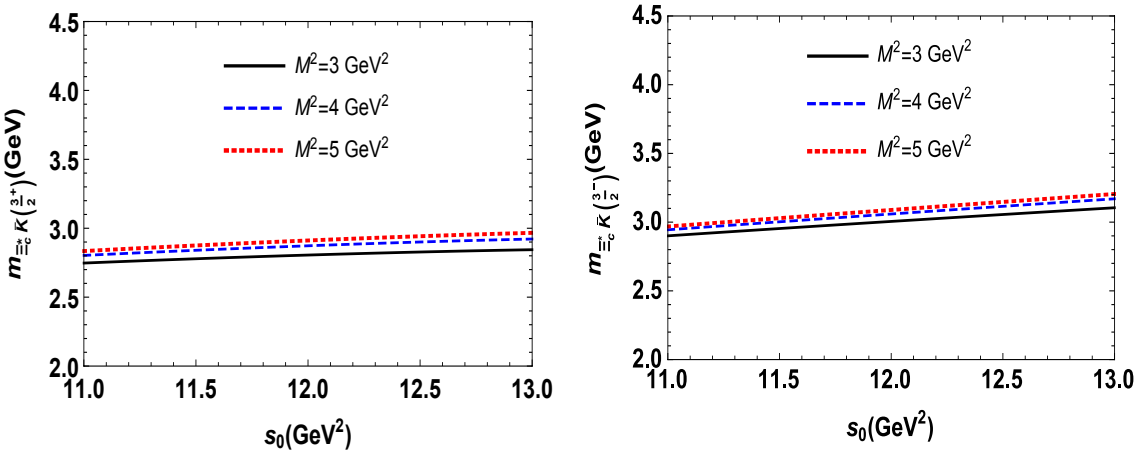
J^P	m (GeV)	λ (GeV^6)
$\frac{3^+}{2}$	$10.93^{+0.82}_{-0.85}$	$(0.22^{+0.04}_{-0.04})\times10^{-2}$
$\frac{3^-}{2}$	$10.96^{+0.84}_{-0.88}$	$(0.36^{+0.05}_{-0.05})\times10^{-2}$
$\frac{5^+}{2}$	$11.94^{+0.84}_{-0.82}$	$(0.60^{+0.15}_{-0.16})\times10^{-2}$
$\frac{5^-}{2}$	$10.98^{+0.82}_{-0.82}$	$(0.19^{+0.04}_{-0.03})\times10^{-2}$

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar var olan diğer teorik çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu tür çalışmalardan elde edilen bulgular ileride yapılabilecek özellikle de LHCb de yapılacak olan alt kuark içeren pentaquarkların deneysel araştırmalarına ışık tutacaktır (Azizi vd., 2017b).

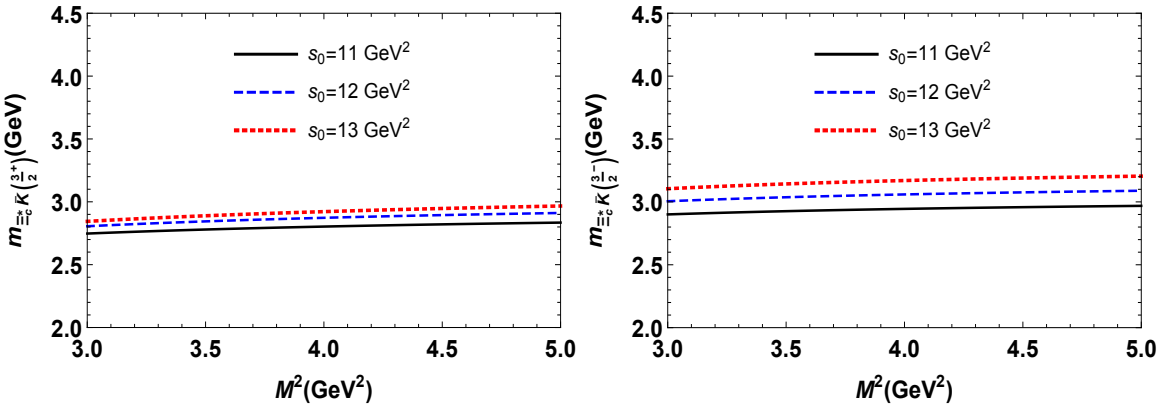
Makale: Possible Molecular Pentaquark States with Different Spin and Quark Configurations (Phys. Rev. D 98, no. 5, 054002 (2018)), K. Azizi, Y. Sarac, H. Sundu

Proje kapsamında beş-kuark içeren ve LHCb işbirliği tarafından gözlemlenmiş $P_c(4380)$ ve $P_c(4450)$ durumlarından farklı olarak ileride gözlemlenmesi muhtemel üç pentaquark adayı

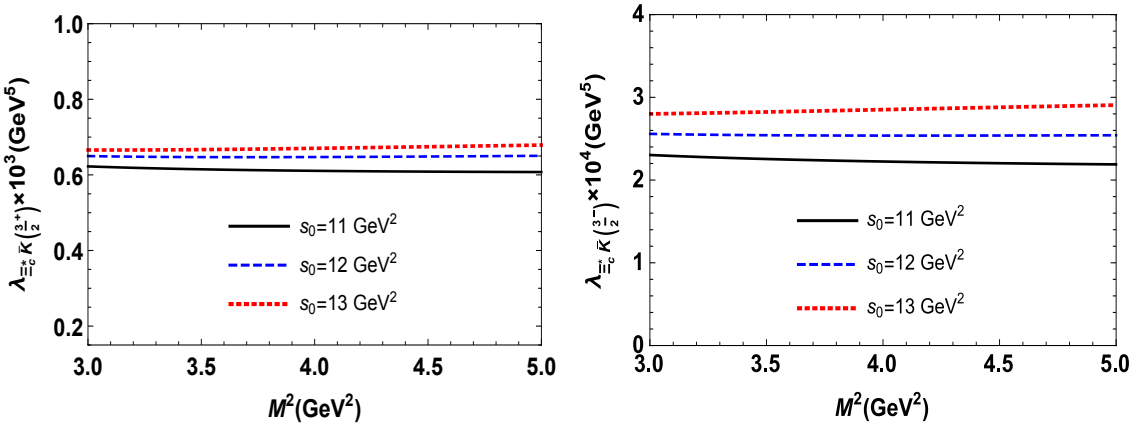
da çalısılmıştır. Bu durumlardan ilki yapısında tek tılsımlı (charm) kuark ve diğer iki durum ise üç tılsımlı (charm) kuark içermetedir. Bu hesaplamalarda bahsi geçen olası parçacıkların kütleleri ve rezidülerinin hesaplanmasında iki nokta toplam kuralları kullanılmış ve her durum için hem pozitif pariteli hem de negatif pariteli durumlar göz önüne alınarak spin-3/2 ve spin-1/2 kuantum sayılarına sahip olası pentakurk durumları çalışılmıştır. Hesaplamalarda moleküler yapıda akımlar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara ve sonuçların yardımcı parametrelere olan bağımlılıklarına örnek olması için pozitif ve negatif pariteli spin-3/2 $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler pentakuark için kütle ve rezidü değerlerinin Borel parametresi M^2 ve süreklilik eşiği parametresi s_0'a bağlı değişimini gösteren grafikler çizilmiştir (Şekil 11, 12, 13 ve 14). Grafiklerin çalışılan fiziksel parametrelerin, olması gerektiği gibi, yardımcı parametrelere olan zayıf bağımlılıklarını ortaya koyduğu açıkça görülmektedir.



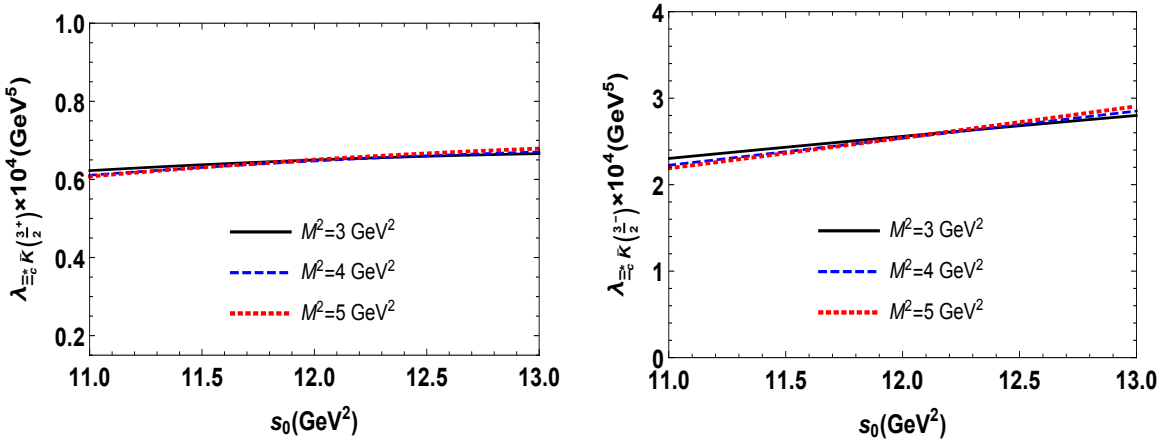
Şekil 11. Sol: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki pozitif pariteli muhtemel pentakuar durumunun kütlesinin farklı Borel parametresi M^2 değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı. Sağ: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki negatif pariteli muhtemel pentakuar durumunun kütlesinin farklı Borel parametresi M^2 değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 12. Sol: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki pozitif pariteli muhtemel pentakuar durumunun kütlesinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı. Sağ: $\Xi_c^*\overline{K}$ moleküler yapıdaki negatif pariteli muhtemel pentakuar durumunun kütlesinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.



Şekil 13. Sol: $\Xi_c^* \bar{K}$ moleküler yapıdaki pozitif pariteli muhtemel pentakuar durumunun rezidü değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^{2,}ye bağımlılığı. Sağ: $\Xi_c^* \bar{K}$ moleküler yapıdaki negatif pariteli muhtemel pentakuar durumunun rezidü değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^{2,}ye bağımlılığı.



Şekil 14. Sol: $\Xi_c^* \bar{K}$ moleküler yapıdaki pozitif pariteli muhtemel pentakuar durumunun rezidü değerinin farklı Borel parametresi M^2 değerlerinde süreklilik eşiği s^{0,}a bağımlılığı. Sağ: $\Xi_c^* \bar{K}$ moleküler yapıdaki negatif pariteli muhtemel pentakuar durumunun rezidü değerinin farklı Borel parametresi M^2 değerlerinde süreklilik eşiği s^{0,}a bağımlılığı.

Tablo 5, hesaplamalar neticesinde olası pentakuark adayları için elde ettiğimiz kütle ve rezidü değerlerini hata payları ile birlikte vermektedir.

Tablo 5. KRD toplam kuralları hesaplarından olası pentakuark durumları için elde edilen kütle ve rezidü sonuçları

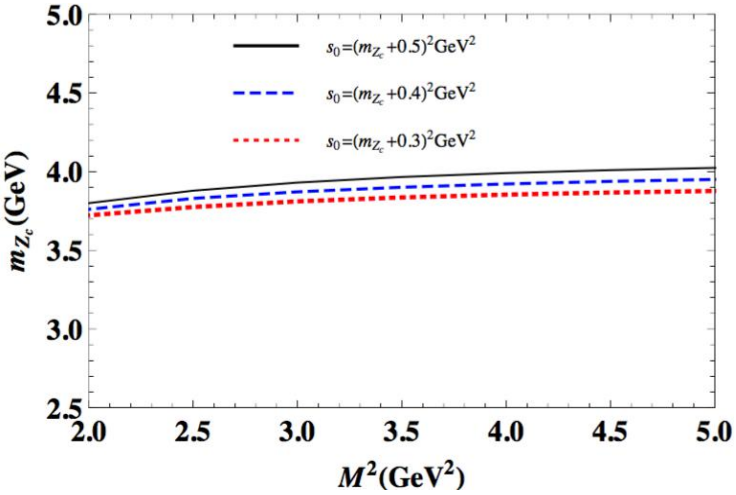
	J^P	m (MeV)	λ (GeV^5)
$\Xi_c^*\overline{K}$	$\frac{3^+}{2}$	2856^{+55}_{-109}	$(0.65^{+0.06}_{-0.03})\times10^{-4}$
	$\frac{3^-}{2}$	3049^{+155}_{-149}	$(2.59^{+0.36}_{-0.36})\times10^{-4}$
$\Xi_{cc}(3621)D^0$	$\frac{3^+}{2}$	5601^{+148}_{-109}	$(1.64^{+0.29}_{-0.28})\times10^{-3}$
	$\frac{3^-}{2}$	5583^{+209}_{-212}	$(1.61^{+0.29}_{-0.27})\times10^{-3}$
$\Xi_{cc}(3621)D^{*0}$	$\frac{3^+}{2}$	5726^{+167}_{-118}	$(4.37^{+0.49}_{-0.43})\times10^{-3}$
	$\frac{3^-}{2}$	5728^{+228}_{-279}	$(4.58^{+0.56}_{-0.58})\times10^{-3}$

Bu çalışmada pentakuark ailesinin üyelerinin belirlenmesinin önemi üzeride durulup bu parçacıklara ait kütle ve rezidü gibi spektroskopik parametereler elde edilmiştir. Ele alınan olası pentakuark durumları tek ve üç tılsımlı kuark içeren parçacıklardır. Bu parçacıklar için moleküler yapıda akımlar kullanılarak KRD toplam kuralları metodu ile kütle ve rezidüleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde bulunan ve farklı kuark konfigürasyonları ile yapılmış olan diğer teorik çalışmaların sonuçları ile kıyaslanmış, sonuçlarımızın bunlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışma gelecekte yapılacak deneylere bilgi sağlayabilir. Ancak bu tip kuark iç yapısına sahip muhtemel pentakuarkların iç yapılarını ayırt etmekte kütle üzerine olan çalışmalar gerekli olmakla beraber yeterli olmayabilir ve bunların olası bozunmaları gibi diğer özelliklerinin de çalışılması gerekmektedir. Bu nedenle hem gelecek deneylere ışık tutmak hem de pentakuark durumların özelliklerini daha iyi anlayabilmek için farklı teorik özelliklerinin çalışılması çok önemlidir. Aynı zamanda, bu tip çalışmalar, hem gözlemlenmiş olan pentakuark durumları hem de KRD'nin pertürbatif olmayan doğası üzerindeki bilgimizi de geliştirecektir. Bu çalışmada elde edilen parametreler ilerde yapılabilecek bu parçacıklara ait elektromanyetik, güçlü ve zayıf geçiş çalışmalarında ana girdi parameterelerini oluşturacaktır (Azizi vd., 2018b).

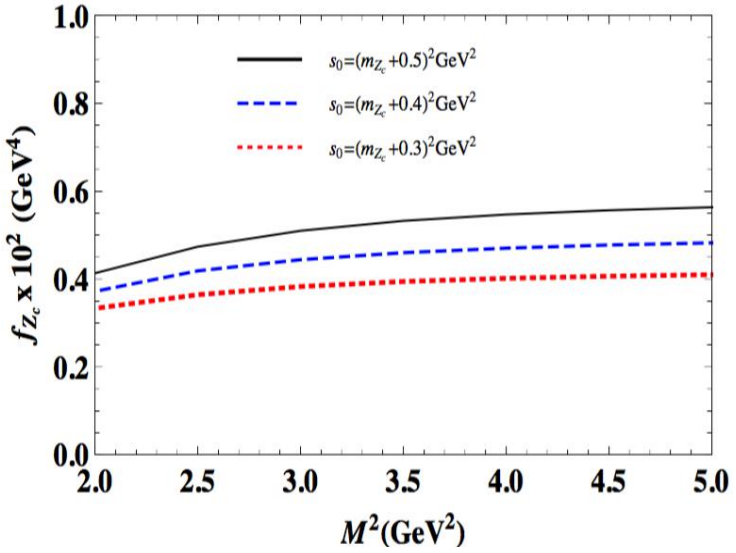
Makale: Strong $Z_c^+(3900) \to J/\psi\pi^+; \eta_c\rho^+$ Decays In QCD (Phys. Rev. D 93, no. 7, 074002 (2016)), S. S. Agaev, K. Azizi, H. Sundu

İlk olarak iki ağır ve iki hafif kuarktan oluşan ($c\bar{c}u\bar{d}$) dörtkuark (tetrakuark) yapısında olan $J^{PC} = 1^{+-}$ kuantum sayısına sahip Z_c egzotik parçacığının kütle ve bozunma sabiti iki nokta KRDTK metodu ile incelenmiştir.

Bu çalışma neticesinde elde edilen kütle ve rezidü sonuçlarına örnek olması için Z_c egzotik parçacığının kütle ve bozunma sabitinin bu parametreler ile değişimini gösteren grafikler Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 15. m_{Z_c} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.



Şekil 16. f_{Z_c} bozunma sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.

Z_c egzotik parçacığının kütle ve bozunma sabiti için elde edilen sonuçlar sırasıyla şu şekildedir:

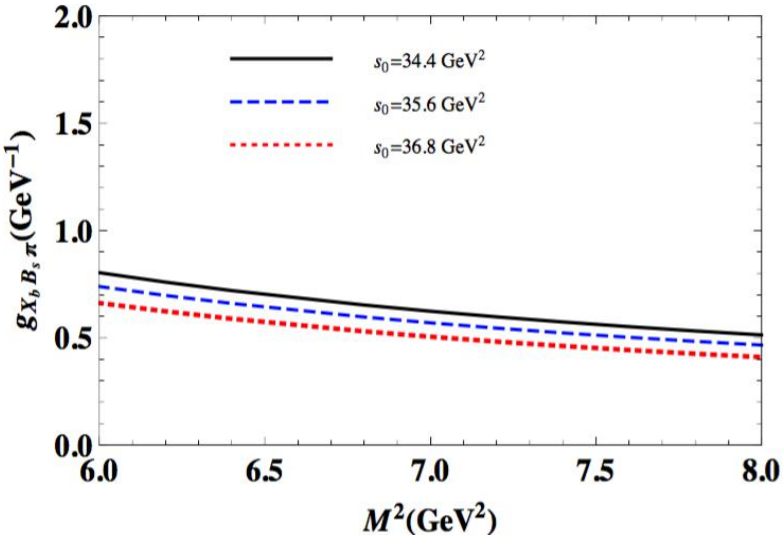
$m_{Z_c} =$ 3900±210 MeV , $f_{Z_c} =$ (0.46±0.03)x10^{-2} GeV^4

Kütle için elde edilen sonucun parçacığın ilk defa gözlendiği BESIII deney sonucu ve daha sonra parçacığı doğrulayan Belle deney sonucu ve literatürdeki diğer teorik sonuç ile uyum içerisinde olduğunu gözlemledik.

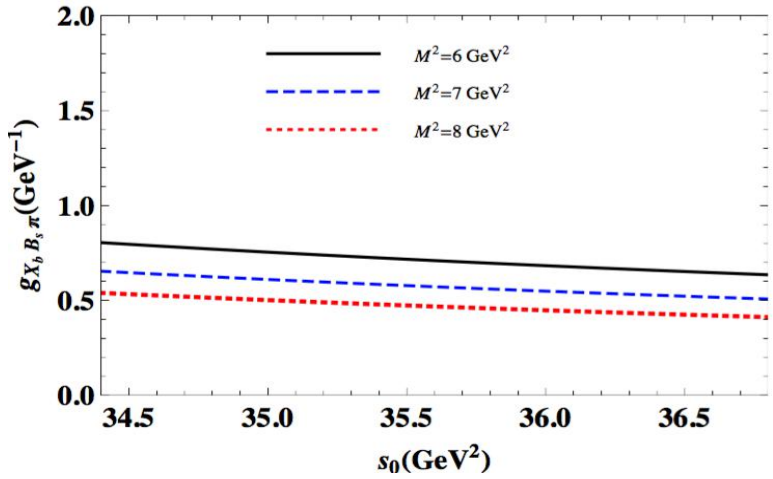
Daha sonra bu parçacığın $Z_c^+(3900) \to J/\psi\pi^+$ ve $Z_c^+(3900) \to \eta_c\rho^+$ güçlü bozunumları IKTK yöntemiyle ve soft $q \to 0$ limit kullanılarak incelenmiştir. Bu geçişlere ait kuplaj sabitleri ve bozunma genişlikleri elde edilmiştir. Z_c' nin toplam bozunma genişliği için elde edilen sonucun deneysel veri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir (Agaev vd., 2016b).

Makale: Width of The Exotic $X_b(5568)$ State Through Its Strong Decay To $B_s^0\pi^+$ (Phys. Rev. D 93, no. 11, 114007 (2016)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Farklı bir çalışmada $X(5568)$ parçacığına ait daha detaylı bilgi edinebilmek için güçlü bozunumu $X_b(5568) \longrightarrow B_s^0\pi^+$ IKTK çercevesinde ve soft $q \to 0$ limit kullanılarak incelenmiştir. Bozunuma ait güçlü kuplaj sabiti $g_{X_bB_s\pi}$ elde edilmiş; bu değer kullanılarak bozunuma ait bozunma genişliği hesaplanmıştır. Hesaplamalarda elde edilen çiftlenim yapı sabitleri fiziksel olmayan yardımcı parametrelere bağımlı olarak elde edilmektedir. Elde edilen fiziksel büyüklüklerin bu parametrelere oldukça zayıf bağımlılığa sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada elde ettiğimiz sonuçların yardımcı parametrelere bağımlılığını örneklemek için çiflenim sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren garfikler Şekil 17 ve Şekil 18' de verilmiştir.



Şekil 17. $g_{X_b B_s \pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.



Şekil 18. $g_{X_b B_s \pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0'a bağımlılığı.

$X_b(5568) \longrightarrow B_s^0 \pi^+$ bozunumuna ait güçlü çiftlenim sabiti ve bozunma genişliği değerleri Tablo 6' da verilmiştir.

Tablo 6. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $X_b(5568) \longrightarrow B_s^0 \pi^+$ bozunumuna ait güçlü çiftlenim sabiti ve bozunma genişliği

$g_{X_b B_s \pi}$(GeV^{-1})	5584$\pm$137
$\Gamma(X_b \longrightarrow B_s^0 \pi^+)$(MeV)	(22.4$\pm$9.2)

Elde edilen bozunma genişliğinin deneysel sonuç ile oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir (Agaev vd., 2016c).

Makale: Charmed Partner of The Exotic X(5568) State and Its Properties (Phys. Rev. D 93, no.9, 094006 (2016)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Diğer bir çalışmada $X(5568)$ parçacığından yola çıkarak bu parçacığın olası tılsımlı (charmed) eşleniği X_c çalışılmıştır. Bu parçacığın kütle ve bozunma sabiti hesaplanmış ve güçlü bozunumu $X_c \to D_s\pi$' na ait güçlü kuplaj sabiti ve bozunma genişliği $J_1^{X_c}$ve $J_2^{X_c}$ olmak üzere iki farklı skaler akım ele alınarak hesaplanmıştır. $J_1^{X_c}$ve $J_2^{X_c}$ skaler akımları için elde edilen fiziksel sonuçlar Tablo 7' de verilmiştir.

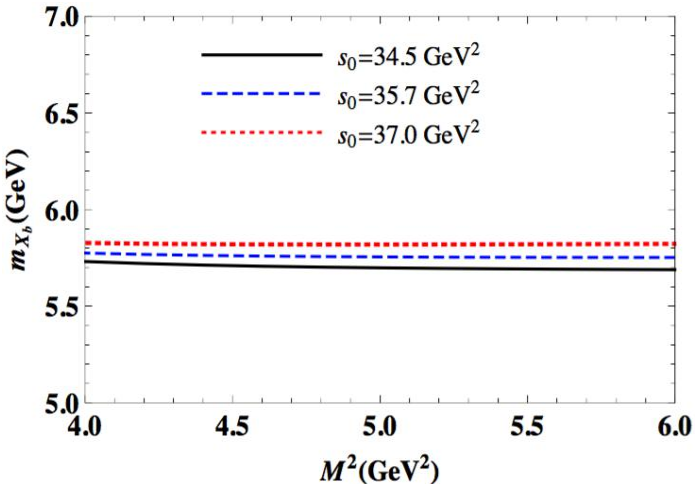
Tablo 7. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $\boldsymbol{X_c}$ parçacığına ait fiziksel sonuçlar

	$J_1^{X_c}$	$J_2^{X_c}$
m_{X_c}	(2590±60) MeV	(2634±62) MeV
f_{X_c}	(0.20±0.03)x10^{-2} GeV^4	(0.11±0.02)x10^{-2} GeV^4
$g_{X_cD_s\pi}$	(0.51±0.10) GeV^{-1}	(0.51±0.11) GeV^{-1}
$\Gamma_{D_s\pi}$	(8.0±2.0) MeV	(8.2±2.1) MeV
g_{X_cDK}	(1.57±0.34) GeV^{-1}	(1.36±0.32) GeV^{-1}
Γ_{DK}	(55.4±14.0) MeV	(45.5±11.4) MeV

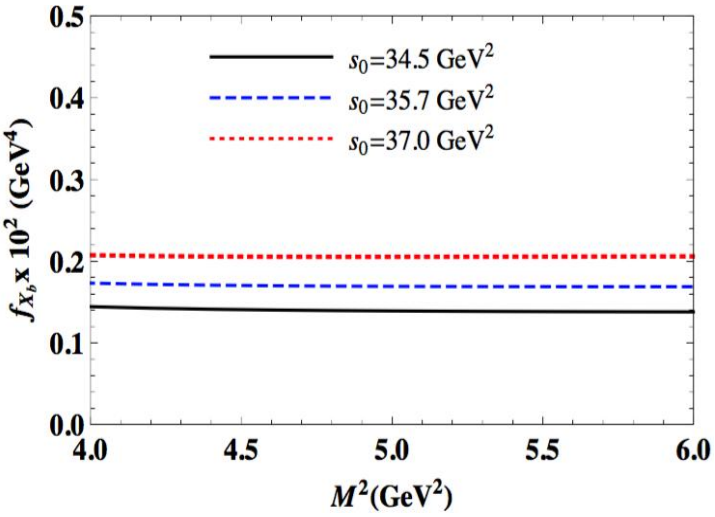
Farklı iki skaler akım kullanılarak X_c durumunun toplam genişliği için elde edilen sonuçların, hata payı çerçevesinde birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışma gelecekte yapılacak deneylere ve teorik çalışmalara ışık tutacaktır (Agaev vd., 2016d).

Makale: Exploring X(5568) As A Meson Molecule (Eur. Phys. J. Plus131, no.10, 351 (2016)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Proje kapsamında, X_b parçacığı molekül yapıdaki ara kesit akımı göz önüne alınarak incelenmiştir. B ve K mezonlarının molekülü şeklinde düşünülen bu parçacığın ilk olarak kütle ve bozunum sabiti elde edilmiştir. X_b parçacığının kütle ve bozunma sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 19 ve Şekil 20' de verilmiştir.



Şekil 19: m_{X_b} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.



Şekil 20: f_{X_b} bozunma sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.

Daha sonra elde edilen kütle ve bozunma sabitinin sonuçlarını girdi parametresi alarak, bu parçacığın baskın olabilecek bozunma kanalını ($X_b \rightarrow B_s\pi$) inceleyerek ve ışık konisi toplama kuralları (soft meson yakalaşımlı) yardımı ile onun genliği (width) hesaplanmıştır. Molekül yapı olarak ele alınan X_b parçacığı için elde edilen fiziksel sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir.

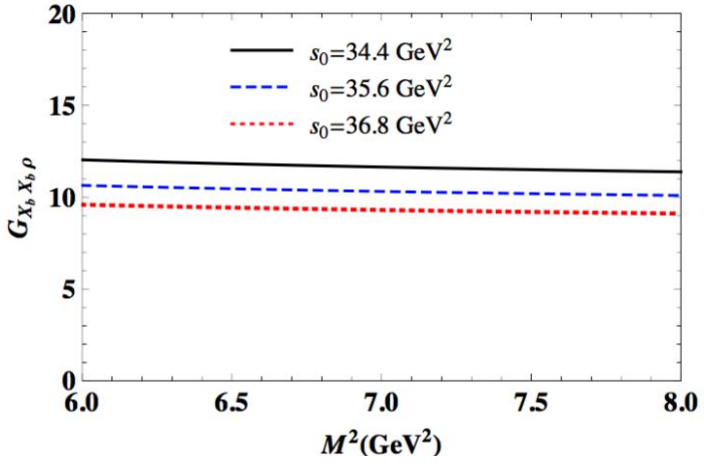
Tablo 8. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde X_b parçacığına ait fiziksel sonuçlar

Kütlesi-Bozunma sabiti-Güçlü çiftlenim sabiti-Bozunma genişliği	Sonuçlarımız
m_{X_b}	(5757±145) MeV
f_{X_b}	(0.17±0.04) GeV^4
$g_{X_b B_s \pi}$	(0.50±0.14) GeV^{-1}
$\Gamma(X_b \to B_s \pi)$	(33.6±12.1) MeV

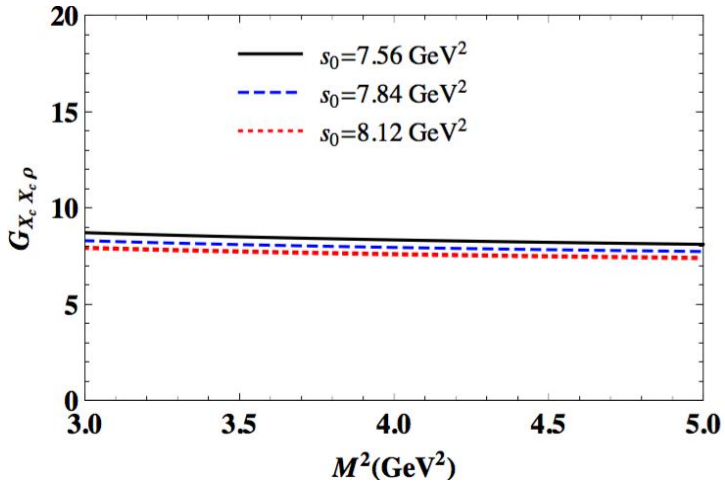
Bu iç-yapı ile bulunan kütle ve genlik deney datası ile kıyaslandığında böyle bir parçacığın B-K molekülü olma olasılığı düşük bulunmuştur (Agaev vd., 2016e).

Makale: Application of The QCD Light Cone Sum Rule To Tetraquarks: The Strong Vertices $X_bX_b\rho$ and $X_cX_c\rho$ (Phys. Rev. D 93, no.11, 114036 (2016)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Rapor döneminde diğer bir çalışmada, X_b ve X_c parçacıklarını daha detaylı inceleyip, bu parçacıkların iç yapısı hakkında detaylı bilgi edinmek için yapılmıştır. Bu bağlamda, $X_bX_b\rho$ ve $X_cX_c\rho$ güçlü geçişleri IKTK yöntemiyle ρ mezonun dağılım genlikleri (DA's) kullanılarak incelenmiş ve bu geçişlere ait güçlü kuplaj sabitleri elde edilmiştir. $X_bX_b\rho$ ve $X_cX_c\rho$ geçişlerine ait güçlü kuplaj sabitlerinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 21 ve Şekil 22' de verilmiştir.



Şekil 21. $G_{X_bX_b\rho}$ güçlü kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.



Şekil 22. $G_{X_cX_c\rho}$ güçlü kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.

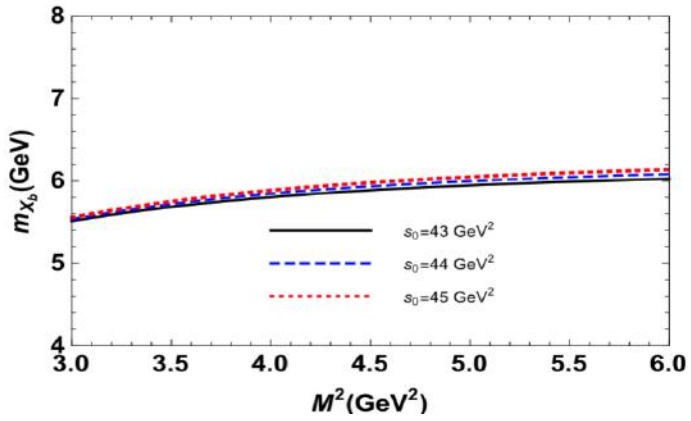
$X_bX_b\rho$ ve $X_cX_c\rho$ geçişlerine ait güçlü kuplaj sabitleri için elde edilen sonuçlar sırasıyla şu şekildedir:

$G_{X_bX_b\rho}$= (10.46±2.26), $G_{X_bX_b\rho}$= (8.01±1.66)

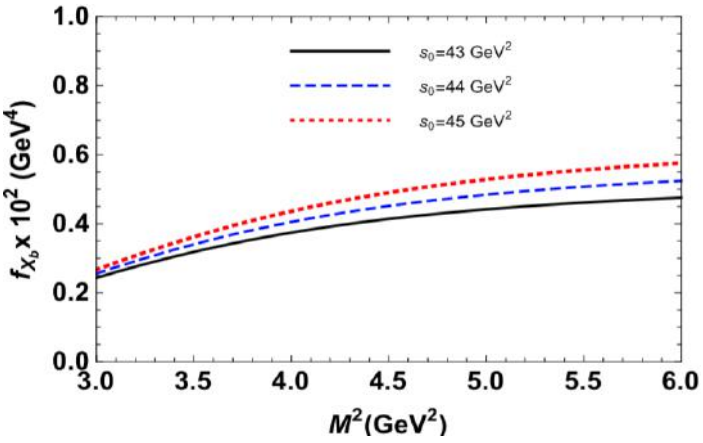
Uygulanan yöntem dört kuarklı sistemlere ilk defa genelletilmiş olup litratürde çok önemli bir açığı kapatmıştır (Agaev vd., 2016f).

Makale: Resonance X(5568) as an exotic axial-vector state (Eur. Phys.J. A 53, no.1, 11 (2017)), S. S.Agaev, K. Azizi, B. Barsbay , H. Sundu

Diğer bir çalışmada, D0 ve LHCb işbirliklerinin X_b parçacığı hakkındaki belirsizliğini açıklayabilmek ve bu parçacık hakkında daha detaylı bilgi edinebilmek için parçacığın $J^P = 1^+$ kuantum numarasına sahip axial-vektör olma durumu göz önüne alınarak, öncelikle parçacığın kütle ve mezon-akım kuplajı gibi spektroskopik özellikleri iki nokta KRD-TK ile elde edilmiştir. Hesaplamalarda, sekiz boyuta kadar kuark, gluon ve karışık kondensatlar hesaba katılmıştır. Elde edilen fiziksel parametrelerin Borel kütle parametresine ve süreklilik eşiğine bağlılığını gösteren grafikler Şekil 23 ve Şekil 24' de verilmiştir.

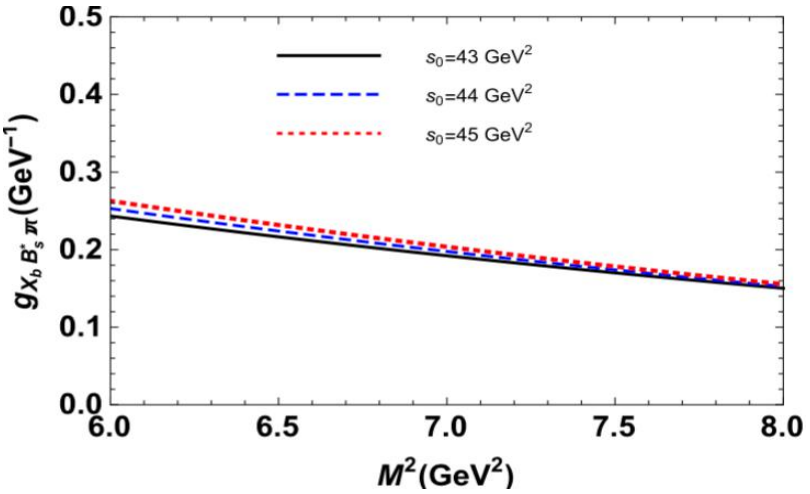


Şekil 23. m_{X_b} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi $M^{2,}$ ye bağımlılığı.

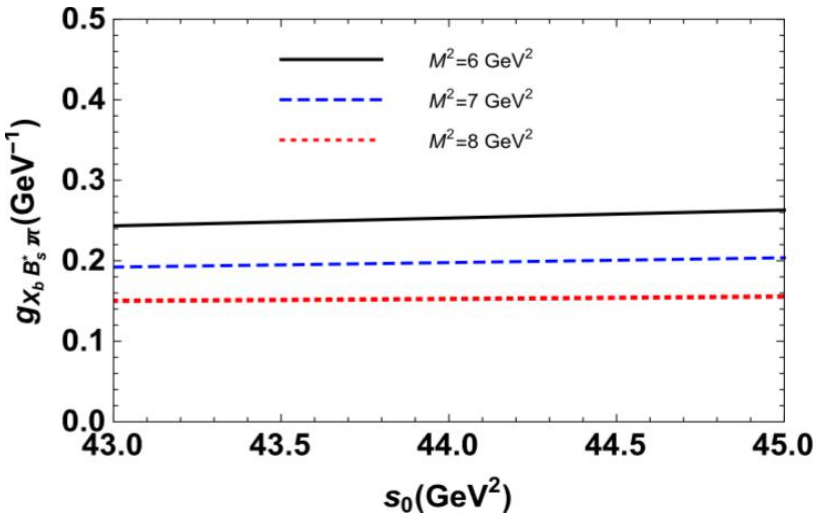


Şekil 24. f_{X_b} mezon-akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı

Elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri giriş parametresi olarak kullanılarak güçlü bozunum $\mathrm{X_b}(5568) \rightarrow \mathrm{B_s^0}\pi^+$ kanalına ait kuplaj sabiti ve bozunma genişliği Işık Koni KRD-TK ve soft mezon limit q→0 kullanılarak hesaplanmıştır. $X_b \longrightarrow B_s^*\pi^+$ kanalına ait güçlü kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 25 ve Şekil 26' da verilmiştir.



Şekil 25. $g_{X_b B_s^* \pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı.

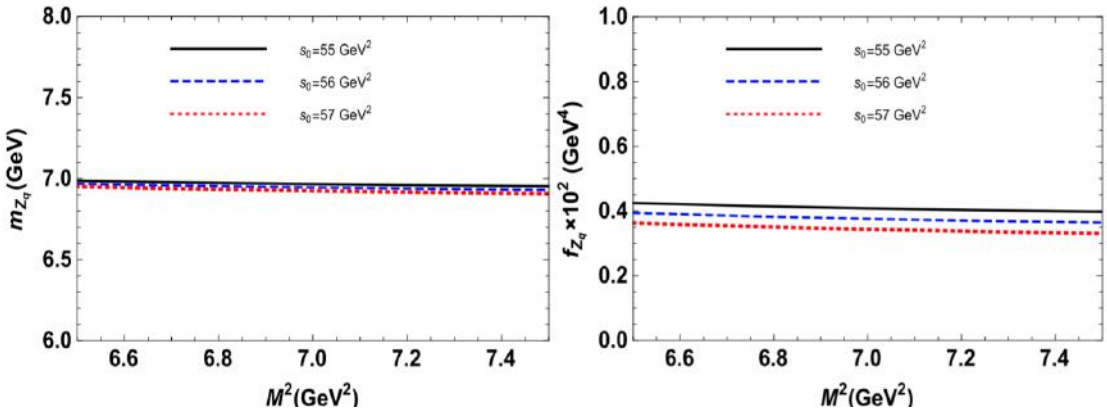


Şekil 26. $g_{X_b B_s^* \pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

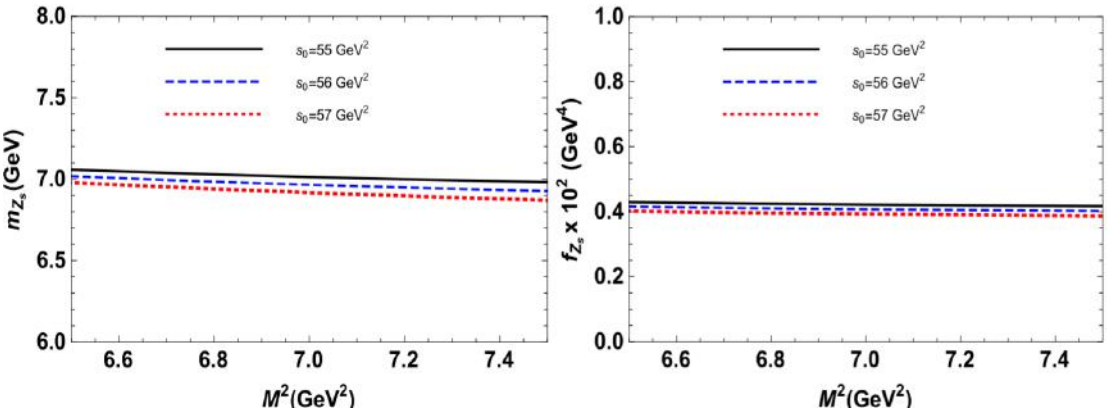
Bu modelde elde edilen sonuçlar, bu parçacığın kütlesinin deney datasını aştığını (m_{X_b}=5864$\pm$158 MeV, m_{deney}= 5567$\pm 2.9^{+0.9}_{-1.9}$MeV) ancak genliğinin deney ile kıyaslanabilecek değerde ($\Gamma(X_b \longrightarrow B_s^* \pi^+)$= 20.02$\pm$6.1 MeV, Γ_{deney}(X(5568) $\longrightarrow B_s^* \pi^+$) =21.9$\pm 6.4^{+5.0}_{-2.5}$ MeV) olduğunu göstermiştir. Var olan deney datası ve diğer çalışma sonuçları ile kıyaslama yapıldığında, bu parçacığın skaler bir diquark-antidiquark dört-kuark yapıya sahip olma olasılığı yüksek bulunmuştur. Gelecekte yapılacak ayrıntılı deneyler ve onların elde ettiğimiz teorik sonuçlar ile kıyaslanması bu parçacığın iç yapısı ve özellikle egzotik parçacıklarının renk dinamiği hakkında önemli bilgiler vereceğine inanılmaktadır. Ayrıca Doktora öğrencisi bursiyerimiz bu çalışmaya yüksek lisans tezinde yer vermiştir (Barsbay, 2017; Agaev vd., 2017a).

Makale: Open Charm-Bottom Scalar Tetraquark and Their Strong Decays (Phys. Rev. D 95, no.3, 034008 (2017)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Farklı bir çalışmada, kuark içeriği $Z_q = [cq][\bar{b}\bar{q}]$ ve $Z_s = [cs][\bar{b}\bar{s}]$ dört-kuark (tetrakuark) yapısında olan $J^P = 0^+$ kuantum sayısına sahip olabilecek tüm egzotik parçacıklarının kütle ve mezon akım kuplajı iki nokta KRDTK metodu ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, sekiz boyuta kadar kuark, gluon ve karışık kondensatlar (yoğuşmalar) hesaba katılmıştır. Z_q ve Z_s parçacıklarının kütle ve mezon-akım kuplaj sabitlerinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 27 ve Şekil 28 de verilmiştir.



Şekil 27. Sol: m_{Z_q} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.
Sağ: f_{Z_q} mezon-akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı



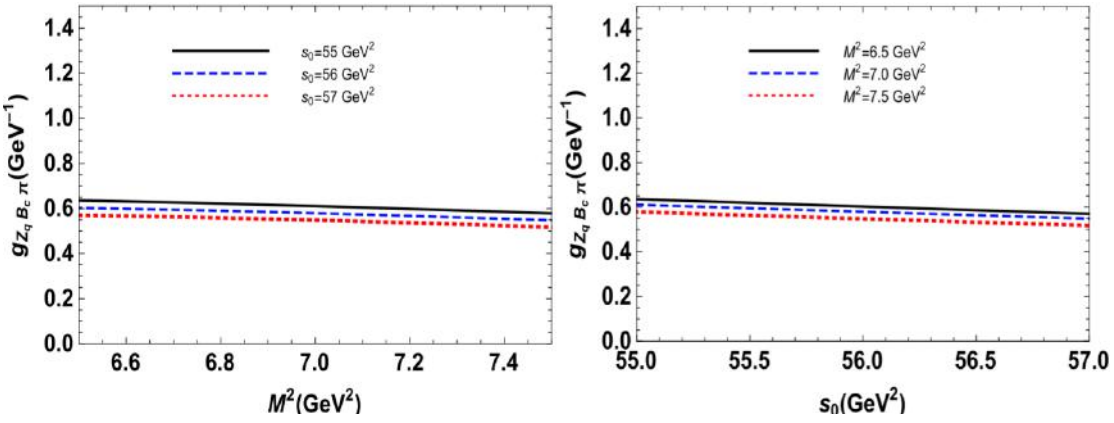
Şekil 28. Sol: m_{Z_s} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.
Sağ: f_{Z_s} mezon-akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı

Bu çalışmada Z_q ve Z_s parçacıkları için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 9' da verilmiştir.

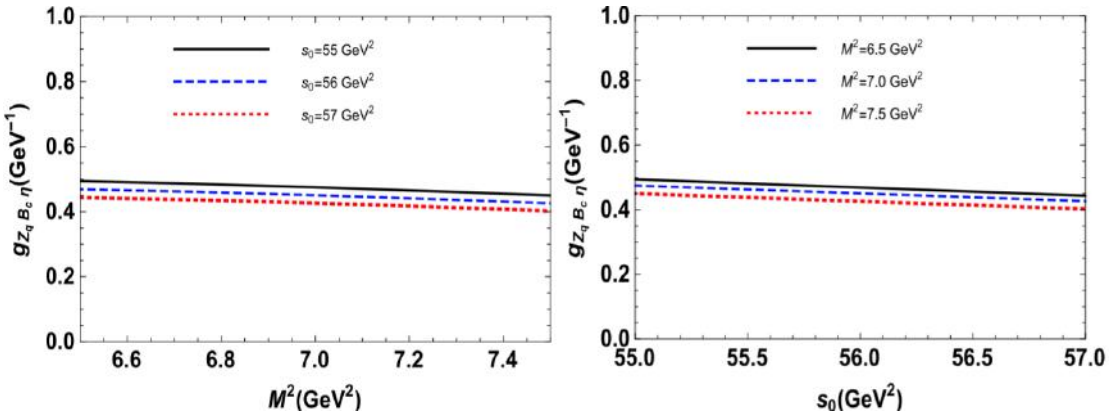
Tablo 9. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Z_q ve Z_s parçacıklarına ait fiziksel sonuçlar

Kütle-Mezon Akım Kuplaj sabiti	Sonuçlarımız
m_{Z_q}	(6.97±0.19) GeV
f_{Z_q}	(0.38±0.03).10^{-2} GeV^4
m_{Z_s}	(7.01±0.21) GeV
f_{Z_s}	(0.41±0.04).10^{-2} GeV^4

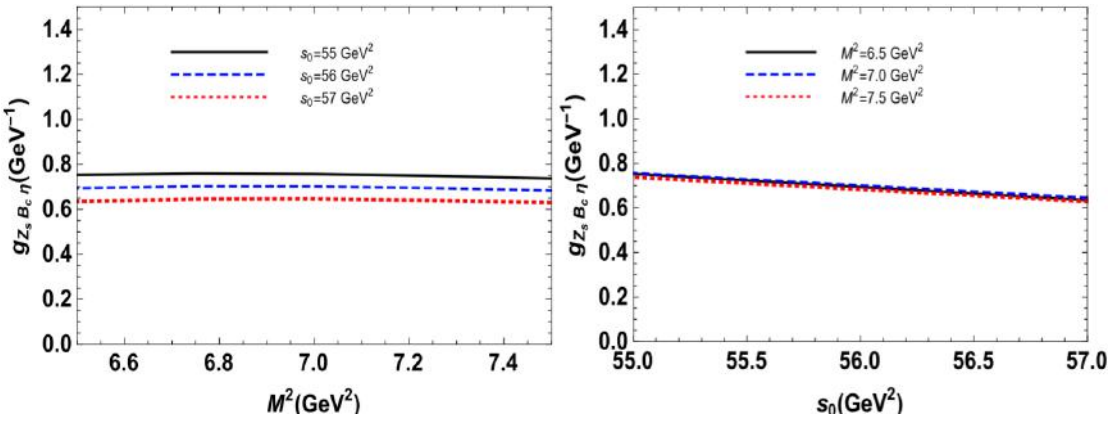
Bu parçacıkların $Z_q \to B_c\pi$, $Z_q \to B_c\eta$ ve $Z_s \to B_c\eta$ güçlü bozunumları da IKTK yöntemiyle ve soft $q \to 0$ limit kullanılarak incelenmiştir. Bu geçişlere ait kuplaj sabitleri ve bozunma genlikleri elde edilmiştir. $Z_q \to B_c\pi$, $Z_q \to B_c\eta$ ve $Z_s \to B_c\eta$ geçişlerine ait güçlü kuplaj sabitlerinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31' de verilmiştir.



Şekil 29. Sol: $g_{Z_q B_c \pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{Z_q B_c \pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 30. Sol: $g_{Z_q B_c \eta}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{Z_q B_c \eta}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 31. Sol: $g_{Z_s B_c \eta}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{Z_s B_c \eta}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

$Z_q \to B_c \pi$, $Z_q \to B_c \eta$ ve $Z_s \to B_c \eta$ geçişlerine ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 10' da verilmiştir.

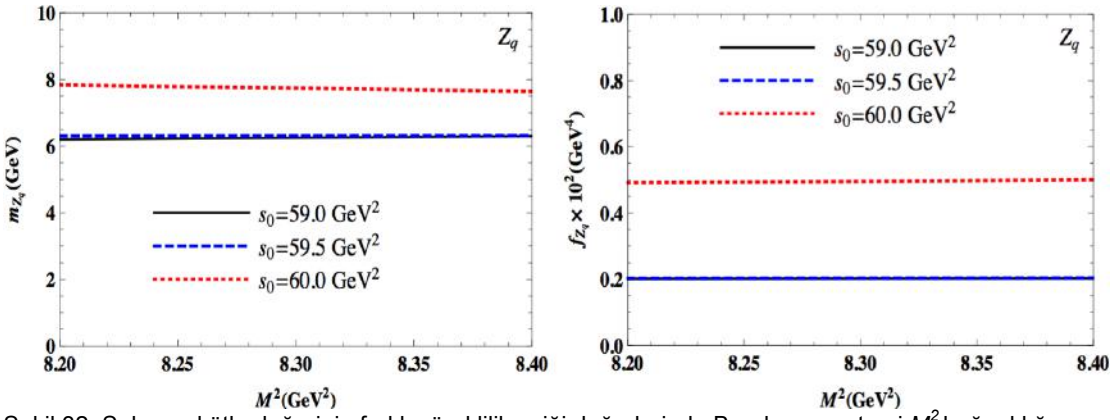
Tablo 10. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_q \to B_c \pi$, $Z_q \to B_c \eta$ ve $Z_s \to B_c \eta$ geçişlerine ait fiziksel sonuçlar

Güçlü çiftlenim sabitleri – Bozunma genişlikleri	Sonuçlarımız
$g_{Z_q B_c \pi}$	(0.57±0.21) GeV^{-1}
$g_{Z_q B_c \eta}$	(0.45±0.17) GeV^{-1}
$g_{Z_s B_c \eta}$	(0.69±0.26) GeV^{-1}
$\Gamma(Z_q \to B_c \pi)$	(111±49) MeV
$\Gamma(Z_q \to B_c \eta)$	(43±19) MeV
$\Gamma(Z_s \to B_c \eta)$	(112±51) MeV

Z_q ve Z_s dört-kuarklarının kütlesi için elde edilen sonuçlar, literatürdeki farklı yöntemler ile elde edilen mevcut tahminlerle karşılaştırılmıştır. Bu parçacıklar için, hem kütle hem de genlik için elde edilen sonuçlar gelecek deneylere ışık tutacaktır. Olası deney datalarının elde ettiğimiz sonuçlarla kıyaslanmasının, bu ağır dört-kuarklı sistemlerin fiziksel özellikleri hakkında önemli bilgiler vereceğine inanılmaktadır (Agaev vd., 2017b).

Makale: Open Charm-Bottom Axial-Vector Tetraquarks and Their Properties (Eur. Phys.J. C 77, no.5, 321 (2017)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Kuark içeriği $Z_q = [cq][\bar{b}\bar{q}]$ ve $Z_s = [cs][\bar{b}\bar{s}]$ dört-kuark (tetrakuark) yapısında olan $J^P = 1^+$ kuantum numarasına sahip axial-vektör olma durumu göz önüne alınarak, iki farklı ağır kuark içeren egzotik parçacıkların kütle ve mezon akım kuplajı iki nokta KRDTK metodu ile hesaplanmıştır. Z_q parçacığının kütle ve mezon-akım kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 32' de verilmiştir.



Şekil 32. Sol: m_{Z_q} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{Z_q} mezon-akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2'ye bağımlılığı

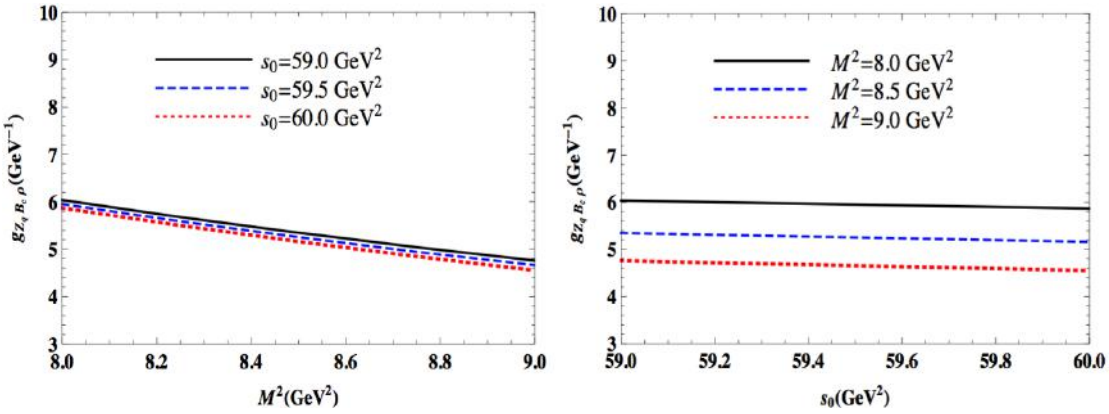
Bu çalışmada Z_q ve Z_s parçacıkları için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 11' de verilmiştir.

Tablo 11. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Z_q ve Z_s parçacıklarına ait fiziksel sonuçlar

Kütle-Mezon Akım Kuplaj sabiti	Sonuçlarımız
m_{Z_q}	(7.06±0.74) GeV
f_{Z_q}	(0.33±0.11).10^{-2} GeV^4
m_{Z_s}	(7.30±0.76) GeV
f_{Z_s}	(0.63±0.19).10^{-2} GeV^4

Kütle ve rezidü sonuçlarını girdi parametreleri olarak kullanarak, daha sonra, bu parçacıkların baskın güçlü bozunumları yani $Z_q \to B_c\rho$ ve $Z_s \to B_c\varphi$, IKTK çerçevesinde ve soft $q \to 0$ limitinde incelenmiştir. Bu bozunumlara ait güçlü kuplaj sabitleri $g_{Z_qB_c\rho}$ ve

$g_{Z_sB_c\varphi}$ elde edilmiş; bu değerler kullanılarak bozunumlara ait bozunma genlikleri hesaplanmıştır. $Z_q \to B_c\rho$ geçişine ait güçlü kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 33' de verilmiştir.



Şekil 33. Sol: $g_{Z_qB_c\rho}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{Z_qB_c\rho}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı

$Z_q \to B_c\rho$ ve $Z_s \to B_c\varphi$ geçişlerine ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 12' de verilmiştir.

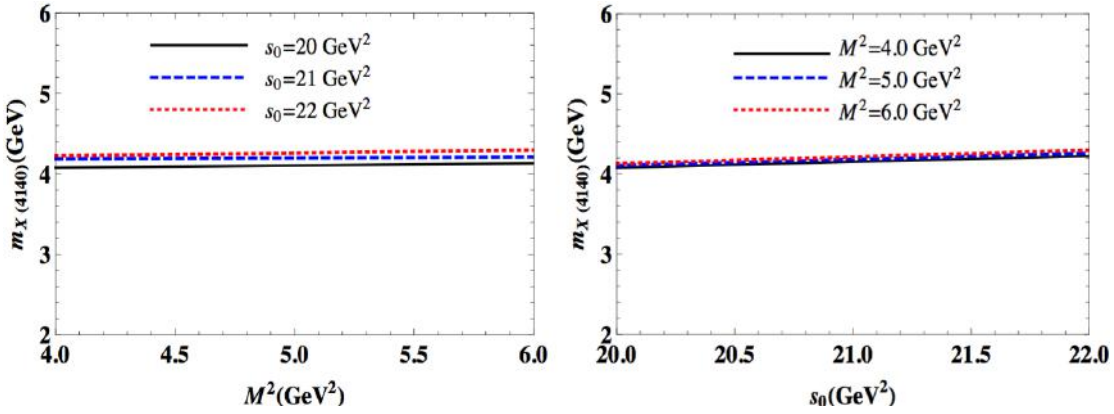
Tablo 12. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_q \to B_c\rho$ ve $Z_s \to B_c\varphi$ geçişlerine ait fiziksel sonuçlar

Güçlü çiftlenim sabitleri – Bozunma genişlikleri	Sonuçlarımız
$g_{Z_qB_c\rho}$	(5.31±1.25) GeV^{-1}
$g_{Z_sB_c\varphi}$	(6.42±1.52) MeV
$\Gamma(Z_q \to B_c\rho)$	(80±32) MeV
$\Gamma(Z_s \to B_c\varphi\ )$	(168±68) MeV

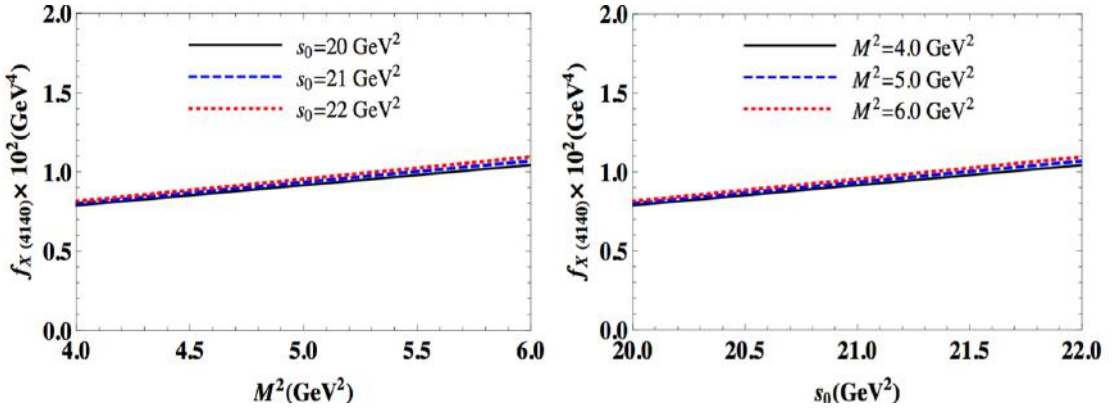
Elde edilen sonuçlar, ilerde yapılacak teorik araştırmalar ve $[cq][\bar{b}\bar{q}]$ ve $[cs][\bar{b}\bar{s}]$ dört-kuark çoklukları üzerinde yapılacak deneysel çalışmalara ışık tutacaktır (Agaev vd., 2017c).

Makale: Exploring the resonances X(4140) and X(4274) through their decay channels (Phys. Rev. D 95, no.11, 114003 (2017)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

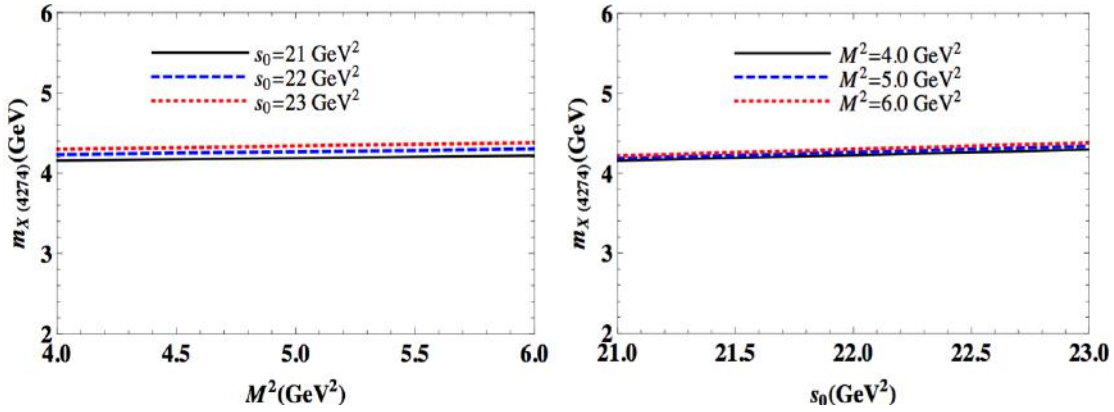
LHCb İşbirliği tarafından 2017 yılında gözlemlendiği rapor edilen kuark içeriği $[cs][\bar{c}\bar{s}]$ dört-kuark (tetrakuark) yapısında olan $J^P = 1^+$ kuantum sayısına sahip X(4140) ve X(4274) egzotik parçacıklarının kütleleri ve mezon akım kuplajları iki nokta KRDTK metodu ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, sekiz boyuta kadar kuark, gluon ve karışık kondensatlar (yoğuşmalar) hesaba katılmıştır. X(4140) ve X(4274) parçacıklarının kütle ve mezon-akım kuplaj sabitlerinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 34, Şekil 35, Şekil 36 ve Şekil 37' de verilmiştir.



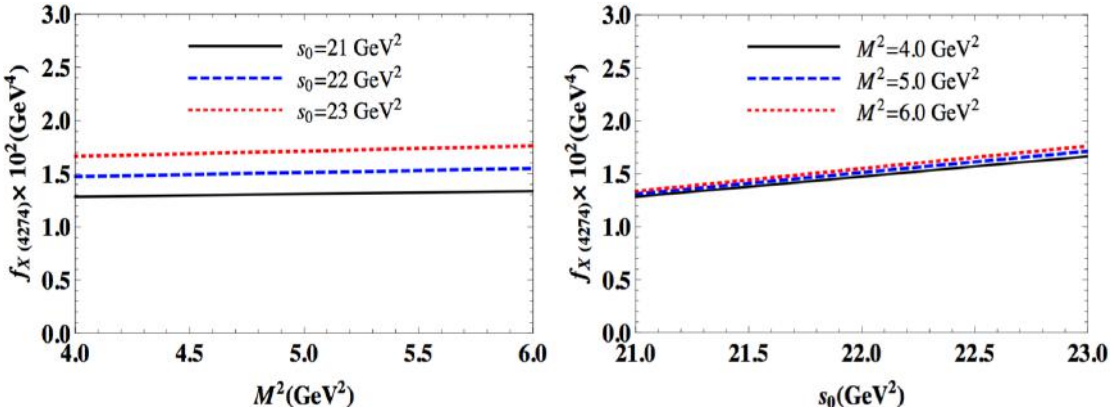
Şekil 34. Sol: $m_{x(4140)}$ kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $m_{x(4140)}$ kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 35. Sol: $f_{x(4140)}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $f_{x(4140)}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 36. Sol: $m_{x(4274)}$ kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $m_{x(4274)}$ kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 37. Sol: $f_{x(4274)}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $f_{x(4274)}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

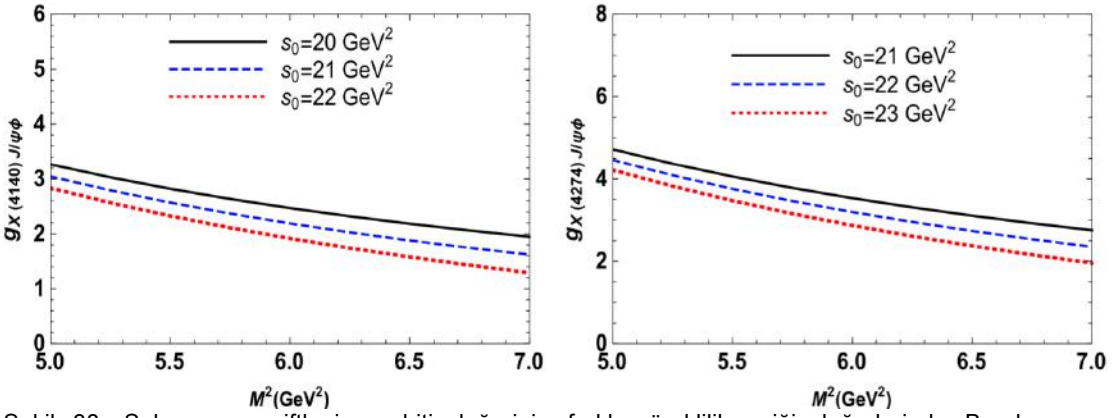
Bu çalışmada X(4140) ve X(4274) parçacıkları için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 13' de verilmiştir.

Tablo 13. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde X(4140) ve X(4274) parçacıklarına ait fiziksel sonuçlar

X	X(4140)	X(4274)
M^2 (GeV^2)	4 – 6	4 - 6
s_0 (GeV^2)	20 – 22	21 - 23
m_X (MeV)	4183 ± 115	4264 ± 117
f_X (GeV^4)	$(0.94 \pm 0.16).10^{-2}$	$(1.51 \pm 0.21).10^{-2}$

Bu parçacıkların $X(4140) \to J/\psi\phi$ ve $X(4274) \to J/\psi\phi$ güçlü bozunumları da IKTK yöntemiyle ve soft mezon yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Bu bozunumlara ait güçlü kuplaj sabitleri $g_{X(4140)J/\psi\phi}$ ve $g_{X(4274)J/\psi\phi}$ elde edilmiş; bu değerler kullanılarak bozunumlara ait bozunma genlikleri hesaplanmıştır. $X(4140) \to J/\psi\phi$ ve $X(4274) \to J/\psi\phi$

geçişlerine ait güçlü kuplaj sabitlerinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 38' de verilmiştir.



Şekil 38. Sol: $g_{X(4140)}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $g_{X(4274)}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.

X(4140) ve X(4274) rezonanslarının kütleleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar, LHCb verileri ve alternatif teorik çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu parçacıklar için, hem kütle hem de genlik için elde edilen sonuçlar gelecek deneylere ışık tutacaktır (Agaev vd., 2017d).

Makale: Treating $Z_c(3900)$ and Z(4430) as the ground-state and first radially excited tetraquarks (Phys. Rev. D 96, no.3, 034026 (2017)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Dört-kuark (tetrakuark) yapısında olan $J^P = 1^+$ kuantum numarasına sahip $Z_c(3900)$ ve Z(4430) parçacıklarının temel durumu ve ilk radyal uyarılmış durumu göz önüne alınarak, kütle ve mezon akım kuplajı iki nokta KRDTK metodu ile hesaplanmıştır. $Z_c(3900)$ ve Z(4430) parçacıkları için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 14' de verilmiştir.

Tablo 14. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_c(3900)$ ve Z(4430) parçacıklarına ait fiziksel sonuçlar

Z	$Z_c(3900)$	Z(4430)
M^2 (GeV^2)	3 – 6	3 - 6
$s_0(s_0^*)$ (GeV^2)	$4.2^2 – 4.4^2$	$4.8^2 – 5.2^2$
m_Z (MeV)	3901^{+125}_{-148}	4452^{+182}_{-228}
$f_z.10^2$ (GeV^4)	$0.42^{+0.07}_{-0.09}$	$1.48^{+0.31}_{-0.42}$

IKTK metodu kullanılarak, hafif ve ağır mezonlar sırasıyla M_h ve M_l olmak üzere $Z_cM_hM_l$ ve ZM_hM_l köşeleri incelenmiştir ve güçlü kuplaj sabitleri g_{ZcMhMl} ve g_{ZMhMl} elde edilmiş; bu değerler kullanılarak $Z_c\ (3900) \to J/\psi\pi;\ \ \psi'\pi;\ \eta_c\rho$ ve $Z\ (4430) \to \psi'\pi; J/\psi\pi;\ \ \eta_c'\rho;\ \eta_c\rho$ bozumlarına ait bozunma genlikleri hesaplanmıştır. Bozunumlara ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 15' de verilmiştir.

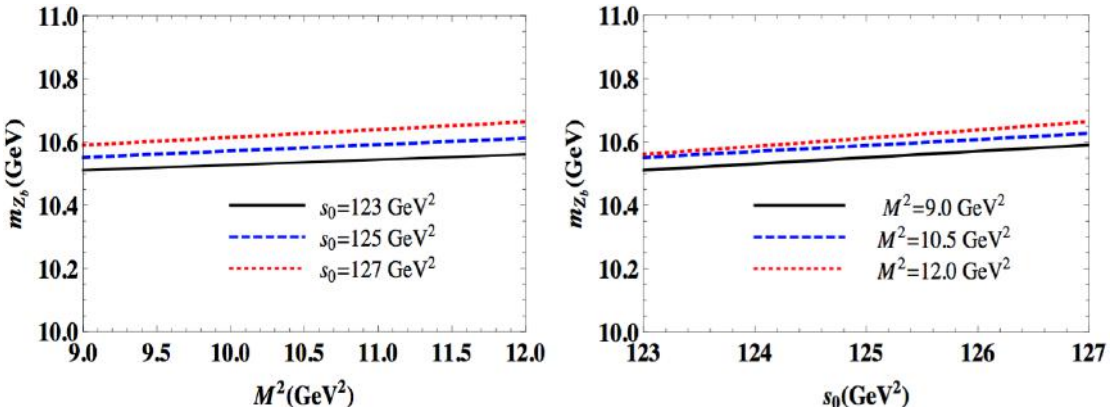
Tablo 15. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_c\ (3900) \to J/\psi\pi;\ \ \psi'\pi;\ \eta_c\rho$ ve $Z(4430) \to \psi'\pi; J/\psi\pi;\ \eta_c'\rho;\ \eta_c\rho$ geçişlerine ait fiziksel sonuçlar

Kanallar	g (GeV^{-1})	Γ(MeV)
$Z\to \acute{\psi}\pi$	0.58±0.17	129.7±38.4
$Z\to J/\psi\pi$	0.24±0.07	27.4±7.3
$Z\to \eta_c\rho$	0.48±0.13	11.57±3.04
$Z\to \acute{\eta}_c\rho$	0.81±0.21	1.01±0.28
$Z_c \to \acute{\psi}\pi$	0.29±0.08	7.1±1.9
$Z_c \to J/\psi\pi$	0.38±0.11	39.9±9.3
$Z_c \to \eta_c\rho$	1.28±0.32	20.28±5.17

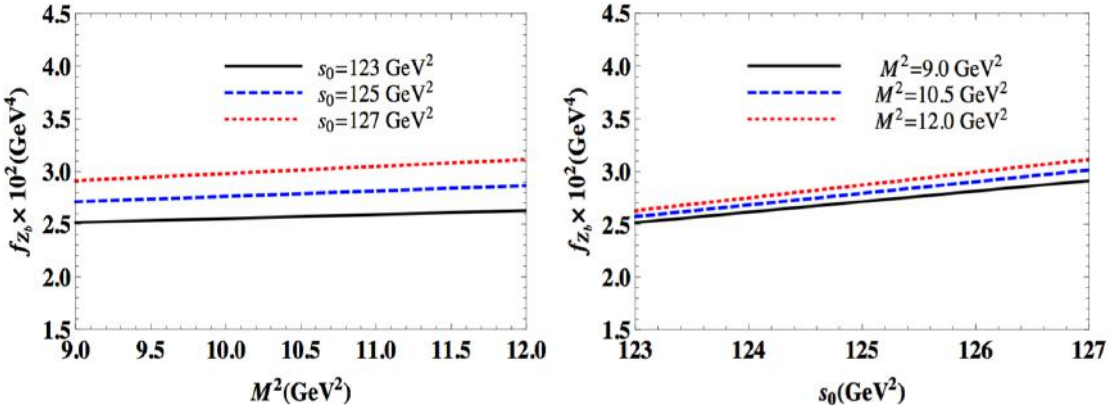
Genlik üzerindeki sonuçların deneysel ve teorik çalışmalarla karşılaştırılması, $Z_c(3900)$ ve Z(4430) rezonanslarının iç yapısını daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır (Agaev vd., 2017e).

Makale: Spectroscopic Parameters and Decays of The Resonance $Z_b(10610)$ (Eur. Phys. J. C **77**, no.12, 836 (2017)) , S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Kuark içeriği $Z_b = [bu][\bar{b}\bar{d}]$ dikuark-antidikuark yapısında olan $J^P=1^+$ kuantum sayısına sahip $Z_b(10610)$ egzotik parçacığının kütlesi ve mezon-akım kuplajı iki nokta KRDTK metodu ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, on boyuta kadar vakum kondensatları hesaba katılmıştır. $Z_b(10610)$ parçacığının kütle ve mezon-akım kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 39 ve Şekil 40' da verilmiştir.



Şekil 39. Sol: m_{Z_b} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_{Z_b} kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 40. Sol: f_{Z_b} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{Z_b} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

$Z_b(10610)$ parçacığı için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 16' da verilmiştir.

Tablo 16. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_b(10610)$ parçacığına ait fiziksel sonuçlar

Rezonans	$Z_c(3900)$
M^2 (GeV^2)	9 - 12
s_0(GeV^2)	123 – 127
m_{Z_b} (MeV)	10581^{+142}_{-164}
$f_{Z_b}.10^{-2}$ (GeV^4)	$2.79^{+0.55}_{-0.65}$

Parçacığın $Z_b \to \Upsilon(nS)\pi$, n = 1, 2, 3 bozunumuna ait güçlü kuplaj sabitleri $g_{Zb\Upsilon(nS)\pi}$ elde edilmiş; bu değerler kullanılarak bozunuma ait bozunma genlikleri hesaplanmıştır.

$Z_b \to \Upsilon(nS)\pi$, n = 1, 2, 3 bozunumuna ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 17' de verilmiştir.

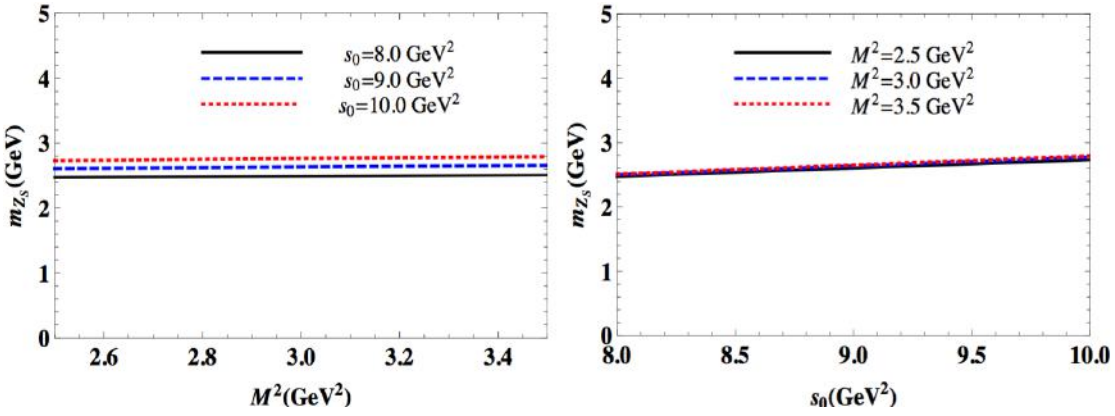
Tablo 17. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $Z_b \to \Upsilon(nS)\pi$, n = 1, 2, 3 geçişlerine ait fiziksel sonuçlar

Kanallar	g (GeV^{-1})	Γ(MeV)
$Z_b \to \Upsilon(1S)\,\pi$	0.019±0.005	1.36±0.43
$Z_b \to \Upsilon(2S)\,\pi$	0.090±0.031	17.18±5.01
$Z_b \to \Upsilon(3S)\,\pi$	0.104±0.031	8.27±2.69

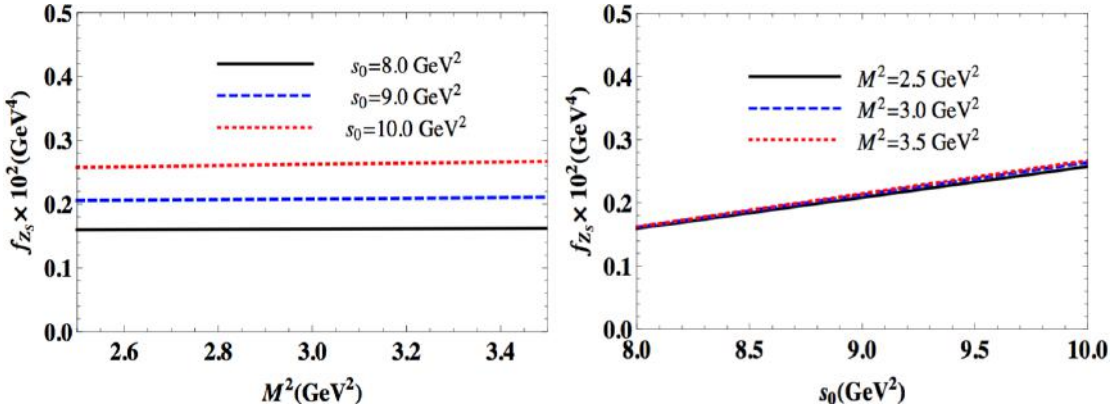
Aynı zamanda $Z_b\ h_b(mp)\,\pi$ (m=1, 2) köşelerinin güçlü kuplaj sabitleri ve bozunma genlikleri hesaplanmış, bu amaçla $h_b(1p)$ ve $h_b(2p)$ mezonlarının kütle ve bozunma sabitleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Belle İşbirliği'nin deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır (Agaev vd., 2017f).

Makale: Testing The Doubly Charged Charm-Strange Tetraquarks (Eur. Phys. J. C **78**, no.2, 141(2018)), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

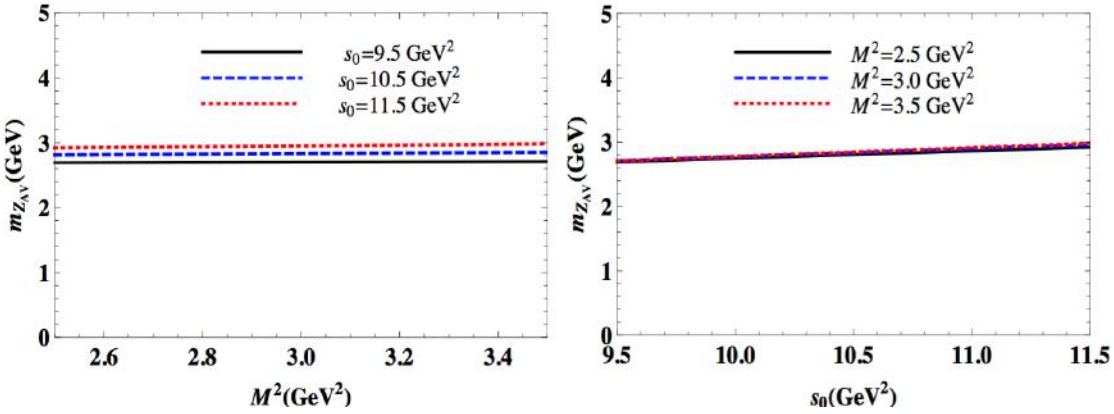
$Z_{\bar{c}s} = [sd][\bar{u}\bar{c}]$ dört-kuark (tetrakuark) yapısında olan parçacığın skaler, pseudoskaler ve aksiyel vektör olma durumları göz önüne alınarak kütleleri ve mezon-akım kuplajları iki nokta KRDTK metodu ile hesaplanmıştır. Bu çalışma neticesinde elde edilen fiziksel parametrelere örnek olması için Z_s ve Z_{AV} durumlarının kütle ve mezon-akım kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 41, Şekil 42, Şekil 43 ve Şekil 44' de verilmiştir.



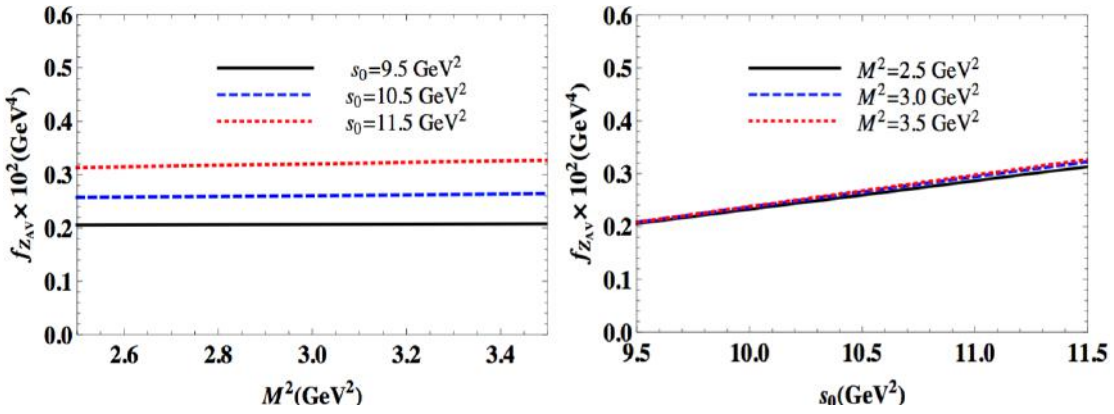
Şekil 41. Sol: m_{Z_s}kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_{Z_s} kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 42. Sol: f_{Z_s} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{Z_s} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 43. Sol: $m_{Z_{AV}}$kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $m_{Z_{AV}}$ kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 44. Sol: $f_{Z_{AV}}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $f_{Z_{AV}}$ mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

Z_s, Z_{PS} ve Z_{AV} durumlarının için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 18' de verilmiştir.

Tablo 18. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Z_s, Z_{PS} ve Z_{AV} durumlarına ait fiziksel sonuçlar

Z	Z_s	Z_{PS}	Z_{AV}
M^2 (GeV^2)	2.5 – 3.5	2.5 – 3.5	2.5 – 3.5
s_0(GeV^2)	8 - 10	9.5 – 11.5	9.5 – 11.5
m_z(MeV)	2628^{+166}_{-153}	2719^{+144}_{-156}	2826^{+134}_{-157}
$f_z.10^3$	$2.1^{+0.6}_{-0.5}$ (GeV^4)	$0.83^{+0.09}_{-0.11}$ (GeV^3)	$2.6^{+0.6}_{-0.7}$ (GeV^4)

Skaler durum için $Z_{\bar{c}s} \to D_s\pi, DK, D_{s1}(2460)\pi$, pseudoskaler durum için $Z_{\bar{c}s} \to D_s^*, D^*K, D_{s0}^*(2317)\pi$ aksiyel vektör için $Z_{\bar{c}s} \to D_s^*, D^*K, D_{s1}^*(2460)\pi$ bozunumlarına ait kuplaj sabitleri ve bozunma genlikleri elde edilmiştir. Z_s, Z_{PS} ve Z_{AV} durumlarına ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 19' da verilmiştir.

Tablo 19. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Z_s, Z_{PS} ve Z_{AV} durumlarına ait fiziksel sonuçlar

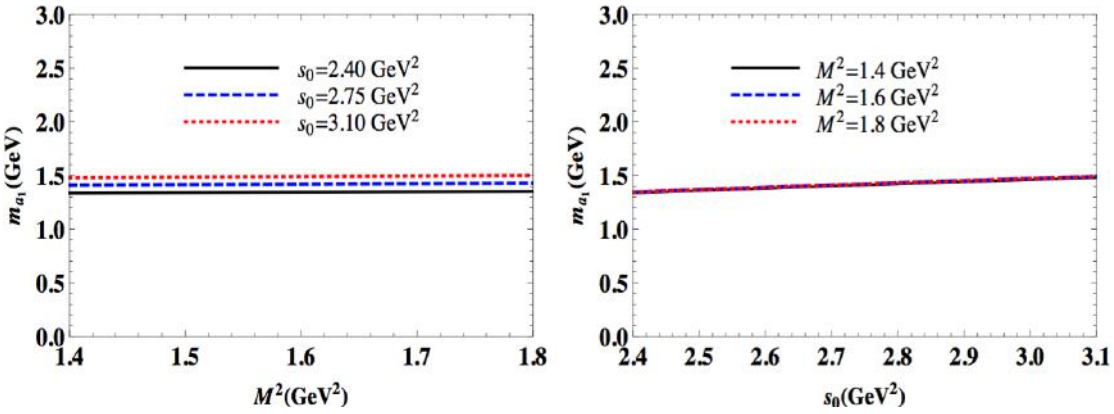
Kanallar	g (GeV^{-1})	Γ(MeV)
$Z_s \to D_s\pi$	0.51±0.14	8.27±2.32
$Z_s \to DK$	1.54±0.43	57.41±14.93
$Z_s \to D_{s1}\pi$	26.16±7.36	1.21±0.38
$Z_{AV} \to D_s^*\pi$	0.26±0.07	7.94±2.21
$Z_{AV} \to D^*K$	0.63±0.17	37.38±10.84
$Z_{AV} \to D_{s1}\pi$	1.55±0.43	2.02±0.59
$Z_{PS} \to D_s^*\pi$	3.18±0.94	4.37±1.27
$Z_{PS} \to D^*K$	8.24±2.39	19.09±5.73
$Z_{PS} \to D_{s0}^*\pi$	0.76±0.18	14.64±3.94

Spektroskopik parametreler ve bozunma genlikleri için elde edilen sonuçlar $Z_{\bar{c}s}$ dört-kuark çoklukları üzerinde yapılacak deneysel çalışmalara ışık tutacaktır (Agaev vd., 2018b).

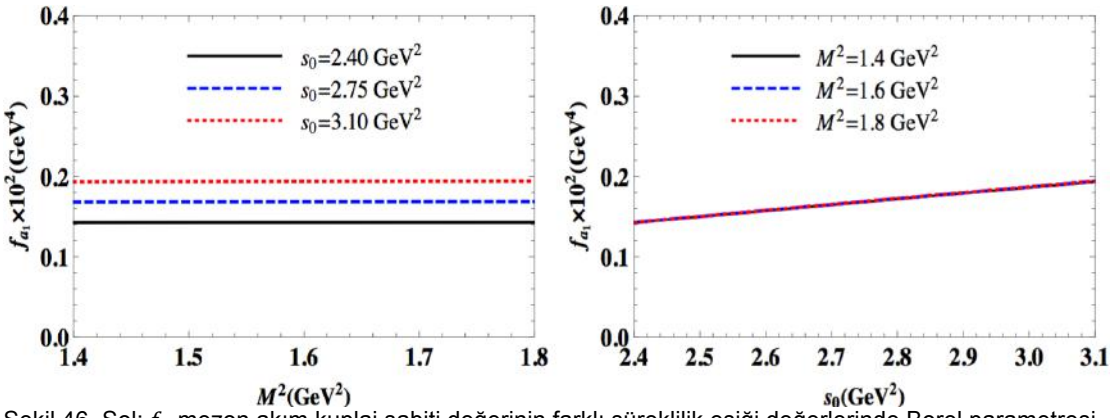
Makale: The New a_1(1420) State: Structure, Mass and Width (Phys. Rev. D 97, no. 5, 054001 (2018)), H. Sundu, S. S.Agaev, K. Azizi

COMPASS İşbirli tarafından a_1(1420) mezonu olarak sınıflandırılan $J^{PC}= 1^{++}$ kuantum numarasına sahip parçacığın spektroskopik parametreleri ve bozunma genişliği KRD-TK çerçevesinde incelenmiştir. Hesaplamalarda, a_1(1420) mezonu dikuark-antidikuark (tetrakuark) yapısında ele alınmıştır. Parçacığın kütlesi ve mezon akım kuplaj sabiti iki nokta

KRD-TK metodu ile hesaplanmıştır. $a_1(1420)$ parçacığının kütle ve mezon-akım kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 45 ve Şekil 46' da verilmiştir.



Şekil 45. Sol: m_{a_1} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_{a_1} kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 46. Sol: f_{a_1} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{a_1} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

$a_1(1420)\rightarrow K^{*\pm}K^{\mp}, K^{*0}\overline{K}^0$ ve $\overline{K}^{*0}K^0$ bozunumlarına ait kuplaj sabitleri bozunma genlikleri de IKTK yöntemi ile elde edilmiştir. Bozunumlarına ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 20' de verilmiştir.

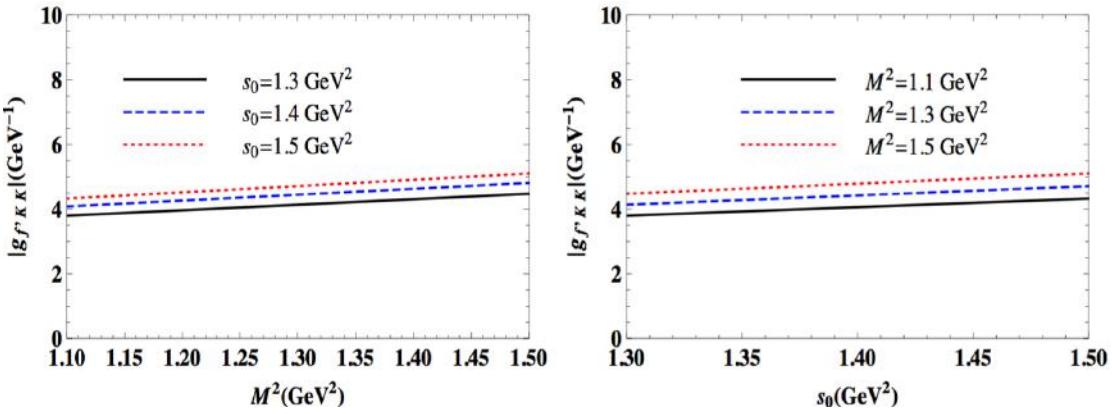
Tablo 20. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $a_1(1420) \to K^{*\pm}K^{\mp}, K^{*0}\overline{K}^{0}$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar.

Kanallar	g (GeV^{-1})	Γ(MeV)
$a_1(1420) \to K^{*+}K^{-}$	2.84±0.79	37.84±10.97
$a_1(1420) \to K^{*0}\overline{K}^{0}$	2.85±0.82	33.35±9.76

Elde edilen kütle değerinin deneysel sonuç ile oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bozunma genişliği için elde edilen $\Gamma = 145.52 \pm 20.79$ MeV değerinin de teorik ve deneysel hatalar çerçevesinde COMPASS deney sonucu (153^{+8}_{-23} MeV) ile uyumlu olduğu görülmüştür (Sundu vd., 2018a).

Makale: The Strong Deays of The Light Scalar Mesons $f_0(500)$ and $f_0(980)$ (Phys. Lett. B 784 (2018) 266-270), S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

$f_0(500) \to \pi\pi$, $f_0(980) \to \pi\pi$ ve $f_0(980) \to K\overline{K}$ bozunumlarına ait bozunma genlikleri IKTK yöntemi ve soft mezon yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu parçacıkların skaler dikuark-antidikuark bileşenleri ağır $|H\rangle = \frac{([su][\bar{s}u]+[sd][\bar{s}\bar{d}])}{\sqrt{2}}$ ve hafif $|L\rangle = [ud][\bar{u}\bar{d}]$ karışımı olarak ele alınmıştır. Elde edilen fiziksel parametrelere örnek olması için $f_0(980) \to K^{+}K^{-}$ geçişine ait güçlü kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 47' de verilmiştir.



Şekil 47. Sol: g_{fKK} çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: g_{fKK} çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

Bozunumlara ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 21' de verilmiştir.

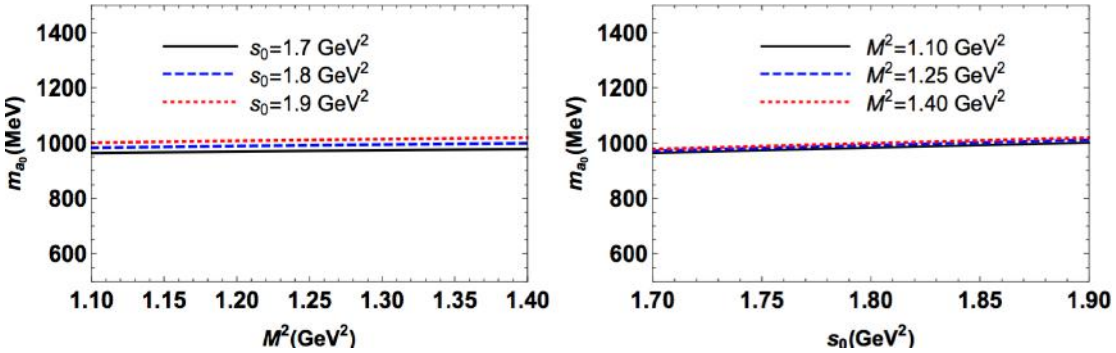
Tablo 21. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $f_0(500) \to \pi\pi$, $f_0(980) \to \pi\pi$ ve $f_0(980) \to K\overline{K}$ ve $K_0^*(800)$) $\to K^0\pi^0$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar

Kanallar	g (GeV^{-1})	Γ(MeV)
$f_0(500) \to \pi^+\pi^-$	33.94±3.86	223.5±53.7
$f_0(500) \to \pi^0\pi^0$	32.76±3.56	211.2±48.4
$f_0(980) \to \pi^+\pi^-$	3.02±0.35	14.36±3.31
$f_0(980) \to \pi^0\pi^0$	3.75±0.45	22.19±5.64
$f_0(980) \to K^+K^-$	4.29±0.75	3.98±1.04
$f_0(980) \to K^0\overline{K}^0$	4.97±0.98	1.59±0.47

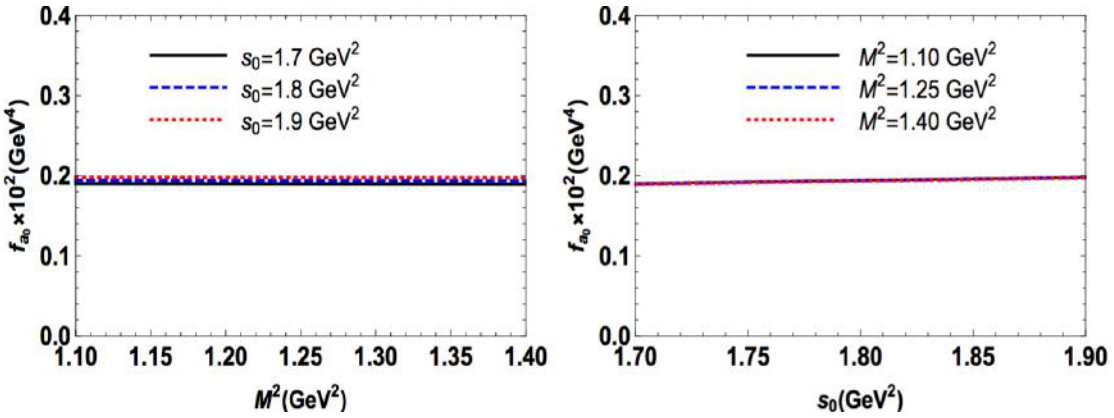
Toplam bozunma genlikleri; $f_0(500)$ mezonu için $\Gamma_{th} = 434.7 \pm 72.3$ MeV ve , $f_0(980)$ mezonu için $\Gamma_{th} = 42.12 \pm 6.70$ MeV olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer teorik çalışmalarla ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Agaev vd., 2018c).

Makale: The Nonet of The Light Scalar Tetraquarks: $a_0(980)$ and $K_0^*(800)$, S. S.Agaev, K. Azizi, H. Sundu

Skaler dikuark-antidikuark yapısında olan $a_0(980)$ and $K_0^*(800)$ mezonlarının spektroskopik parametreleri ve bozunma genlikleri hesaplanmıştır. Bu mezonların kütleleri ve mezon-akım kuplaj sabitleri iki nokta KRD-TK metodu ile elde edilmiştir. Bu çalışma neticesinde elde edilen fiziksel parametrelere örnek olması için $a_0(980)$ mezonunun kütle ve mezon-akım kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 48 ve Şekil 49' da verilmiştir.



Şekil 48. Sol: m_{a_0} kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_{a_0} kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



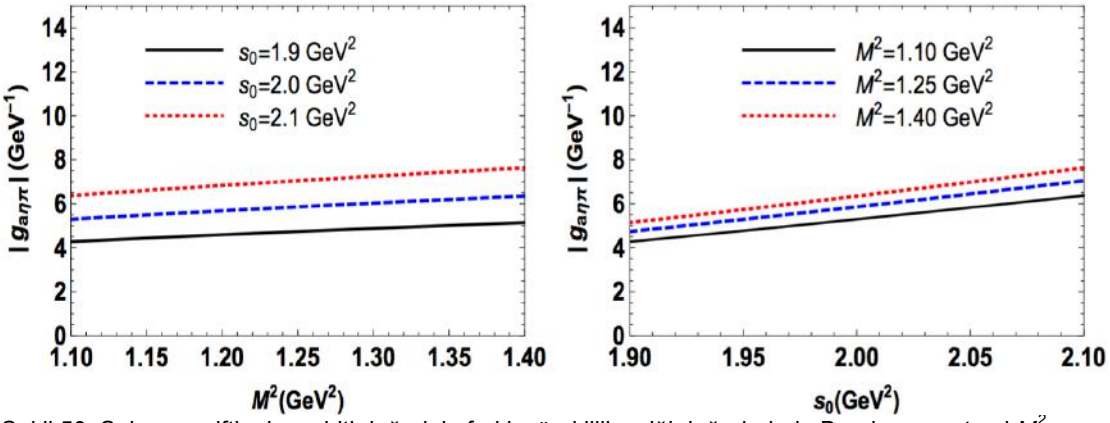
Şekil 49. Sol: f_{a_0}mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_{a_0} mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

$a_0(980)$ and $K_0^*(800)$ mezonları için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 22' de verilmiştir.

Tablo 22. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $a_0(980)$ and $K_0^*(800)$ mezonlarına ait fiziksel sonuçlar

Rezonans	$a_0(980)$	$K_0^*(800)$
M^2 (GeV^2)	1.1 – 1.4	0.8 – 1.0
s_0(GeV^2)	1.7 – 1.9	0.9 – 1.1
m(MeV)	991^{+29}_{-27}	767^{+38}_{-156}
f.10^{-3} (GeV^4)	1.94 ± 0.04	1.71 ± 0.07

$a_0(980) \rightarrow \eta\pi$, $a_0(980) \rightarrow K\bar{K}$, $K_0^*(800)$) $\rightarrow K^+\pi^-$ ve $K_0^*(800)$) $\rightarrow K^0\pi^0$ bozunumları IKTK yöntemiyle ve soft mezon yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Bu bozunumlara ait kuplaj sabitleri ve bozunma genişlikleri hesaplanmıştır. Elde edilen fiziksel parametrelere örnek olması için $a_0(980) \rightarrow \eta\pi$ geçişine ait güçlü kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 50' de verilmiştir.



Şekil 50. Sol: $g_{a\eta\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ:$g_{a\eta\pi}$ çiftlenim sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

Bahsedilen bozunumlara ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 23' de verilmiştir.

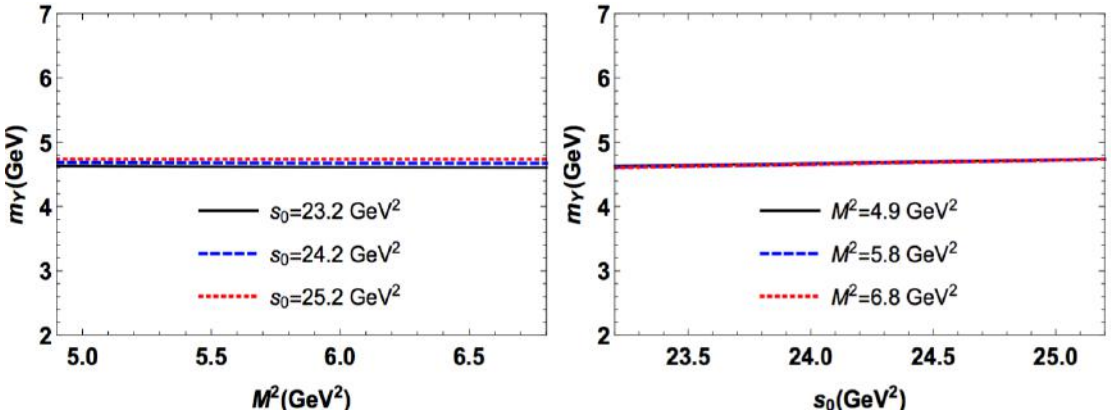
Tablo 23. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $a_0(980) \rightarrow \eta\pi$, $a_0(980) \rightarrow K\overline{K}$, $K_0^*(800)$) $\rightarrow K^+\pi^-$ ve $K_0^*(800)$) $\rightarrow K^0\pi^0$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar

Kanallar	g (GeV^{-1})	Γ(MeV)
$a_0(980) \rightarrow \eta\pi^0$	5.36±1.41	50.57±13.87
$a_0(980) \rightarrow K^+K^-$	9.10±2.76	11.44±3.76
$K_0^*(800) \rightarrow K^+\pi^-$	19.46±5.64	270.39±78.42
$K_0^*(800) \rightarrow K^0\pi^0$	13.47±3.91	130.69±37.91

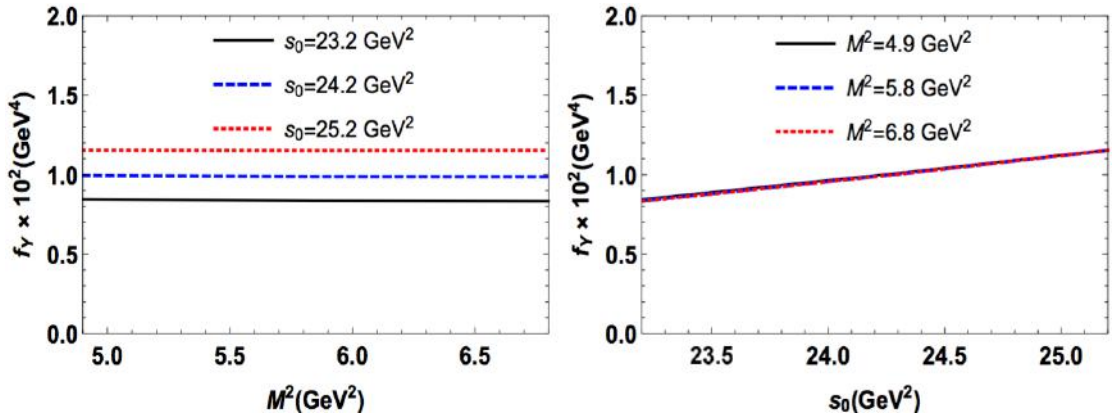
Elde edilen kütle ve bozunma genişlikleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma dergiye gönderilmiştir (Agaev vd., 2018d).

Makale: The Resonance Y(4660) As a Vector Tetraquark and Its Strong Decay Channels (Phys. Rev. D98, no.5, 054021,(2018)**)**, H. Sundu, S. S.Agaev, K. Azizi

Dikuark-antidikuark yapısında olan Y(4660) vektör mezonunun spektroskopik parametreleri ve bozunma genliği hesaplanmıştır. Bu mezonun kütlesi ve mezon-akım kuplaj sabiti iki-nokta KRD-TK metodu ile hesaplanmıştır. Y(4660) parçacığının kütle ve mezon-akım kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 51 ve Şekil 52' de verilmiştir.



Şekil 51: Sol: m_Y kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_Y kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 52: Sol: f_Y mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_Y mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

Y(4660) parçacığı için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 24' de verilmiştir.

Tablo 24. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Y(4660) parçacığına ait fiziksel sonuçlar

Rezonans	Y(4660)
M^2 (GeV^2)	1.1 – 1.4
s_0(GeV^2)	1.7 – 1.9
m_Y(MeV)	991^{+29}_{-27}
f_Y.10^{-2} (GeV^4)	1.94 ± 0.04

Y(4660) parçacığının $J/\psi f_0(980)$, $\psi(2S) f_0(980)$ ve $J/\psi f_0(500)$, $\psi(2S) f_0(500)$ bozunumlarına ait güçlü kuplaj sabitleri ve bozunma genlikleri IKTK yöntemiyle ve soft mezon yaklaşımı

kullanılarak elde edilmiştir. Bozunumlara ait güçlü çiftlenim sabitleri ve bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 25' de verilmiştir.

Tablo 25. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde Y(4660) parçacığının $J/\psi f_0(980)$, $\psi(2S)f_0(980)$ ve $J/\psi f_0(500)$, $\psi(2S)f_0(500)$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar

Kanallar	g (GeV^{-1})	Γ(MeV)
Y→ $J/\psi f_0(980)$	0.22±0.07	18.8±5.4
Y→ $\psi(2S)f_0(980)$	1.22±0.33	30.2±8.5
Y→ $J/\psi f_0(500)$	0.07±0.02	2.7±0.7
Y→ $\psi(2S)f_0(500)$	0.18±0.05	13.1±3.7

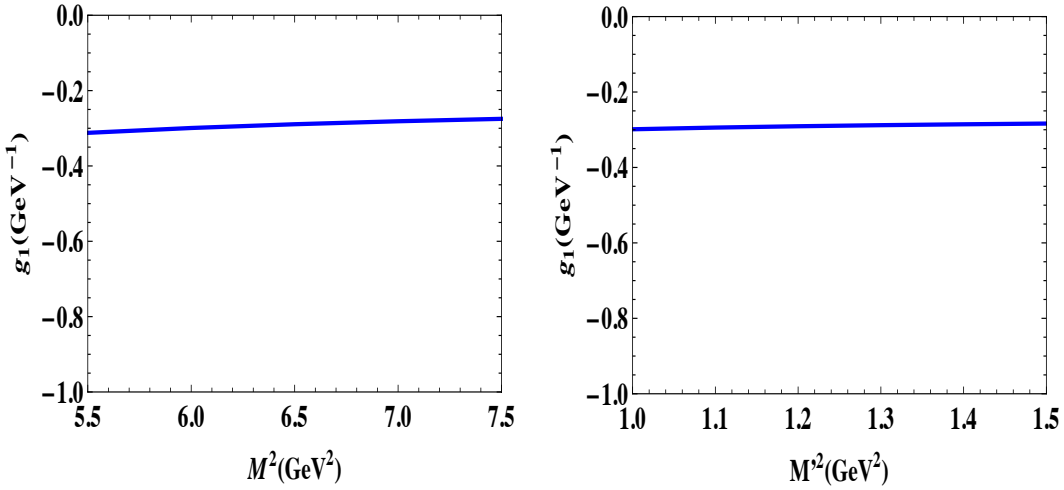
Elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Sundu vd., 2018b).

Makale: Strong Decay of Pc(4380) Pentaquark in a Molecular Picture (Phys. Lett. B 782 (2018) 694-701), K. Azizi, Y. Sarac, H. Sundu

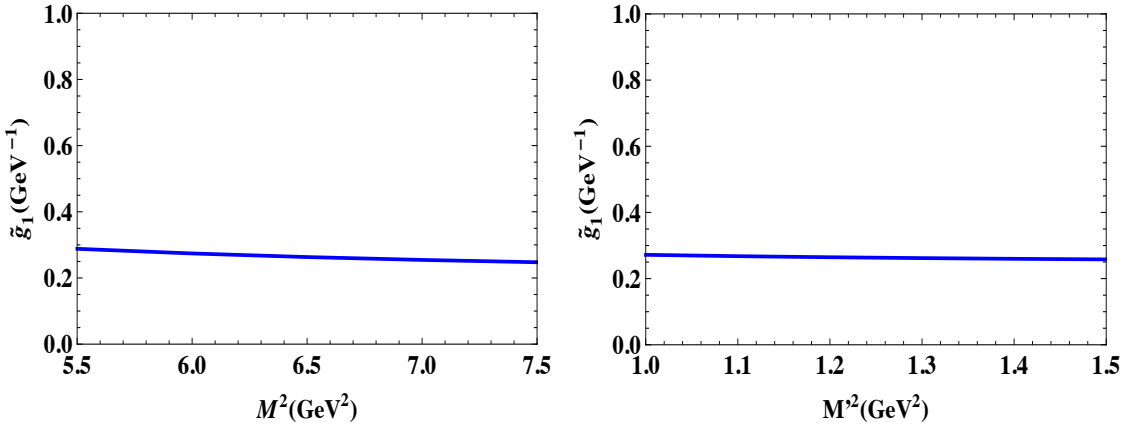
Proje kapsamında 2015 yılında LHCB işbirliği tarafından gözlemlendiği raporlanan beş-quark (pentaquark) yapısındaki $P_c(4380)$ ve $P_c(4450)$ parçacıklarından biri olan $P_c(4380)$ parçacığının $J/\psi N$ durumlarına güçlü geçişi incelenmiştir. Bu parçacıkların iç yapıları için farklı varsayımlar bulunmaktadır. Literatürde yer alan pek çok çalışmaya rağmen doğası; kuark ve gluon iç yapıları net değildir. Deneysel veriler ve kütleleri üzerine yapılmış teorik çalışmalar $P_c(4380)$ parçacığının negatif pariteli spin-3/2 ve $P_c(4450)$ parçacığının da pozitif pariteli spin-5/2 kuantum sayılarına sahip olduğu yorumlarını ortaya koymaktadır. Bununla beraber bu parçacıklara karşılık gelen karşıt pariteli durumlar da bulunabilir. Ayrıca farklı modeller kullanılarak kütle üzerine yapılan çalışmalar deneysel değerlerle uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu nedenle bu parçacıkların diğer fiziksel özellikleri üzerine yapılacak daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alınarak bu proje kapsamında $P_c(4380)$ durumunun J/ψ ve N durumlarına güçlü geçişi üç nokta KRD toplam kuralları çerçevesinde çalışılmıştır.

Hesaplamalarda $P_c(4380)$ parçacığı için moleküler yapıya sahip bir akım kullanılarak spin-3/2 pozitif ve negatif pariteli pentaquark durumlarının geçişini tanımlayan çiflenim yapı sabitleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda bu parçacıklar için proje kapsamında daha önce hesaplanan ve ilgili hesaplamalarda ana girdi parametrelerini oluşturan kütle ve rezidü değerleri de kullanılmıştır. Hesaplamalarda elde edilen çiftlenim yapı sabitleri fiziksel olmayan yardımcı parametrelere bağımlı olarak elde edilmektedir. Elde edilen fiziksel büyüklüklerin bu parametrelere oldukça zayıf bağımlılığa sahip olması gerekmektedir. Bu

nedenle çalışmada elde ettiğimiz sonuçların yardımcı parametrelere bağımlılığını örneklemek için hesaba giren altı çiflenim sabitinden ikisi olan g_1 ve $\tilde{g}_1$ sonuçlarının Borel parametrelerine, M^2 ve M'^{2}, bağımlılıkları Şekil 53 ve Şekil 54' de verilmiştir. Tablo 26, çiftlenim sabitleri için elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 53 Sol: g_1 değerinin diğer yardımcı parametrelerin merkezi değeri alındığında Borel parametresi M^2'ye göre değişimi. Sağ: g_1 değerinin diğer yardımcı parametrelerin merkezi değeri alındığında Borel parametresi M'^{2}'ye göre değişimi.



Şekil 54. Sol: $\tilde{g}_1$ değerinin diğer yardımcı parametrelerin merkezi değeri alındığında Borel parametresi M^2'ye göre değişimi. Sağ: $\tilde{g}_1$ değerinin diğer yardımcı parametrelerin merkezi değeri alındığında Borel parametresi M'^{2}'ye göre değişimi.

Tablo 26. Güçlü çiftlenim sabitleri için değerler

g_1 (GeV^{-1})	-0.15 ± 0.03
$\tilde{g}_1$ (GeV^{-1})	0.17 ± 0.04
g_2 (GeV^{-2})	0.93 ± 0.25
$\tilde{g}_2$ (GeV^{-2})	-0.24 ± 0.07
g_3 (GeV^{-2})	0.35 ± 0.08
$\tilde{g}_3$ (GeV^{-2})	-0.15 ± 0.04

Elde edilen çiftlenim sabitleri ilgili $P_c^+ \to J/\psi\, N$ ve $P_c^- \to J/\psi\, N$ geçiş kanallarına karşılık gelen bozunma genişliklerinin hesaplanmasında kullanılmıştır ve sonuçlar deneysel bulgularla kıyaslanmıştır. Bu geçişlerin bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

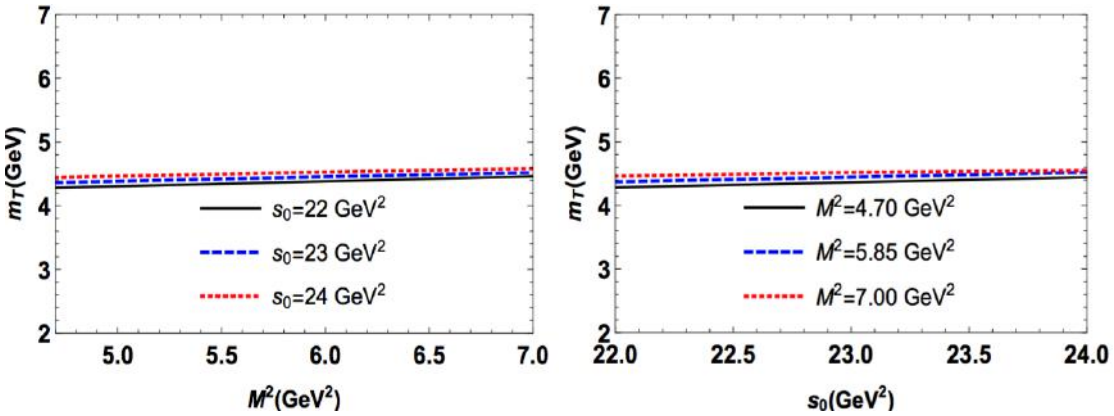
$\Gamma(P_c^+ \to J/\psi N) = 187.3 \pm 53.8$ MeV $\qquad$ $\Gamma(P_c^- \to J/\psi N) = 212.5 \pm 60.4$ MeV

Bozunma genişliği hesapları sonucunda negatif pariteli durum için elde edilen değerin deneylerde raporlanan bozunma genişliği değerine nispeten daha yakın olduğu görülmüştür. Ancak hem teorik hem de deneysel belirsizlikler dikkate alındığında genişlik üzerine elde ettiğimiz her iki pariteye karşılık gelen sonuçlar deneysel verilerle örtüşmektedir.

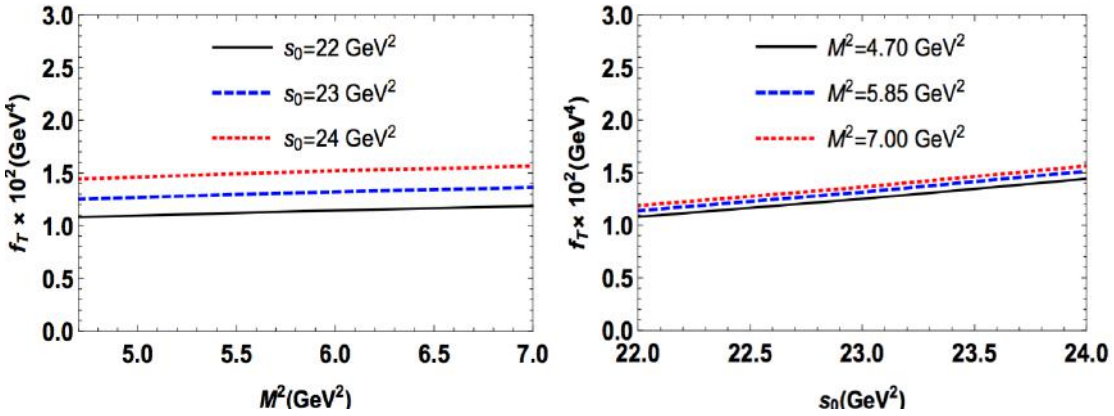
Literatürde gözlemlenen pentakuarkların iç yapıları için farklı varsayımlar yer almaktadır. Bu farklı varsayımlara dayanarak elde edilen kütle sonuçları deneysel veriler ile örtüşmektedir. Bu nedenle bu farklı modelleri ayırt edebilmek ve bu durumların iç yapıları için en iyi öneriyi sunabilmek için bu parçacıklara ait diğer fiziksel özelliklerin de teorik olarak çalışılması önem arzetmektedir. Bunlara ait güçlü geçiş mekanizmaları bu çalışmalar arasında yer alır. Bu bağlamda bu çalışma pentakuarkların iç yapılarına önemli bilgiler sağlamanın yanı sıra gelecek deneylere de ışık tutacaktır. Bu çalışmanın neticesi proje kapsamında yer alan ve pozitif ve negative pariteye sahip P_c pentakuarklar için kütle ve rezidü hesaplarını içeren çalışma ile berber ele alındığında deneysel çalışmalarda gözlemlenmiş P_c (4380) durumunun iç kuark organizasyonunda ve paritesinin belirlenmesinde yardımcı olacaktır (Azizi vd., 2018c).

Makale: The Doubly Charmed Pseudoscalar Tetraquarks $T^{++}_{cc;\bar{s}\bar{s}}$ and $T^{++}_{cc;\bar{d}\bar{s}}$, S. S.Agaev, K. Azizi, B. Barsbay , H. Sundu

Pseudoskaler dikuark-antidikuark $T^{++}_{cc;\bar{s}\bar{s}}$ ve $T^{++}_{cc;\bar{d}\bar{s}}$ durumlarının kütleleri ve mezon-akım kuplaj sabitleri iki nokta KRD-TK metodu ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, on boyuta kadar kuark, gluon ve karışık kondensatlar hesaba katılmıştır. Bu çalışma neticesinde elde edilen fiziksel parametrelere örnek olması için $T^{++}_{cc;\bar{s}\bar{s}}$ durumunun kütle ve mezon-akım kuplaj sabitinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 55 ve Şekil 56' da verilmiştir.



Şekil 55. Sol: m_T kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: m_T kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 56. Sol: f_T mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: f_T mezon akım kuplaj sabiti değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

$T^{++}_{cc;\bar{s}\bar{s}}$ ve $T^{++}_{cc;\bar{d}\bar{s}}$ durumları için elde edilen kütle ve mezon-akım kuplaj sabiti değerleri Tablo 27' de verilmiştir.

Tablo 27. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $T^{++}_{cc;\bar{s}\bar{s}}$ ve $T^{++}_{cc;\bar{d}\bar{s}}$ durumlarına ait fiziksel sonuçlar

Rezonans	$T^{++}_{cc;\bar{s}\bar{s}}$	$T^{++}_{cc;\bar{d}\bar{s}}$
M^2 (GeV^2)	4.70 – 7.00	4.5 – 6.5
s_0(GeV^2)	22 – 24	21 – 23
m_T(MeV)	4410$\pm$120	4270$\pm$115
f.10^{-2} (GeV^4)	1.31$\pm$0.25	0.81$\pm$0.19

Form faktörler için toplam kuralları dört yardımcı parametre içerir: Borel kütle parametreleri M_1^2 ve M_2^2; süreklilik eşiği s_0 ve s_0'. Form faktörler bu parametrelerden bağımsız olmalıdır. Böylece form faktörlerin bu parametrelere zayıf bir şekilde bağlı olduğu çalışma alanları

belirlenir. Süreklilik eşiği s_0 ve s_0' tamamen bağımsız değildir, ilk ve son kanalların ara kesit akımlarına göre aynı kuantum sayılı ilk uyarılmış durumların enerjileriyle ilişkilidir. Nümerik hesaplarımızın aralığı $22\text{GeV}^2 \leq s_0 \leq 24\text{GeV}^2$ ve $7\text{GeV}^2 \leq s_0' \leq 9\text{GeV}^2$ olarak belirlenmiştir. Borel kütle parametreleri için çalışma bölgesi, yüksek durumlardan ve süreklilikten gelen katkılar bastırılarak ve az katkı veren yüksek mertebeli operatörlerden gelen katkılar ortadan kaldırılarak belirlenir: $5\text{GeV}^2 \leq M_1^2 \leq 7\text{GeV}^2$ ve $3\text{GeV}^2 \leq M_2^2 \leq 6\text{GeV}^2$.

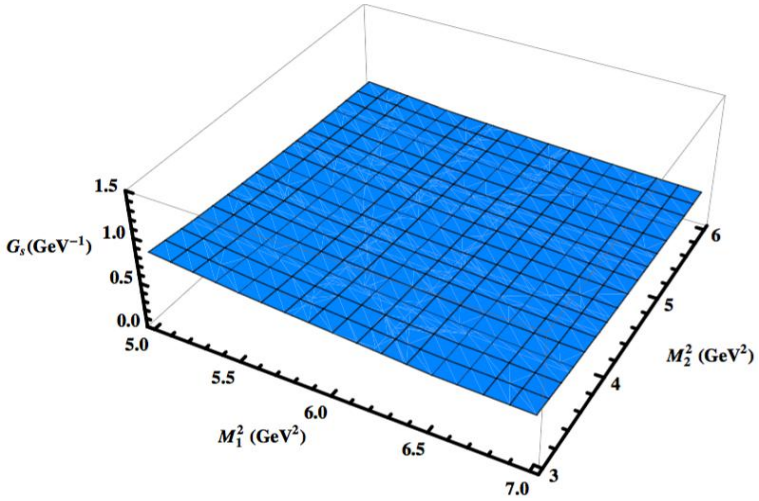
G_s form faktörünün $Q^2 = 4$ GeV^2' de M_1^2 ve M_2^2 kütle parametrelerine bağlılığı Şekil 57' de çizilmiştir. Bu şekilden form faktörün Borel kütle parametrelerine zayıf bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir. Daha sonra Şekil 58' de G_s form faktörün $Q^{2\prime}$ye bağlılığı gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi toplam kuralları sonuçları bazı noktalarda kesilmiştir. Böylece çalışma alanını bütün fiziksel alana genişletmek için uygun bir fit fonksiyonu bulmamız gerekir. Bulunan fit fonksiyonu sonuçları KRD toplam kuralları öngörüleri ile güvenli bir alanda örtüşmelidir. Bu sebepten dolayı G_s form faktörün $Q^{2\prime}$ye bağlılığı, hem toplam kurallarını hem de fit sonuçlarını içerecek şekilde Şekil 58' de gösterilmiştir. Nümerik sonuçlarımızdan form faktörlere en uygun fit fonksiyonu aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

$$F(Q^2) = \frac{f_0}{1 - a(Q^2 / m_T^2) + b(Q^2 / m_T^2)^2}$$

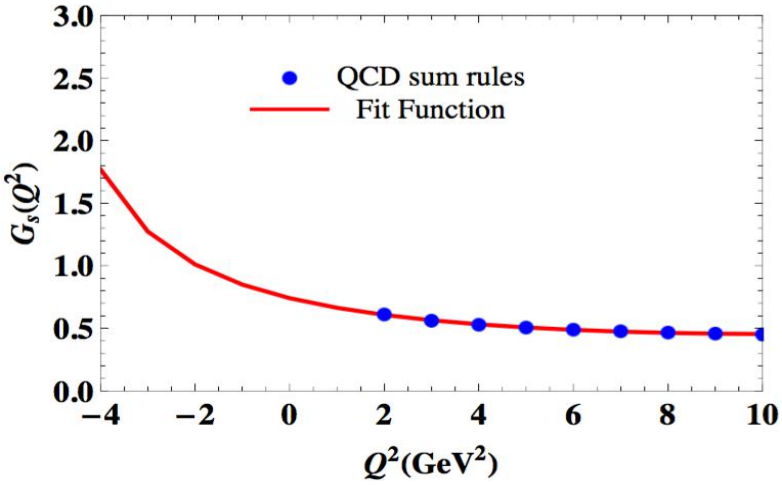
$M_1^2 = 6$ GeV^2 ve $M_2^2 = 4.5$ GeV^2' de f_0, a ve b parametre değerleri Tablo 28' de verilmiştir.

Tablo 28. Form faktörlerin fit fonksiyonunda bulunan parameter değerleri

$G_s(Q^2 = -m_{D_s}^2)$ (GeV^{-1})	f_0 (GeV^{-1})	a	b
1.68±0.45	0.74	-2.37	-2.22



Şekil 57. Sabit Q^2 =4 GeV^2 ve s_0 (s_0, s_0') orta nokta değerinde güçlü kuplaj form faktörü $G_s(Q^2)$ nin $M^2(M_1^2, M_2^2)$ Borel kütle parametrelerine bağlılığı



Şekil 58. $G_s(Q^2)$ güçlü kuplaj form faktörün Q^2 ye göre davranışı

$T_{cc;\bar{s}\bar{s}}^{++} \rightarrow D_s^+ D_{s0}^{*+}(2317)$ ve $T_{cc;\bar{d}\bar{s}}^{++} \rightarrow D^+ D_{s0}^{*+}(2317)$ bozunumlarına ait bozunma genişlikleri üç nokta KRD-TK yöntemi ile elde edilmiştir. Bozunumlara ait bozunma genişlikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 29' da verilmiştir.

Tablo 29. KRD toplam kuralları hesapları neticesinde $T_{cc;\bar{s}\bar{s}}^{++} \rightarrow D_s^+ D_{s0}^{*+}(2317)$ ve $T_{cc;\bar{d}\bar{s}}^{++} \rightarrow D^+ D_{s0}^{*+}(2317)$ bozunumlarına ait fiziksel sonuçlar

Kanallar	Γ(MeV)
$T_{cc;\bar{s}\bar{s}}^{++} \rightarrow D_s^+ D_{s0}^{*+}(2317)$	109.8±30.8
$T_{cc;\bar{d}\bar{s}}^{++} \rightarrow D^+ D_{s0}^{*+}(2317)$	52.6±14.8

Bu parçacıklar için elde edilen hem kütle hem de genlik sonuçları gelecek deneylere ışık tutacaktır (Agaev vd., 2018e).

4.2 Egzotik Parçacıkların Elektromanyetik Özellikleri / Zayıf ve Yarı-Leptonik Bozunumları

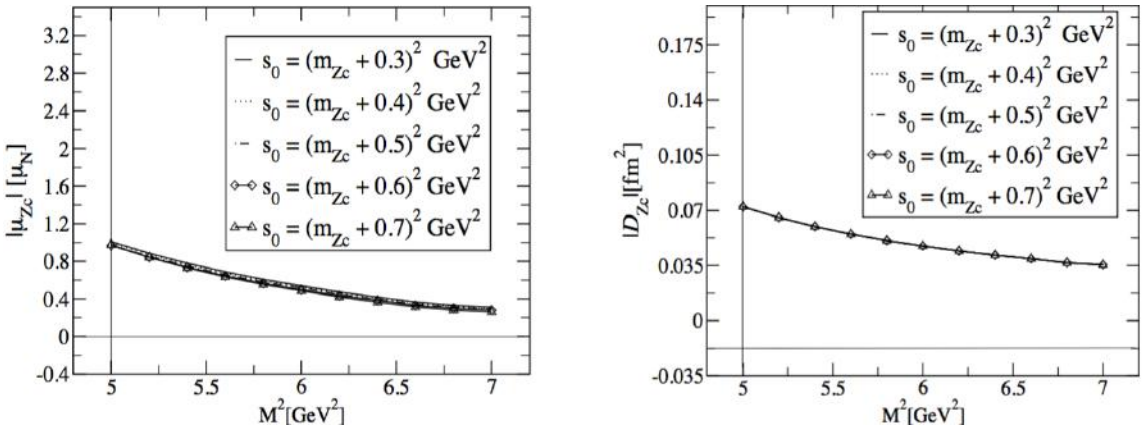
Projenin bu kısmında egzotik parçacıkların elektromanyetik özelliklerin çalışıldığı çalışmalar anlatılacaktır. Bu çalışmalarda ışık konisi KRD toplam kuralları kullanılmaktadır. KRD toplam kurallarında iki aşamalı bir yaklaşım söz konusudur. İlk önce ilişkilendirme fonksiyonu kuark ve gluon özellikleri cinsinden hesaplanır. İkinci olarak ise bu parametreler hadron özellikleri cinsinden elde edilir. Kuark ve gluon özellikleri cinsinden hesap yapılırken düşük enerjili süreçler ile KRD vakumu arasında bir bağlantı kurulur ve bu bağlantı kuark ve gluonların yoğuşmaları (veya dağılım genlikleri) cinsinden ifade edilir. Bu yaklaşımda hadronlar ara kesit akımları ile temsil edilir. Bu akımlar ilişkilendirme fonksiyonunun içine yazılır ve işlemci çarpım açılımı (Operatör Product Expansion-OPE) kullanılarak kısa ve uzun mesafe etkileşimleri tanımlanır. Pertürbatif KRD kullanılarak elde edilen sonuçlar bu şekilde vakum yoğuşmaları (veya dağılım genlikleri) türünden hesaplanmış olur. İki farklı bölgede elde edilen sonuçlar dağılım bağıntısı kullanılarak birbirine eşitlenir. Böylece, istenilen hadronik özellikler hesaplanmış olur. Işık konisi KRD yaklaşımında diğer KRD toplam kurallarından farklı olarak burada dağılım genlikleri ifadeleri yer almaktadır. Işık konisi KRD toplam kurallarında, KRD toplam kurallarında işlemci çarpım açılımından farklı olarak, OPE, seriye açılan terimlerin bir noktada kesilme zorunluluğunun getirdiği düzensizlikler mevcut değildir. Ve bu yaklaşım lokal operatörler üzerinden kısmi bir toplam içermektedir. İki ve üç nokta KRD toplam kurallarında kullanılan ilişkilendirme fonksiyonu vakum-vakum arasında yazılırken ışık konisi KRD toplam kurallarındaki ilişkilendirme fonksiyonu vakum ve dış alan arasında yazılır. Ve bu matris elemanları dağılım genlikleri cinsinden yazılarak hesaplamalar yapılır. Aynı zamanda bu bölümde zayıf ve yarı-lepyonik bozunumlara ait form faktörler üç nokta KRD toplam kuralları metodu ile hesaplanmış; elde edilen form faktörler kullanılarak tüm lepton kanallarındaki bozunma genişlikleri elde edilmiştir.

Makale: Magnetic and quadrupole moments of the $Z_c(3900)$ (Phys. Rev. D 96, no.7, 074030 (2017)), U. Ozdem, K. Azizi

Egzotik durumlarda olan önemli parçacıklardan biri, yüklü $Z_c(3900)$ parçacığıdır. $Z_c(3900)$ kütlesi X(3872)'ye çok yakın olduğu için, bir dörtlü kuark senaryosunda X(3872)'nin yüklü ortağı olarak önerilebilir. $Z_c(3900)$ parçacığının özellikleri farklı teorik modeller ve yaklaşımlarla incelenmiştir. Bu parçacıkların spektroskopik özellikleri yeterince incelenmiş olmasına rağmen, X(3872) ve $Z_c(3900)$ parçacıklarının iç yapısı ve doğası henüz tam olarak

anlaşılamamıştır. Bu nedenle bozunum özelliklerini ve diğer parçacıklarla etkileşimlerini incelemek önemlidir. Bu bağlamda, bu parçacıkların foton ile etkileşimlerinin incelenmesi, doğasının ve iç yapısının anlaşılmasında önemli bir rol oynayabilir.

Bu çalışmada, $Z_c(3900)$ egzotik parçacığının elektromanyetik yapısı çalışılmıştır. Zc(3900) parçacığının dörtlü kuark yapısında olduğu ve $J^{PC} = 1^{+-}$ kuantum sayılarına sahip olduğu varsayılarak bu çalışma yürütülmüştür. Hesaplamalarda foton dağılım genlikleri kullanılmış ve bu dağılım genlikleri Twist-4'e kadar hesaba dahil edilmiştir. $q^2 \rightarrow 0$ limiti kullanılarak bu hesaplamalar yapılmıştır. Parçacıkların elektromanyetik yapılarının detaylı çalışılması, yapı faktörleri ve çoklu momentleri gibi, KRD'nin tedirgemeci olmayan doğası hakkında önemli bilgiler elde edilmesini sağlar. Çoklu momentler parçacığın içindeki elektrik ve manyetik alanının dağılımını verir. Dolayısıyla, bu parametrelerin elde edilmesi parçacıkların geometrik yapısının anlaşılmasını sağlamaktadır. Işık Konisi KRD Toplam Kuralları yönteminde elde edilen sonuçlar Borel parametresi M^2 ve süreklilik eşiği s_0 gibi fiziksel olmayan yardımcı parametreler içerir. Bu parametreler fiziksel olmadığından sonuçların bu parametrelerin değişimine karşı kararlı olması beklenir. Şekil 59' da ikili ve dörtlü momentlerin Borel parametresi M^2'ye göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, sonuçların Borel parametresine göre değişimi oldukça fazladır, ancak süreklilik eşiğinin çalışma aralığındaki değişim göz önüne alındığında sonuçların bağımlılığı çok daha az olarak görünmektedir.



Şekil 59. $Z_c(3900)$ parçacığının ikili ve dörtlü momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.

Yürütülen bu çalışmada $Z_c(3900)$ parçacığının ikili ve dörtlü momentleri değerleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$|\mu_{Zc}| = 0.67 \pm 0.32\ \mu_N,$$

$$|D_{Zc}| = 0.054 \pm 0.018\ fm^2.$$

Sonuçlardaki hatalar, Borel parametresi M^2 ve süreklilik eşiği s_0'ın çalışma bölgelerindeki değişikliklerin yanı sıra girdi parametreleri ve foton dağılım genlikleri değerlerinin

belirsizliğinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlar fiziksel olarak yorumlandığı zaman; ikili manyetik moment değeri deneysel olarak ölçülebilecek bir büyüklüktedir ve bu da deneysel ve teorik çalışmalar için ön açıcı bir niteliktedir. Diğer yandan elde edilen dörtlü momentin büyüklüğü bu parçacığın küresel simetriye sahip olmadığını ancak bu simetrinin çok az bozulduğunu göstermektedir. Bu çalışmadan önce iki ağır kuark içeren ve dörtlü kuark yapısı olan egzotik mezonlarla ilgili elektromanyetik özelliklerinin çalışıldığı başka bir hesap bulunmamaktadır (Ozdem ve Azizi, 2017).

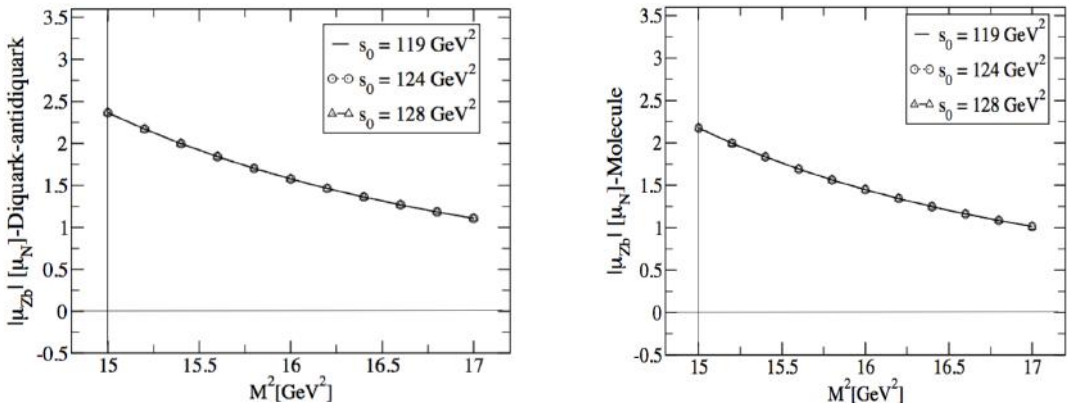
Makale: Magnetic dipole moment of $Z_b(10610)$ in light-cone QCD (Phys. Rev. D97 ,no.1, 014010 (2018)), U. Ozdem, K. Azizi

$Z_b(10610)$ parçacığının spektroskopik özellikleri yeterince incelenmiş olmasına rağmen, bu parçacıkların iç yapısı tam olarak aydınlanmış değildir. Foton ile etkileşim gibi farklı analizler, bu çoklu kuark yapısındaki durumların iç yapısına ışık tutabilir. Hadronların elektromanyetik özelliklerinin kapsamlı bir analizi, KRD'nin tedirgin olmayan doğası ve onların geometrik şekilleri hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu çalışmada, $Z_b(10610)$ parçacığının elektromanyetik yapısı araştırılmıştır. Bu parçacığın hem dörtlü kuark hem de molekül yapısında olduğu ve $J^{PC} = 1^{+-}$ kuantum sayılarına sahip olduğu varsayılarak bu çalışma yürütülmüştür. Şekil 60'da ikili manyetik momentlerin Borel parametresi M^2'ye göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, sonuçların Borel parametresine göre değişimi oldukça fazladır, ancak süreklilik eşiğinin çalışma aralığındaki değişim göz önüne alındığında sonuçların bağımlılığı çok daha az olarak görünmektedir.

Yürütülen bu çalışmada $Z_b(10610)$ parçacığının ikili manyetik momentleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

Molekül Yapı: $|\mu_{Zb}| = 1.59 \pm 0.58\ \mu_N,$

İkikuark-anti-ikikuark yapısı: $|\mu_{Zb}| = 1.73 \pm 0.63\ \mu_N.$



Şekil 60. $Z_b(10610)$ parçacığının ikili manyetik momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.

Elde edilen sayısal sonuçlardaki hata payları, Borel parametresi M^2 ve süreklilik eşiği s_0'ın çalışma bölgelerindeki değişikliklerin yanı sıra girdi parametreleri ve foton dağılım genlikleri değerlerinin belirsizliğinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen ikili manyetik moment değerleri deneysel olarak ölçülebilecek bir büyüklüktedir fakat iki farklı çerçevede elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olarak bulunmuştur. Bu nedenle hem gelecek deneylere ışık tutmak hem de bu parçacıkların özelliklerini daha iyi anlayabilmek için farklı teorik özelliklerinin çalışılması çok önemlidir. $Z_b(10610)$ parçacığının ikili manyetik momentine ilişkin herhangi bir deneysel verinin karşılaştırılması, kuark yapısı hakkında tam bilgi sahibi olmak için faydalı olacaktır ve yeni gözlemlenen egzotik durumların ve KRD'nin yapılarının anlaşılmasında bize yardımcı olacaktır (Ozdem ve Azizi, 2018a).

Makale:The electromagnetic multipole moments of the charged open-flavor Z_{cq} states (J. Phys. G45, no.5, 055003, (2018)), K. Azizi, U. Ozdem

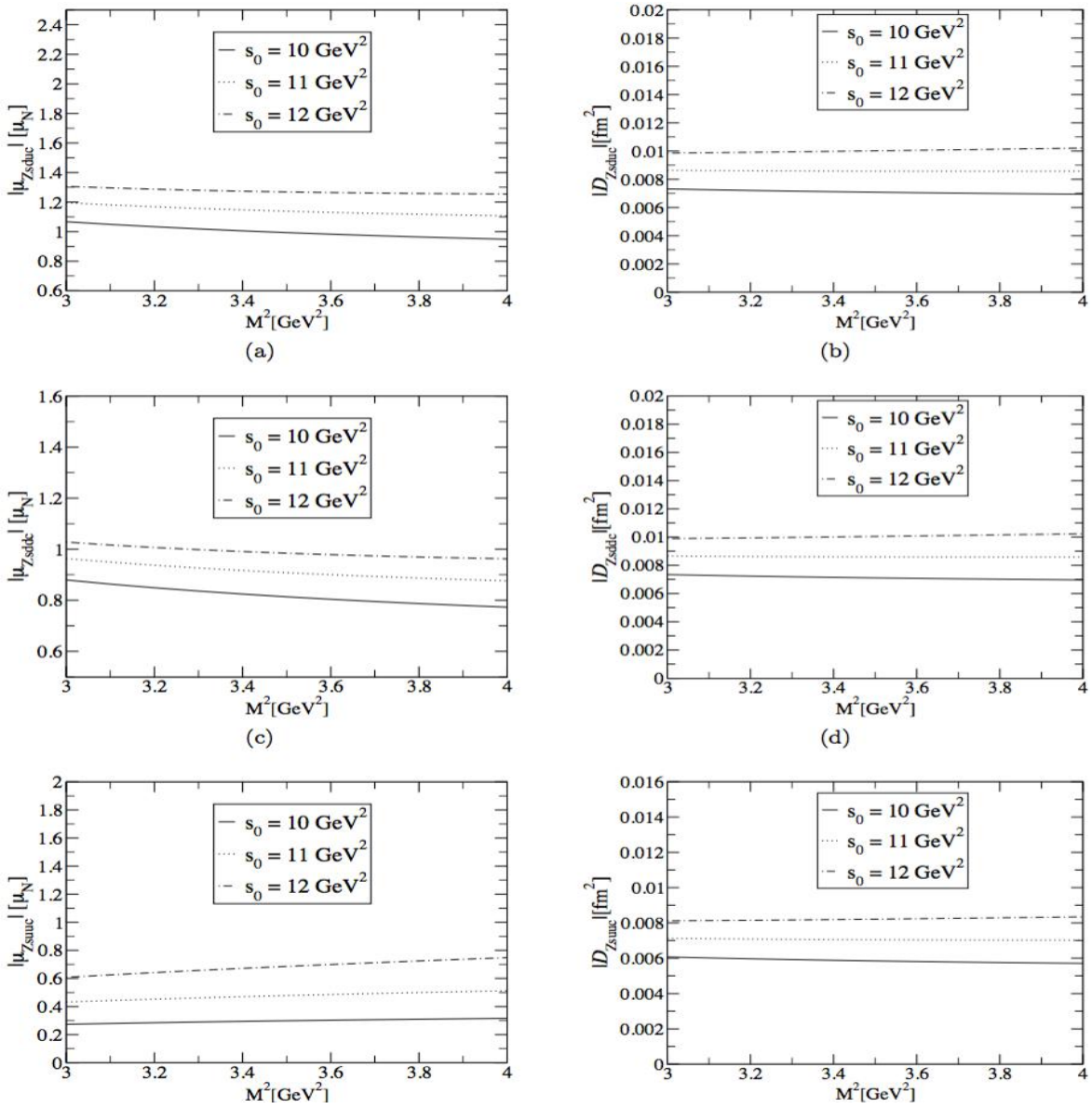
Şu ana kadar keşfedilmiş egzotik parçacıkların çoğu ortak bir özelliği paylaşıyor: gizli bir ağır kuark-antikuark çifti, $c\bar{c}$veya $b\bar{b}$ içermektedirler. Bununla birlikte, $c\bar{c}$veya $b\bar{b}$ çiftleri içermeyen çok sayıda durumun varlığı da mümkündür, çünkü KRD'nin temel yasaları, bu tür açık çeşnili çok kuarklı durumların varlığını yasaklamamaktadır. Yürütülen bu çalışmada dört kuarktan oluşan olası açık çeşnili parçacıkların elektromanyetik özellikleri araştırılmıştır. Bu parçacıkların dörtlü kuark yapısında olduğu üç hafif kuark-bir c-kuarkı ($[qq][\bar{q}c]$) içerdiği ve $J^{PC} = 1^{+-}$ kuantum sayılarına sahip olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu parçacıklar deneysel olarak gözlenmemiştir, teorik olarak olası oldukları düşünülmüştür. Şekil 61 ve Şekil 62' de ikili manyetik ve dörtlü momentlerin farklı s_0'ın değerlerinde Borel parametresi M^2'ye göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, süreklilik eşiğine göre sonuçların değişimi yaklaşık %15'lik bir değişikliğe neden olmaktadır. Borel parametresinin çalışma aralığı içinde dikkate alınan miktarların çok daha az bağımlılığı vardır. Bu nedenle, ikili ve dörtlü momentlerin sonuçlarının s_0 ve M^2'ye neredeyse duyarsız olduğunu söyleyebiliriz.

Bu olası açık çeşnili parçacıkların ikili ve dörtlü momentleri hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. İkili momentler deneysel olarak elde edilebilecek bir büyüklükte elde edilmiştir. Diğer yandan elde edilen dörtlü momentin büyüklüğü bu parçacığın küresel simetriye sahip olmadığını ancak bu simetrinin çok az bozulduğunu göstermektedir. Ve Tablo 30'dan görülebileceği gibi bazı durumların elektrik yükü -2 birim olarak öngörülmüştür ve bu elektrik yüküne sahip hiçbir egzotik parçacık gözlenememiştir. Bu da yeni bir öngörü olarak elde edilmiştir. Bu tür açık çeşnili egzotik parçacıklar şimdiye kadar gözlenmemiştir. Bu olası açık çeşnili durumların elektromanyetik çoklu momentleri hakkındaki tahminlerimizin, bu durumların spektroskopik parametreleri ile ilgili diğer teorik çalışmaların sonuçlarıyla birlikte,

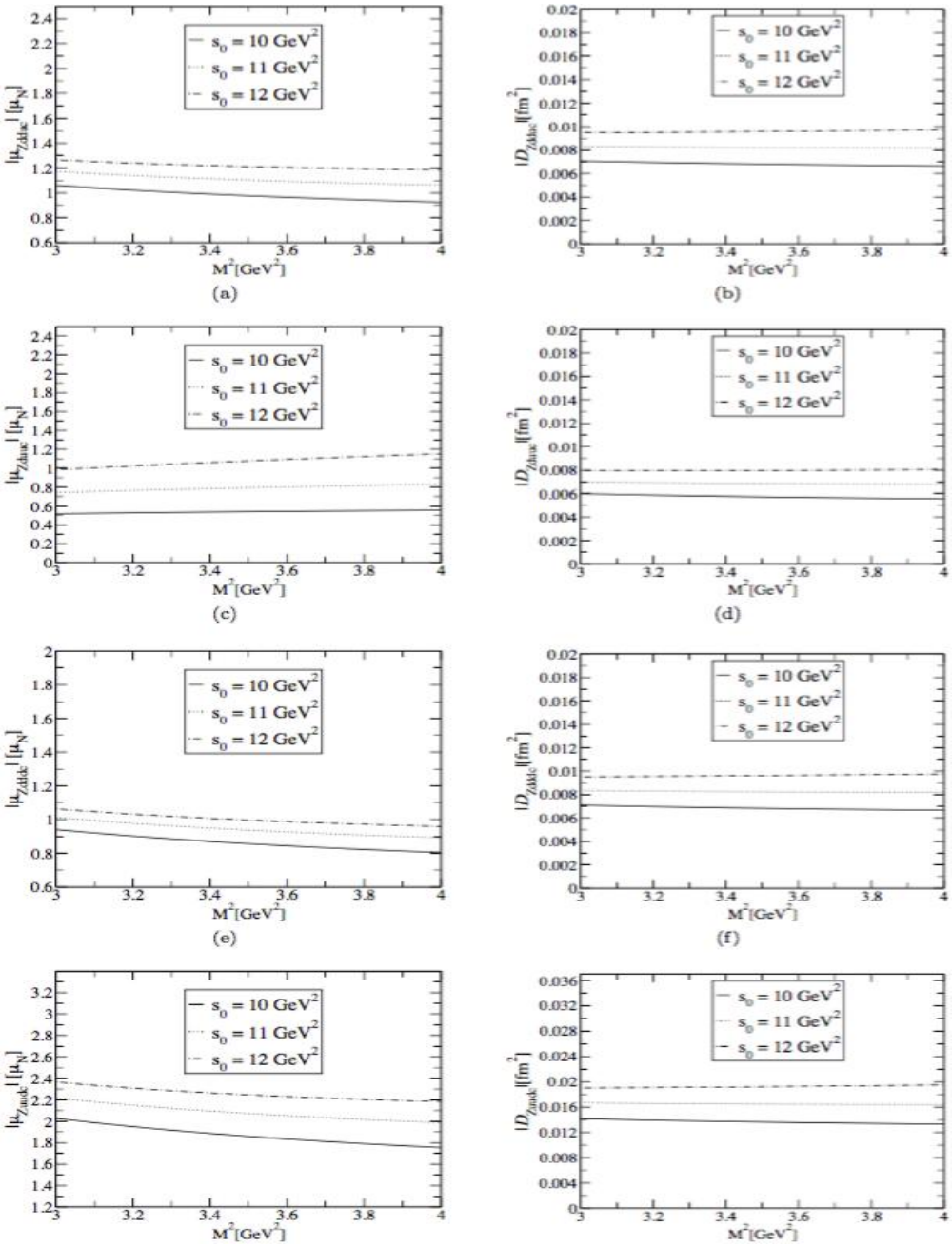
gelecek deneylerdeki arayışları için faydalı olacağını ve bu geleneksel olmayan parçacıkların kesin iç yapılarını belirleyeceğini umuyoruz (Azizi ve Ozdem, 2018d).

Tablo 30. Z_{cq} parçacıklarının ikili ve dörtlü momentlerinin sayısal değerleri.

Z_{cq}	$\lvert\mu_{Zcq}\rvert[\mu_N]$	$\lvert D_{Zcq}\rvert[fm^2]$
[sd][$\overline{uc}$]	1.12 ± 0.18	0.0086 ± 0.0015
[sd][$\overline{dc}$]	0.90 ± 0.13	0.0085 ± 0.0015
[su][$\overline{uc}$]	0.51 ± 0.24	0.0070 ± 0.0013
[dd][$\overline{uc}$]	1.09 ± 0.17	0.0082 ± 0.0014
[du][$\overline{uc}$]	0.84 ± 0.31	0.0067 ± 0.0012
[dd][$\overline{dc}$]	0.93 ± 0.13	0.0086 ± 0.0015
[uu] [$\overline{dc}$]	2.05 ± 0.30	0.016 ± 0.003



Şekil 61. Z_{cq} parçacığının ikili ve dörtlü manyetik momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.



Şekil 62. Z_{cq} parçacıklarının ikili ve dörtlü momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.

Makale: Electromagnetic multipole moments of the $P_c^+(4380)$ pentaquark in light-cone QCD (Eur. Phys. J. C78, no.5, 379, (2018)), U. Ozdem, K. Azizi

2015 yılında, LHCb iş birliği, gizli tılsımlı pentakuark durumları olan $P_c^+(4380)$ ve P_c^+ (4450) 'in iki adayını, J/ψ p'nin $\Lambda^0_b \rightarrow J / \psi K^- p$ bozunumundaki değişmez kütle spektrumunda keşfetti. $P_c^+(4380)$ ve $P_c^+(4450)$'nin tercih edilen spin-parite atamaları sırasıyla $J^P = 3/2^-$ ve $5/2^+$ olarak belirlenmiştir. Pentakuarkların minimal kuark içeriği $c\bar{c}uud$'dur, çünkü bu durumlar

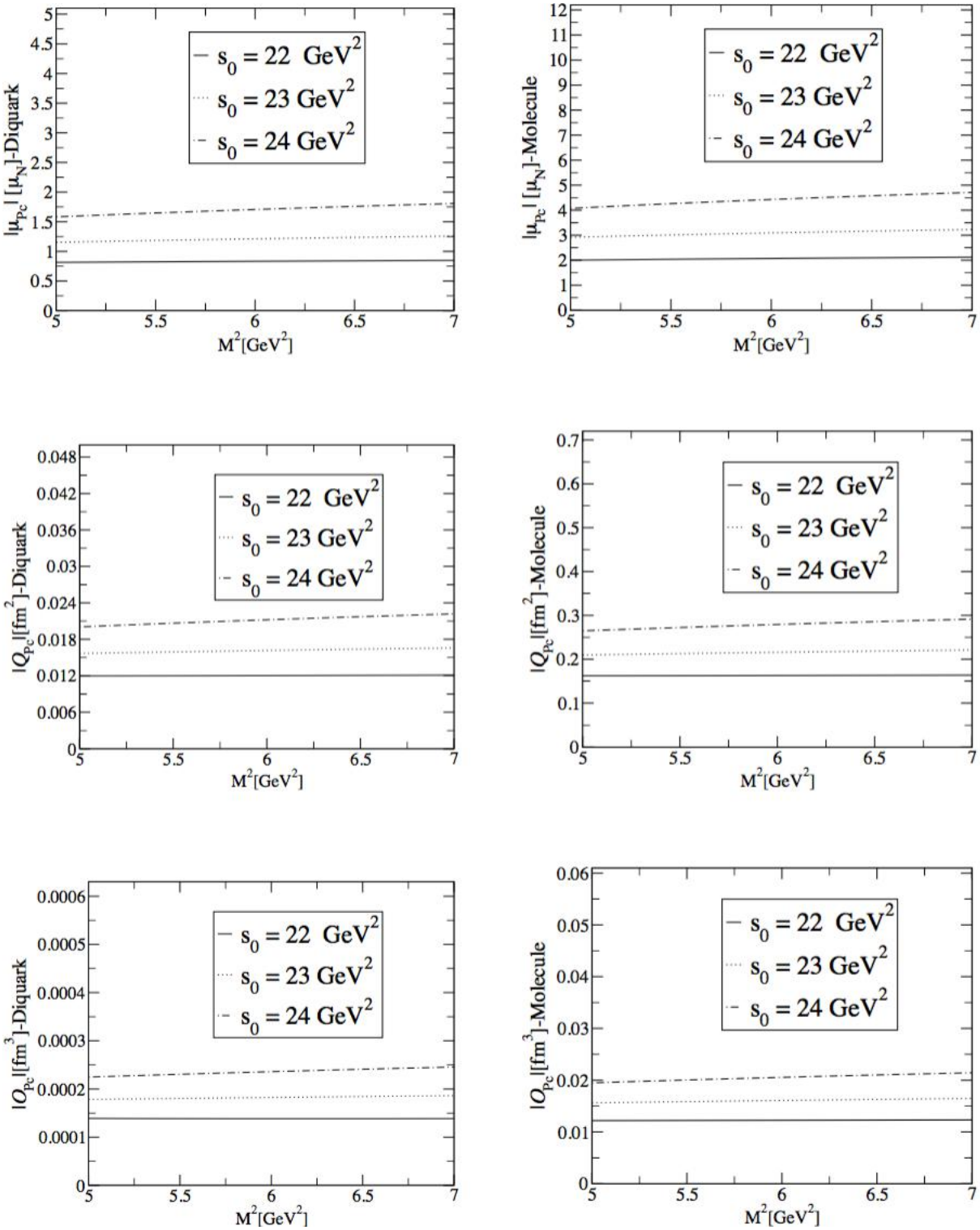
J/ψp'ye dönüşür ve dolayısıyla egzotik gizli tılsımlı pentakuarkların iyi adaylarıdır. LHCb iş birliğinin keşfinden sonra, bu parçacıkların özelliklerini açıklamak için yoğun teorik çalışmalar yapılmıştır. $P_c^+(4380)$ ve $P_c^+(4450)$ pentakuarkların spektroskopik parametreleri ve bozunumları farklı teorik model ve yaklaşımlarla incelenmiştir. Farklı teorik modeller, deneysel gözlemlerle tutarlı kütle sonuçları vermektedir. Bu nedenle, daha fazla spektroskopik ve bozunum parametrelerinin hesaplanması ve deneysel verilerle karşılaştırılması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda, $P_c^+(4380)$ parçacığının ikili manyetik, dörtlü elektrik ve sekizli manyetik momentleri hesaplanmıştır. Bu hesaplama yürütülürken bu parçacık için hem ikikuark-ikikuark-antikuark hem de baryon-mezon molekülü şeklinde bir içeriği olduğu ve $J^{PC} = 3/2^-$ kuantum sayılarına sahip olduğu düşünülmüştür. Şekil 63' de ikili manyetik ve dörtlü elektrik ve sekizli manyetik momentlerin farklı s_0'ın değerlerinde Borel parametresi M^2'ye göre değişimi verilmiştir. Bu grafikten görülebileceği gibi, ilgili elektromanyetik çoklu momentler, çalışma bölgelerindeki Borel kütle parametresinin varyasyonlarına genel olarak zayıf bir bağımlılık göstermektedir. Bununla birlikte, sonuçların süreklilik eşiği üzerindeki bağımlılığı dikkate değerdir.

İkili manyetik, dörtlü elektrik ve sekizli manyetik momentlerinin sayısal sonuçları Tablo 31'de verilmiştir.

Tablo 31. $P_c^+(4380)$ parçacığının ikili manyetik, dörtlü elektrik ve sekizli manyetik momentlerinin sayısal değerleri.

Çerçeve	$\lvert\mu_{Pc}\rvert\ [\mu_N]$	$\lvert Q_{Pc}\rvert\ [fm^2]$	$\lvert O_{Pc}\rvert\ [fm^3]$
İkikuark-ikikuark-antikuark	1.30 ± 0.50	0.017 ± 0.05	0.0002 ± 0.0006
Molekül	3.35 ± 1.35	0.23 ± 0.06	0.017 ± 0.004

İki farklı model kullanılarak elde edilen elektromanyetik çok kutuplu momentlerin değerleri, birbirinden büyük farklılıklar göstermektedir, bu sonuçlar $P_c^+(4380)$'in iç yapısını belirlemek için kullanılabilir. Diğer bir deyişle, birçok model, deneysel verilerle kütle ve bozulma genişliğinde uyumlu sonuçlar verdiğinden, pentakuarklar için kesin iç yapıyı belirlememizi önler, $P_c^+(4380)$ pentakuarkının elektromanyetik çok kutuplu momentlerinin deneysel ölçümü, aslında iç yapısını tam olarak ayırt etmemize yardımcı olabilir. Ayrıca, $P_c^+(4380)$ parçacığının elektromanyetik çok kutuplu momentlerinin deneysel olarak çalışılabilmesi için $\gamma^{(*)}p \rightarrow P_c^+(4380) \rightarrow P_c^+(4380)\gamma \rightarrow J/\psi p\gamma$ bozunum kanalı önerilmiştir (Ozdem ve Azizi, 2018b).



Şekil 63. $P_c^+(4380)$ parçacığının ikili manyetik, dörtlü elektrik ve sekizli manyetik momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.

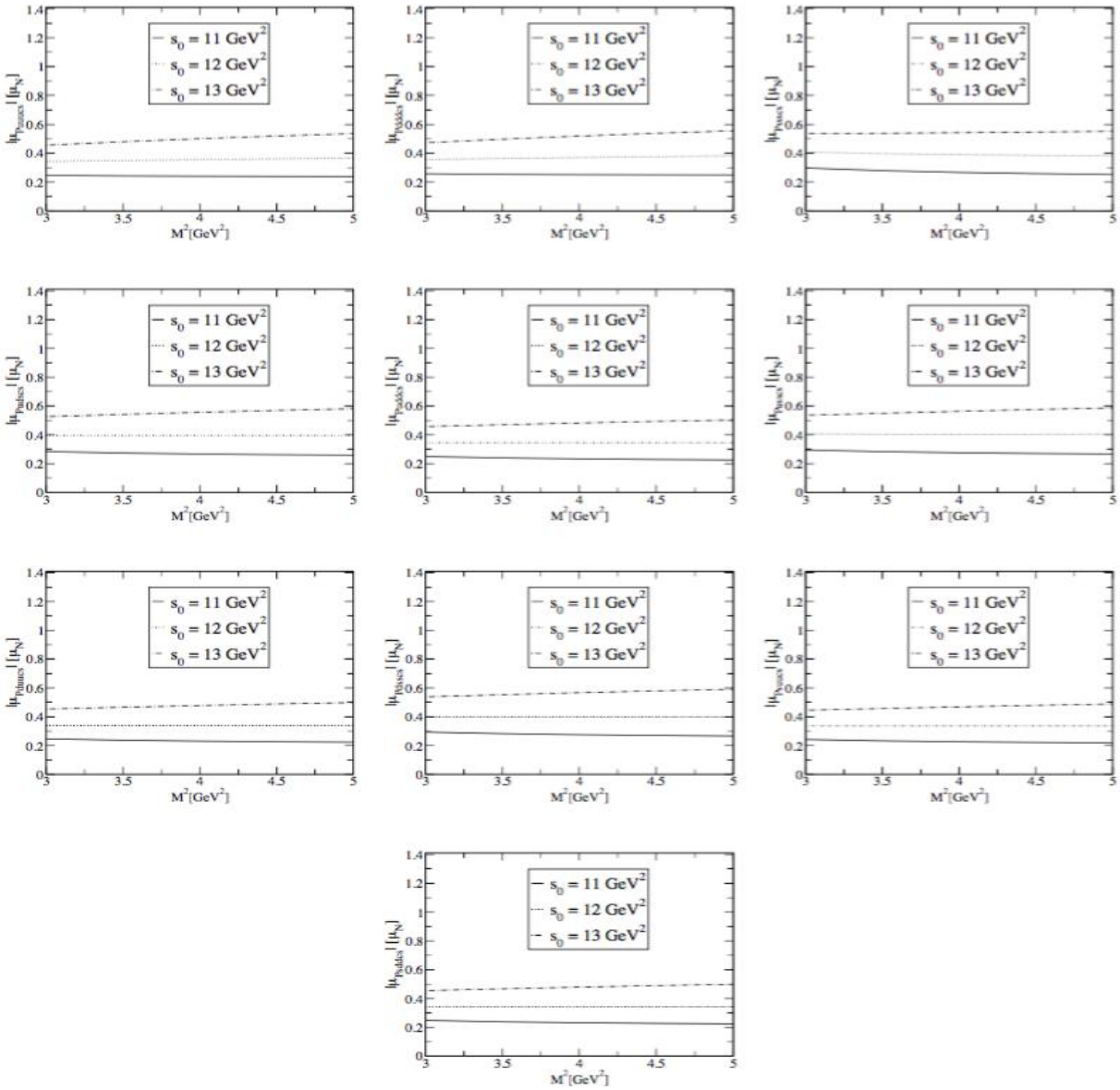
Makale: The electromagnetic multipole moments of the possible charm-strange pentaquarks in light-cone QCD (Eur. Phys. J. C78, no.9, 698, (2018)), K. Azizi, U. Ozdem

Bu çalışmada ise ileride gözlenmesi olası beşli kuark iç yapısına sahip parçacıkların elektromanyetik özelliklerinin araştırılması üzerine yapılmıştır. Bu hesaplama yürütülürken bu parçacık için üç hafif-bir tane s-kuarkı-bir-anti c-kuarkı ([qqqs$\bar{c}$]) şeklinde bir içeriği olduğu ve $J^{PC} = 3/2^-$ kuantum sayılarına sahip olduğu düşünülmüştür. Bu olası beşli kuark içeriğine sahip olan parçacıkların ikili manyetik, dörtlü elektrik ve sekizli manyetik momentleri hesaplanmıştır. Şekil 64' de örnek olarak ikili manyetik momentlerin farklı s değerlerinde Borel parametresi M^2'ye göre değişimi verilmiştir. Bu grafiklerden, ilgili manyetik dipol momentlerinin, farklı s_0 seçimleri için M^2'den neredeyse bağımsız olduğunu görüyoruz. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların süreklilik eşiği üzerindeki bağımlılıkları, yöntemin standart reçetelerinin izin verdiği sınırlar dahilinde olmaları durumunda oldukça önemlidir. Bu değişimleri nihai sonuçlarımızın hatalarına dahil ediyoruz. İkili manyetik ve dörtlü elektrik momentlerinin sayısal sonuçları Tablo 32'de verilmiştir.

Tablo 32. P_{cs} parçacıklarının ikili manyetik ve dörtlü elektrik momentleri değerleri.

P_{cs}	$\lvert\mu_{Pcs}\rvert[\mu_N]$	$\lvert Q_{Pcs}\rvert[fm^2](\times 10^{-3})$
[udd$\bar{c}$s]	0.36 ± 0.14	0.21 ± 0.03
[duu$\bar{c}$s]	0.36 ± 0.14	0.21 ± 0.03
[suu$\bar{c}$s]	0.36 ± 0.14	0.21 ± 0.03
[sdd$\bar{c}$s]	0.36 ± 0.14	0.21 ± 0.03
[uuu$\bar{c}$s]	0.39 ± 0.15	0.22 ± 0.03
[ddd$\bar{c}$s]	0.40 ± 0.15	0.23 ± 0.04
[sss$\bar{c}$s]	0.40 ± 0.15	0.23 ± 0.04
[uds$\bar{c}$s]	0.42 ± 0.16	0.23 ± 0.04
[uss$\bar{c}$s]	0.43 ± 0.16	0.23 ± 0.04
[dss$\bar{c}$s]	0.43 ± 0.16	0.23 ± 0.04

İkili manyetik momentleri için elde edilen sayısal değerler, gelecekteki deneylerde ölçülecek kadar büyüktür. Ancak P_{cs} pentakuarkların elektriksel dört kutuplu momentlerin küresel olmayan bir dağılım gösteren çok küçük sonuçları var. Sekizli manyetik momentlerinin değerleri sıfıra çok yakın olarak elde edilmiştir. Elde edilen elektromanyetik parametrelerin gelecekteki ölçümleri ve elde edilen verilerin teorik tahminlerle karşılaştırılması, kuark-gluon organizasyonunun yanı sıra pentakuarkların doğasına ışık tutabilir.



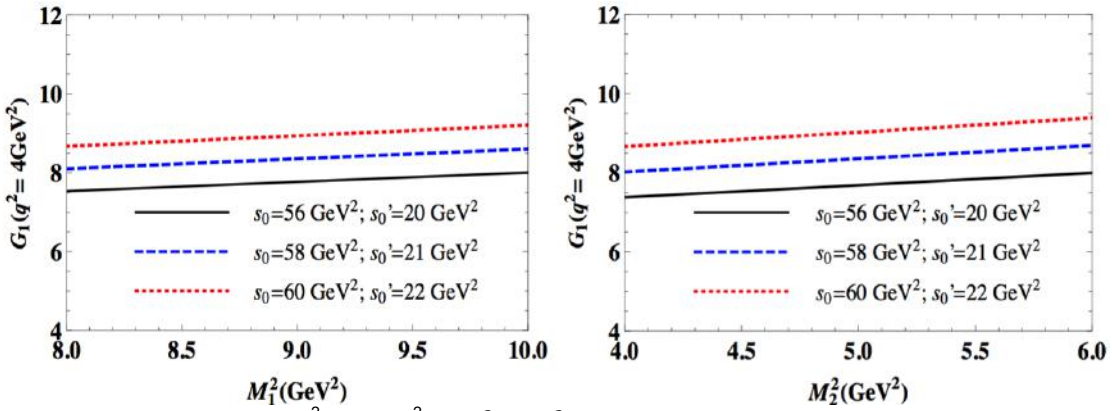
Şekil 64. P_{cs} parçacıklarının ikili manyetik manyetik momentlerinin süreklilik eşiği s_0'ın farklı değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı.

Hadronların elektromanyetik yapılarının detaylı bir incelemesi, sadece KRD'nin tedirgemeci olmayan doğası hakkında önemli bilgiler sağlamakla kalmaz, aynı zamanda hadronların iç yapılarını belirleyen dinamikleri anlamak açısından önemli araçlardır. Elektromanyetik çoklu momentler, çalışılan parçacığın yarıçapı, geometrik şekli, elektrik ve manyetik yük dağılımları ve bu yük dağılımlarının kökeni hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Hadronlarda, kuarklar yükün taşıyıcılarıdır ve bu nedenle bu elektromanyetik çoklu momentlerin çalışılması doğrudan kuarkların elektrik yükünün mekânsal dağılımının ve aynı zamanda altta yatan dinamiklerin anlaşılmasını sağlar. Elektromanyetik çoklu momentlerin büyüklüğü ve işareti, hadronun yapısı, boyutu ve şekli hakkında önemli bilgiler sağlar. Özet olarak projenin bu aşamasında yapılan çalışmaların sonucunun gelecekte yapılması planlanan deney verilerinin analizinde kullanılabilmesinin yanı sıra bu konuda yapılacak teorik işlere yön verme

kapasitesine sahip olacağı düşünülmektedir. Bozunum kanalları ile ilgili elde edilecek sonuçlar ileride yapılacak deney verileri ile kıyaslandığında sadece kütle hesabı ile öngörülmüş olası yapıların ve onları temsil eden kuantum sayılarının yanı sıra ara kestirim akımlarının doğru olup olmadığına dair önemli bilgiler sunabilecektir (Azizi ve Ozdem, 2018e).

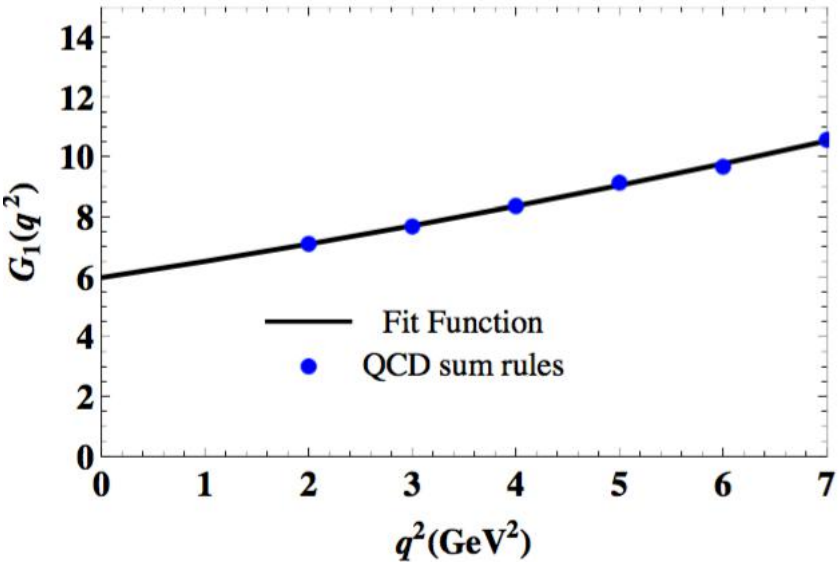
Makale: Probing An Axial-Vector Tetraquark Z_s Via Its Semileptonic Decay $Z_s \to X(4274)\bar{l}\nu_l$ (Eur. Phys. J. A 54, no. 7, 124, (2018)), H. Sundu, B. Barsbay, S. S.Agaev, K. Azizi

Yarı-leptonik $Z_s \to X(4274)\bar{l}\nu_l$ bozunum kanalının geçiş form faktörleri üç-nokta KRD toplam kuralı metodu ile hesaplanmıştır. Kuark içerikleri Z_s = [cs][$\bar{b}s$] ve X(4274) = [cs][$\bar{c}\bar{s}$] dikuark-antidikuark durumu olarak ele alınmıştır. Form faktör için toplam kuralları dört yardımcı parametre içerir. Borel kütle parametreleri M^2 ve M'^2; süreklilik eşiği s_0 ve s_0'. Form faktörler bu parametrelerden bağımsız olmalıdır. Böylece form faktörlerin bu parametrelere bağlı olmadığı çalışma alanları belirlenir. Bu çalışma neticesinde elde edilen G_1, G_2, G_3 ve G_4 form faktörlerinin yardımcı parametrelere bağımlılığını örneklemek için G_1 form faktörün q^2 = 4 GeV^2 de M^2 ve M'^2 kütle parametrelerine bağlılığı Şekil 65' de verilmiştir.



Şekil 65. G_1 form faktörün q^2 = 4 GeV^2 de M_1^2 ve M_2^2 Borel kütle parametrelerine bağlılığı

Şekil 65'den form faktörlerin Borel kütle parametrelerine zayıf bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir. G_1 form faktörün q^2'ye göre davranışı Şekil 66' da gösterilmiştir.



Şekil 66. G_1 form faktörün q^{2}'ye göre davranışı

Bu grafikten görülen toplam kuralları sonuçlarının bazı noktalarda kesilmesidir. Bu nedenle alanı bütün fiziksel alana genişletmek için fit fonksiyonu kullanmak gerekir. Kullanılan fit fonksiyonu sonuçları KRD toplam kuralları ile örtüşmelidir. Bu sebepten dolayı form faktörlerin q^{2}'ye bağlılığı hem toplam kurallarını hem de fit fonksiyonunu içerecek şekilde gösterilmiştir. $Z_s \rightarrow X\ (4274)\, \bar{l}\nu_l$ geçişi için form faktörlerin fit fonksiyonunda bulunan parametre değerleri Tablo 33' de verilmiştir.

Tablo 33. Form faktörlerin fit fonksiyonunda bulunan parametre değerleri

$F_i(q^2)$	f_0^i	c_{1i}	c_{2i}	m_{fit}^2 (GeV^2)
$F_1(q^2)$	5.97	4.68	-2.81	53.29
$F_2(q^2)$	44.39	1.39	18.08	53.29
$F_3(q^2)$	-10.50	4.39	1.78	53.29
$F_4(q^2)$	-4.28	7.01	-20.73	53.29

Tüm lepton kanallarında (l = e, μ, τ) $Z_s \rightarrow X\ (4274)\, \bar{l}\nu_l$ geçişinin bozunma genişliğini hesaplamak için elde edilen geçiş form faktörlerinin değerleri kullanılmıştır. Farklı lepton kanallarında bozunum genişliğinin nümerik değerleri Tablo 34' de verilmiştir.

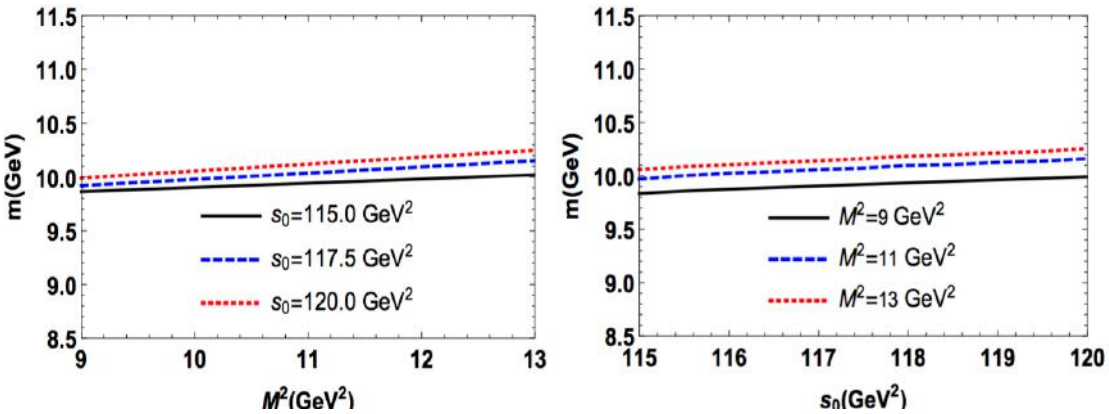
Tablo 34. Farklı lepton kanallarında bozunum genişliğinin nümerik değerleri

Lepton Kanalları	Γ(MeV)
$Z_s \rightarrow X\bar{e}\nu_e$	$(4.51\pm1.56).10^{-9}$
$Z_s \rightarrow X\bar{\mu}\nu_\mu$	$(4.47\pm1.54).10^{-9}$
$Z_s \rightarrow X\bar{\tau}\nu_\tau$	$(9.03\pm3.16).10^{-10}$

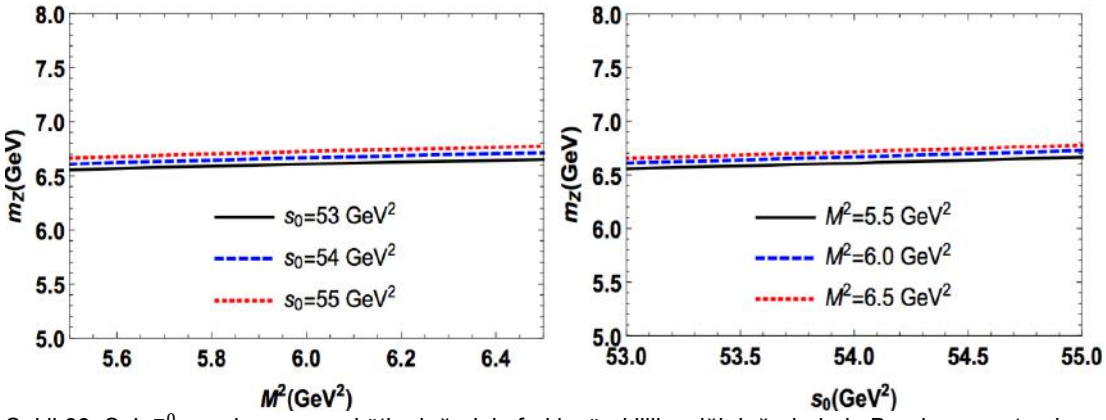
Elde edilen sonuçlar, geleneksel hadronlarda olduğu gibi yarı-leptonik geçişler için de toplam genişliğin çok küçük bir parçasını oluşturduğunu göstermektedir (Sundu vd., 2018c).

Makale: Weak Decays of The Axial-Vector Tetraquark $T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}}$, S. S.Agaev, K. Azizi, B. Barsbay , H. Sundu

Aksiyel-vektör tetrakuark $T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}}$ durumunun skaler $Z^0_{bc;\bar{u}\bar{d}}$ durumuna geçişi üç nokta KRD-TK yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Yarı-leptonik $T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}} \rightarrow Z^0_{bc;\bar{u}\bar{d}} l\bar{\nu}_l$ bozunumunu incelemek için ilk olarak spektroskopik parametreleri iki nokta KRD-TK metodu ile hesaplanmıştır. $T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}}$ ve $Z^0_{bc;\bar{u}\bar{d}}$ durumlarının kütlelerinin Borel parametresi M^2'ye ve süreklilik eşiği s_0'a bağlılığını gösteren grafikler Şekil 67 ve Şekil 68' de verilmiştir.



Şekil 67. Sol: $T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}}$ durumunun kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}}$ durumunun kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.



Şekil 68. Sol: $Z^0_{bc;\bar{u}\bar{d}}$ durumunun kütle değerinin farklı süreklilik eşiği değerlerinde Borel parametresi M^2 bağımlılığı. Sağ: $Z^0_{bc;\bar{u}\bar{d}}$ durumunun kütle değerinin farklı Borel parametresi değerlerinde süreklilik eşiği s_0' a bağımlılığı.

$T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}}$ aksiyel vektör tetrakuark durumunun kütlesi; kuvvetli ve elektromanyetik bozunmalara karşı kararlı olduğunu gösteren m = (10035$\pm$120) MeV olarak elde edilmiştir. $T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}} \rightarrow Z^0_{bc;\bar{u}\bar{d}} l\bar{\nu}_l$ bozunumunun tüm lepton kanallarındaki bozunma genişlikleri ve ortalama ömrü hesaplanmıştır. Farklı lepton kanallarında bozunum genişliğinin nümerik değerleri Tablo 35' de verilmiştir.

Tablo 35: Farklı lepton kanallarında bozunum genişliğinin nümerik değerleri

Lepton Kanalları	Γ(MeV)
$T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}} \rightarrow Z^0_{bc} e\bar{\nu}_e$	(2.65$\pm$0.74).10^{-8}
$T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}} \rightarrow Z^0_{bc} \mu\bar{\nu}_\mu$	(2.64$\pm$0.73).10^{-8}
$T^-_{bb;\bar{u}\bar{d}} \rightarrow Z^0_{bc} \tau\bar{\nu}_\tau$	(1.88$\pm$0.53).10^{-8}

Elde edilen toplam bozunma genişliği Γ = (7.17$\pm$1.17)x10^{-8} MeV ve ortalama ömrü τ = $9.18^{+1.79}_{-1.29}$ fs sonuçları, çift-ağır tetrakuarkların deneysel araştırmaları için yararlı olacaktır. Bu çalışma dergiye gönderilmiştir (Agaev vd., 2018f).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Proje kapsamında, standart hadronlar olarak adlandırdığımız mezon ve baryonlardan farklı iç kuark-gluon yapılarına sahip egzotik parçacıklar ele alınmıştır. Bu farklı yapılara sahip egzotik parçacıkların var olabilmeleri 1970'lerde teorik fizikçiler tarafından öne sürülmelerine rağmen onların ancak bazıları son 15 yılda deneylerin kaydettiği önemli gelişimlerle birlikte gözlemlenmiştir. Bu yapılar, genel olarak XYZ parçacıkları, hibritler, mezon molekülleri, dörtkuarklar ve beşkuarklar gibi egzotik parçacıklar olarak bilinmektedir. Deneysel açıdan, bu parçacıklarla ilgili iki önemli devrim yaşanmıştır. Birincisi 2003'te Belle deneyi tarafından bulunan X(3872) dörtkuark adayı olup, ikinci devrim ise 2015 yılında LHCb tarafından keşfedilmiş $P_c(4380)$ ve $P_c(4450)$ beşkuarkları olmuştur. Proje önerimiz, bu alandaki gelişmeler göz önüne alındığında, oldukça etkili bir zamanda yapılmış olup, proje esnasında LHCb, Belle, BESIII ve Fermilab gibi dünyanın önde gelen hadron laboratuvarları tarafından bir çok yeni egzotik adayı parçacıklar bulunmuştur. Projemiz deney ile çok yakın ilişkide olup deney sonuçlarının yorumlanmasında, yeni bulunan parçacıkların iç-yapılarının, doğalarının ve kuantum sayılarının belirlenmesinde önemli rol oynamıştır. Proje kapsamında bulunan sonuçlar gelecek deneylerine de ışık tutacaktır.

Proje kapsamında, aynı zamanda, teorik ve fenomenolojik olarak var olabilecek çok sayıda parçacık olabileceği öne sürülmüş olup çeşitli parametrelerinin ölçümleri için gelecek deneylerine çeşitli önerilerde bulunulmuştur. Projede, hem deneyde bulunan hem de teorik olarak var olabilecek egzotik parçacıkların spektroskopik özellikleri ile onların güçlü, elektromanyetik ve zayıf geçiş kanalları incelenerek elde edilen sonuçlar var olan deney dataları ve başka teorik öngörülerle kıyaslanmıştır. Hesaplamalarda kuantum renk dinamiği toplam kuralları, egzotik parçacıklara genelleştirilerek kullanılmıştır. Egzotik hadronların hesapları, iç kuark-gluon yapılarından dolayı, çok ağır ve uzun olduğundan çok sayıda Mathematica bazlı kodlar geliştirilip hem analitik hesaplar hem de nümerik analizlerde kullanılmıştır.

Egzotik hadronların spektroskopik parametreleri onların kütle ve bozunum sabitleri gibi özelliklerini içermektedir. Bu amaçla iki nokta toplam kuralları kullanılmıştır. Bir hadronun kütlesi, onun hesaplanması gereken en önemli parametresidir. Kütle hesabı sonucu bir parçacığın kuantum sayıları hakkında bilgi edinebilmek mümkündür. Ancak, özellikle egzotik parçacıklar için, ele alınan farklı iç yapı varsayımlarından elde edilen kütle sonuçları deneysel kütle sonuçları ile uyumlu neticeler vermektedir. Bu nedenle, bir parçacık hakkında

net bilgi edinip onun doğası, iç kuark-gluon yapısı ve kuantum sayılarını sabitlemek için parçacığın olası tüm bozunum kanalları incelenmelidir. Bozunumlar, güçlü, zayıf ve elektromanyetik bozunumlar olabilir. Bu bozunum kanallarını incelemek için en önemli girdi parametresi o parçacığın bozunum sabiti veya rezidüsüdür. Proje kapsamında birçok egzotik parçacık için kütle ve rezidü hesabı yapılıp sonuçlarımız bulgular kısmında verilmiştir.

Proje kapsamında birçok egzotik parçacığın güçlü bozunum ve etkileşmeleri incelenmiştir. Bu bağlamda, elde edilen kütle ve rezidüler girdi parametresi olarak kullanılıp güçlü bozunum kanallarını temsil eden güçlü çiftlenim sabitleri hesaplanmıştır. Bu güçlü çiftlenim sabitleri etkileşime karışan hadronik köşeleri temsil etmektedir. Bu sabitleri hesaplamak için ışık konisi toplam kuralları, on-shell parçacığın dağılım fonksiyonları ile birlikte kullanılmaktadır. Bu sabitlerin belirlenmesi, ilgili etkileşim köşeleri hakkında önemli bilgi sağlar. Büyük hadron çarpışma deneylerinde bu tür hadronik köşeler oluşabilir, onun için bu hesaplar deney sonuçlarının yorumlanmasında kullanılabilir. Hadron çokluları arasındaki güçlü çiftlenim sabitlerini kullanarak ilk parçacığın son hadronlara bozunum genliğini de hesaplamak mümkündür. Bu projede, ilgili çiftlenim sabitlerini kullanarak bir çok güçlü bozunum kanalı incelenmiş olup ilgili geçişlerin genlikleri hesaplanmıştır. Bir parçacığın tüm bozunum kanalları göz önüne alınarak parçacığın toplam genliği ve yaşam ömrü hesaplanabilir. Proje kapsamında bir çok egzotik parçacığın genliği hesaplanıp var olan deney verileri ile kıyaslanmıştır. İlgili sonuçlar bulgular kısmında ayrıntılı olarak verilmiştir. Var olacakları bizim tarafımızdan öne sürülen parçacıklar için genlik sonuçlarımız ilgili parçacıkların deneyde arayışlarına ışık tutacaktır.

Hadronların elektromanyetik özellikleri, onların iç-yük dağılımları, yarı çapları ve geometrik şekillerinin belirlenmesi kuantum renk dinamiğinin en önemli amaçlarından birisidir. Bu doğrultuda bilgi edinmek için, en etkili yol hadronların elektromanyetik bozunum ve etkileşmelerinin incelenmesidir. Proje kapsamında, ışık konisi toplam kuralları ve fotonun dalga fonksiyonu kullanılarak çeşitli egzotik hadronların radiatif geçişleri incelenmiştir. Bu tür geçişler bir kaç elektromanyetik yapı faktörü cinsiden parametrize edilebilir. Proje kapsamında mevcut ve var olabilecek dörkuark ve beşkuarklar için ilgili elektromanyetik yapı faktörleri hesaplanmış olup, bunlar kullanılarak ele alınan durumlar için yük, manyetik çift kutup ve elektrik dört kutup hesaplanmıştır. Bu nicelikler üzerinde şimdilik herhangi bir deney datası bulunmamaktadır. Ancak büyük hadron çarpıştırıcı deneylerindeki gelişmeler göz önüne alındığında, bu niceliklerin yakın zamanda ölçülebilir olacağı düşünülmektedir. Sonuçlarımız bulgular kısmında verilmiştir. Sonuçlarımızın gelecekte olası deney dataları ile

kıyaslanmasının sonucu bu parçacıkların iç yapısı hakkında önemli bilgi vereceğine inanmaktayız.

Parçacıkların önemli bozunum kanallarından birisi onların zayıf veya yarı-leptonik bozunumlarıdır. Bazı egzotik kanallarda bu tür bozunumlar, fiziksel şartlardan dolayı, parçacığın baskın bozunum kanallarını oluşturmaktadır. Bu projede öneminden dolayı, özellikle bu tür bozunum kanalları araştırılmıştır. Bu konu üzerine yapılmış çalışmalarımız çok önemli olup gelecek teorik çalışmalara ve deneylere ışık tutacaktır. Egzotik hadronların zayıf bozunumları bazı zayıf yapı faktörleri cinsinden ifade edilir. Bu yapı faktörleri üç nokta KRD toplam kuralları ile hesaplanmıştır. İlgili yapı faktörleri kullanılarak çeşitli fiziksel nicelikler hesaplanmıştır. Bu niceliklerden, en önemlileri ilgili kanalın genlik ve dallanma oranıdır. Bunlarla ilgili, ayrıntılı sonuçlarımız yine bulgular kısmında verilmiştir. İlgili çalışmalarımızda, gelecekte deneylerde ölçümlerinin yapılması için, çeşitli önerilerde bulunulmuştur. Son zamanlarda, hadronların yarı-leptoik geçişleri çok önem arz etmektedir. Bazı zayıf bozunum kanallarında, deney sonuçları standart model öngörüleri ile ciddi uyuşmazlık göstermektedir. Bu tutarsızlıklar, yeni fizik göstergesi olabilir. Egzotik hadronlarla ilgi yaptığımız yarı-leptonik ve zayıf bozunum kanalları hakkındaki sonuçlarımız gelecek deney dataları ile kıyaslanabilir. Öngörülerimiz ile deney datası arasındaki olası sapma, yine standart hadronlardaki gibi, yeni fizik arayışlarında kullanılabilir.

Projemiz kapsamında, deneylerle yakın ilişki içerisinde, çok önemli ve değerli parametreler hesaplanmış olup egzotik parçacıklar hakkında önemli bilgiler elde etmiş bulunmaktayız. Sonuçlarımız, zaman zaman var olan ve sürmekte olan deney datalarının analizinde kullanılmıştır. Örneğin, Fermilab'daki D0 işbirliği tarafından Şubat 2016 da gözlemlenen X(5568) parçacığı hakkında, daha önceden çalışmalarımıza başladığımızdan, bazı parametreleri hesaplayarak, onun iç yapısını ve kuantum sayılarını belirleyen ilk teorik grup olduk. Bunların yanı sıra, proje kapsamında çeşitli parçacıkların olabileceğini öne sürmüş bulunmaktayız. Bunların bazıları için deneylerde arayışlar sürmektedir. Örneğin ağır b-kuark içeren spin 3/2 ve 5/2'ye sahip olabilecek beşkuark sistemleri CERN'deki LHCb işbirliği tarafından aranmaktadır. Bulunmaları durumunda ve sonuçların bizim öngörülerimiz ile uyumlu olması durumunda önemli bir başarı elde etmiş olacağız. Proje kapsamında buna benzer çok sayıda öngörümüz bulunmaktadır.

Proje kapsamında ayrıca genç bilim insanı da yetiştirilmiştir: Bir yüksek lisans öğrencisi tezini bitirip doktora eğitimine başlamıştır. Bir doktora sonrası araştırmacı ise proje konusunda

uzmanlaşmıştır. Projede 31 adet çalışma gerçekleştirilmiştir: 28 tanesi alanının saygın dergilerinde yayımlanmış olup üçü ise hakem değerlendirme aşamasındadır.

Bu projenin konuları üzerine çalışmalar, ekibimiz tarafından devam ettirilmektedir. Egzotik hadronlar ile ilgili uluslararası literatürde önemli yer edinen bu grubun, daha da genişletilerek, bu konular üzerindeki çalışmalarına devam etmesi beklenmektedir. Grubumuzu ve Türkiye'yi egzotik hadronlar konusunda çok ileri bir düzeye taşımanın gururunu yaşamaktayız. Gelecekte daha fazla deneyle işbirliği kurarak bu bayrağı daha ileriye taşımayı amaçlamaktayız. Çalışmalarımız uluslararası teorik literatüre verdiği katkının yanısıra gelecekte yapılacak deneylere ışık tutacaktır. Ayrıca, bu çalışmalar evrenin dört-temel etkileşimlerinden birisi olan kuantum renk dinamiğinin perturbatif ve perturbatif olmayan yönleri hakkında bilgi içermektedir. Böylece, sonuçlarımız gelecek deney sonuçları ile birleştiğinde evren hakkında bilgimizin artmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Aaij, R. 2014. “Observation of the resonant character of the Z(4430)- state”, Phys. Rev. Lett., 112, 222002.

Aaij, R. 2015. “Oservation of J/ψp resonances consisten with Pentaquark states in Λ0b→J/ψK−”, Phys. Rev. Lett., 115, 072001.

Aaltonen, T. 2009. “Evidence for a Narrow Near-Threshold Structure in the Mass Spectrum in Decays”, Phys. Rev. Lett., 102, 242002.

Aaltonen, T., Gonzalez, A.B., Amerio, S., Amidei, D., Anastassov, A. et al., 2017. “Observation of the Y(4140) structure in the J/ ψϕ Mass Spectrum in decays”, Mod. Phys. Lett. A, 32, 1750139.

Abazov, V. M. 2014. “Search for the X(4140) state in decays with the D0 detector”, Phys. Rev. D, 89, 012004.

Abazov, V. M. 2016. “Evidence of Bsπ state”, Phys. Rev.Let., 2016, 117, 022003.
Abe, K., 2005. “Observation of a new charmonium-like state produced in association with a in annihilation at Phys. Rev. Lett., 98, 082001.

Ablikim, M. 2013a. “Observation of a charged charmoniumlike structure in at Phys. Rev. Lett., 110, 252001.

Ablikim, M. 2013b. “Observation of a Charged Charmoniumlike Structure Zc(4020) and Search for the Zc(3900) in ”, Phys. Rev. Lett., 111, 242001.

Ablikim, M. 2014a. “Observation of a charged charmoniumlike structure in at Phys. Rev. Lett., 112, 132001.

Ablikim, M. 2014b. “Observation of a charged mass peak in at Phys. Rev. Lett., 112, 022001.

Abreu, L.M., Navarra, F.S., Nielsen, M., Vasconcellos, A.L. 2018. “Zb(10610) in a hadronic medium”, Eur. Phys. J., C, 78, 752.

Adachi, I. 2012. “Study of three-body Y(10860) decays”, http://arxiv.org/abs/hep-ex/1200.6450.

Adlarson, P. 2014. “Evidence for a New Resonance from Polarized Neutron-Proton Scattering”, Phys. Rev. Lett., 112, 202301.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2016a. “Mass and Decay Constant of The Newly Observed Exotic X(5568) State”, Phys. Rev. D 93, no. 7, 074024.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2016b. “Strong Zc+(3900) →J/ψπ+; ηcρ+ Decays In QCD”, Phys. Rev. D 93, no. 7, 074002.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2016c. “Width of The Exotic Xb(5568) State Through Its Strong Decay to Bs0π+”, Phys. Rev. D 93, no. 11, 114007.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2016d. “Charmed Partner of The Exotic X(5568) State and Its Properties ”, Phys. Rev. D 93, no.9, 094006.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2016e. “Exploring X(5568) As A Meson Molecule ”, Eur. Phys. J. Plus131, no.10, 351.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2016f. “Application of The QCD Light Cone Sum Rule to Tetraquarks: The Strong Vertices XbXbρ and XcXcρ ”, Phys. Rev. D 93, no.11, 114036.

Agaev, S. S., Azizi, K., Barsbay, B., Sundu, H. 2017a. “Resonance X(5568) as an exotic axial-vector state ”, Eur. Phys.J. A 53, no.1, 11.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2017b. “Open Charm-Bottom Scalar Tetraquark and Their Strong Decays”, Phys. Rev. D 95, no.3, 034008.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2017c. “Open Charm-Bottom Axial-Vector Tetraquarks and Their Properties”, Eur. Phys.J. C 77, no.5, 321.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2017d. “Exploring the resonances X(4140) and X(4274) through their decay channels ”, Phys. Rev. D 95, no.11, 114003.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2017e. “Treating Zc(3900) and Z(4430) as the ground-state and first radially excited tetraquarks ”, Phys. Rev. D 96, no.3, 034026.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2017f. “Spectroscopic Parameters and Decay of The Resonance Zb(10610) ”, Eur. Phys. J. C 77, no.12, 836.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2018a. “The Structure, Mixing Angle, Mass and Coupling of The Light Scalar f0(500) and f0(980) Mesons”, Phys. Lett. B 781, 279-282.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2018b. “Testing The Doubly Charged Charm-Strange Tetraquarks”, Eur. Phys. J. C 78, no.2, 141.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2018c. “The Strong Deays of The Light Scalar Mesons f0(500) and f0(980)”, Phys. Lett. B 784, 266-270.

Agaev, S. S., Azizi, K., Sundu, H. 2018d. “The Nonet of The Light Scalar Tetraquarks: a0(980) and K0*(800)”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/1804.02519.

Agaev, S. S., Azizi, K., Barsbay, B., Sundu, H. 2018e. “The Doubly Charmed Pseudoscalar Tetraquarks TTcc;ss++ and TTcc;ds++ ”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/1806.04447.

Agaev, S. S., Azizi, K., Barsbay, B., Sundu, H. 2018f. “Weak Decays of The Axial-Vector Tetraquark TTbb;ud- ”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/1809.07791.

Agamaliev A.K., Aliev, T.M., Savcı M. 2017. “Magnetic moment of XQ state with JPC= 1++ in Light cone QCD sum rules”, Phys. Rev. D, 95, 036015.

Ahmed, A., Qin, Q., Wang, W. 2018. “Discovery potential of stable and near-threshold doubly heavy tetraquarks at the LHC”, Phys. Lett. B, 785, 605-609.

Alavi-Harati, A. 2000. “Search for the weak decay of a lightly bound dibaryon”, Phys. Rev. Lett., 84, 2593-2597.

Albuquerque, R. M., Nielsen, M. 2009. “QCD sum rules study of the charmonium Y mesons”, Nucl. Phys. A, 815, 53-66; Erratumibid., Nucl. Phys A, 2011, 857, 48-49.

Albuquerque, R.M., Lee, S.H., Nielsen, M. 2013. “QCD Sum Rule Study for a Possible Charmed Pentaquark θ(3250). Phys. Rev. D, 88, 076001.

AlFiky, M. T., Gabbiani, F., Petrov, A. A. 2006. “X(3872): Hadronic molecules in effective field theory”, Phys. Lett. B, 640, 238-245.

Ali, A., Maiani, L., Borisov, Anatoly V., Ahmed, I., Aslam, M. Jamil, Parkhomenko, Alexander Ya., Polosa, A.D. Rehman, A. 2018. “A new look at the Y tetraquarks and Ωc baryons in the diquark model”, Eur, phys. C, 78, 29.

Aliev, T. M., Shifman, M. A. 1982. “Old Tensor Mesons in {QCD} Sum Rules”, Phys.Lett. B, 112, 401-405.

Aliev, T.M. , Barakat, T. , Savcı, M. 2017. “Strong Coupling Constant of A Negative Parity nucleon with a π meson in light-cone QCD sum rules”, Phys.Rev. C, 95, 035210.

Anwar, M.N., Ferretti, J., Guo, F.-K., Santopinto, E., Zou, B.-S. 2018. “Spectroscopy and decays of the fully-heavy tetraquarks”, Eur. Phys. J., C, 78,647.

Aubert, B. 2005a. “Observation of a Broad Structure in the π+π-J/ψ Mass Spectrum around 4,26 GeV/c2”, Phys. Rev. Lett., 95, 142001.

Aubert, B. 2005b. “Study of the Decay and Measurement of the Branching Fraction”, Phys. Rev. D, 71, 071103.

Aubert, B. 2006. “A Structure at 2175 – MeV in Observed via Initial-State Radiation”, Phys. Rev. D, 74, 091103.

Aubert, B. 2007. “Evidence of a Broad Structure at an Invariant Mass of 4,32 GeV/c2 in the Reaction Measured at BABAR”, Phys. Rev. Lett., 98, 212001.

Aubert, B. 2008. “Observation of at BABAR”, Phys. Rev. Lett., 101, 08200.

Azizi, K., Barsbay, B., Sundu, H. 2018. “Mass and residue of Λ(1405) as a hybrid baryon”, Eur. Phys.J. Plus 133, no.3, 121.

Azizi, K., Sundu, H., Sahin, S. 2015. “Semileptonic Transition in QCD” , Eur. Phys. J. C, 2015, 75, 197.

Azizi, K., Sarac, Y., Sundu, H. 2017a. “Analysis of Pc+(4380) and Pc+(4450) As Pentaquark States in The Molecular Picture with QCD Sum Rule”, Phys. Rev. D 95, 094016.

Azizi, K., Sarac, Y., Sundu, H. 2017b. “Hidden Bottom Pentaquark States with Spin 3/2 and 5/2”, Phys. Rev. D 96, no. 9, 094030.

Azizi, K., Barsbay, B., Sundu, H. 2018a. “Mass and residue of Λ(1405) as a hybrid baryon”, Eur. Phys.J. Plus 133, no.3, 121.

Azizi, K., Sarac, Y., Sundu, H. 2018b. “Possible Molecular Pentaquark States with Different Spin and Quark Configurations”, Phys. Rev. D 98, no. 5, 054002.

Azizi, K., Sarac, Y., Sundu, H. 2018c. “Strong Decay of Pc(4380) Pentaquark in a Molecular Picture ”, Phys. Lett. B 782, 694-701.

Azizi, K., Ozdem, U. 2018d. “The electromagnetic multipole moments of the charged open-flavor Zcq states”. J. Phys. G45, no.5, 055003.

Azizi, K., Ozdem, U. 2018e. “The Electromagnetic Multipole Moments of The Possible Charm-Strange Pentaquarks In Light-Cone QCD”, Eur. Phys. J. C78, no.9, 698.

Barsbay, B., Egzotik X(5568) ve Λ(1405) Parçacıklarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017, 474090.

Bashkanov, M., Brodsky, S. J., Clement, H., 2013. “Novel Six-Quark Hidden-Color Dibaryon States in QCD”, Phys. Lett. B, 727, 438-442.

Belle Collaboration, 2006. “Study of the Y(4260) resonance in e+e- collisions with initial state radiation at Belle”, http://arxiv.org/abs/ hep-ex/0612006.

Belz, J. 1996. “Search for the weak decay of an H dibaryon”, Phys. Rev. Lett. 76, 3277-3280.

Bicudo, P., Cotanch, S. R., Llanes-Estrada, F. J., Robertson, D. G. 2007. “The BES : A New Glueball Candidate”, Eur. Phys. J. C, 52, 363-374.

Bondar, A. 2012a. “Observation of two charged bottomonium-like resonances Y(5S) decays”, Phys. Rev. Lett., 108, 122001.

Bondar, A. 2012b. “Y(5S) Spectroscopy at Belle”, PoS ICHEP, 2012, 342.

Bracco, M.E., Lee, S.H., Nielsen, M., Rodrigues da Silva, R. 2009. “The Meson Z+(4430) as a tetraquark state”, Phys. Lett. B, 671, 240-244.

Buisseret, F., Mathieu, V., Semay, C. 2013. “(2+1)-d Glueball Spectrum within a Constituent Picture”, Eur. Phys. J. C, 73, 2504.

Burns, T., Close, F. E. 2006. “Hybrid meson properties in Lattice QCD and Flux Tube Models”, Phys. Rev. D, 74, 034003.

Chatrchyan, S. 2014. “Observation of a peaking structure in the J/ ψϕ mass spectrum from decays”, Phys. Lett. B, 734, 261–281.

Chen, K.F. 2008. “Observation of anomalous Y(1S) and Y(2S) production near the Y(5S) resonance”, Phys. Rev. Lett., 100, 112001.

Chen, H.-X., Hosaka, A., Zhu, S.-L. 2006. “Exotic Tetraquark of in the QCD Sum Rule”, Phys. Rev. D, 74, 054001.

Chen, H.-X., Cai, Z.-X., Huang, P.-Z., Zhu, S.-L. 2011. “The Decay Properties of the Hybrid State”, Phys. Rev. D, 83, 014006.

Chen, W., Kleiv, R. T., Steele, T. G., Bulthuis, B., Harnett, D., Ho, J., Richards, T., Zhu, S.-L. 2013a. “QCD Sum Rule Analysis of Heavy Quarkonium Hybrids”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/1310.0431.

Chen, W., Jin, H.-y., Kleiv, R.T., Steele, T.G., Wang, M., Xu, Q. 2013b. “QCD sum-rule interpretation of X(3872) with mixtures of hybrid charmonium and $\overline{D}D^*$ molecular currents”, Phys. Rev. D, 88, 045027.

Chen, W., Steele, T. G., Zhu, S.-L. 2014a. “Exotic open-flavor and tetraquark states”, Phys. Rev. D, 89, 054037.

Chen, W., Steele, T. G., Zhu, S.-L. 2014b. “Heavy tetraquark states and quarkonium hybrids”, Universe , 2, 13-40.

Chen, W., Steele, T. G., Du, M.-L., Zhu, S.-L. 2014c. “D*D* molecule interpretation of Zc(4025)”, Eur. Phys. J. C, 74, 2773.

Chen, W., Steele, T. G., Zhu, S.-L. 2014d. “Masses of the bottom-charm hybrid states”, J. Phys. G, 41, 025003.

Chen W., Steele, T. G., Chen, H.-X., Zhu, S.-L. 2015. “Zc(4200)+ decay width as a charmonium-like tetraquark state”, Eur. Phys. J. C, 75, 358.

Chen, W., Chen H.-X., Liu, X., Steele, T.G., Zhu, S.-L. 2017a. “Open-flavor charm and bottom sqqQ and qqqQ tetraquark states”, Phys. Rev. D, 95, 114005.

Chen, W., Chen H.-X., Liu, X., Steele, T.G., Zhu, S.-L. 2017b. “Hunting for exotic doubly hidden-charm/bottom tetraquark states”, Phys. Lett. B, 773, 247-251.

Chen, Y., Alexandrou, A., Dong, S.J., Draper, T., Horvath, I., Lee, F.X., Liu, K.F., Mathur, N., Morningstar, C., Peardon, M., Tamhankar, S., Young, B.L., Zhang, J.B. 2006. “Glueball spectrum and matrix elements on anisotropic lattices”, Phys. Rev. D, 73, 014516.

Chen, Y., Gui, L.-C., Li, G., Liu, C., Liu, Y.-B., Ma, J.-P., Yang, Y.-B., Zhang, J.-B. 2013. “Glueballs in charmonia radiative decays”, PoS LATTICE, 2013, 435.

Cheng, H.-Y., Chua, C.-K., Liu, K.-F. 2006. “Scalar glueball, scalar quarkonia, and their mixing”, Phys. Rev. D, 74, 094005.

Chetyrkin, K.G., Narison, S. 2000. “Light hybrid mesons in QCD”, Phys. Lett. B, 485, 145-150.

Chilikin, K. 2014. “Observation of a new charged charmoniumlike state in decays”, Phys. Rev. D, 90, 112009.

Choi, S.-K. 2003. “Observation of a Narrow Charmoniumlike State in Exclusive decays”, Phys. Rev. Lett., 91, 262001.

Choi, S.-K., Olsen, S. L. 2005. “Review of Heavy Hadron Spectroscopy”, Phys. Rev. Lett., 2005, 182002.

Choi, S. K. 2008. “Observation of a resonance-like structure in the π±ψ' mass distribution in exclusive decays”, Phys. Rev. Lett., 100, 142001.

Chow, C.-K. 1995. “From tetraquark to hexaquark: A Systematic study of heavy exotics in the large N(c) limit”, Phys. Rev. D, 51, 6327-6331.

Close, F.E., Kirk, A. 2000. “The Mixing of the and and the Search for the Scalar Glueball”, Phys. Lett. B, 483, 345-352.

Close, F. E., Page, P. R. 2004. “The threshold resonance”, Phys. Lett. B, 578, 119-123.

Close, F. E., Page, P. R. 2005. “Gluonic charmonium resonances at BaBar and BELLE?”, Phys. Lett. B, 628, 215-222.

Coan, T. E. 2006. “Charmonium Decays of Y(4260), , and ”, Phys. Rev. Lett., 96, 162003.

Coito, S. 2016. “Radially excited axial mesons and the enigmatic Zc and Zb a coupled-channel model”, Phys. Rev. D, 94, 014016.

Cui, C.-Y., Liu, Y.-L., Huang, M.-Q. 2013. “Could Zc(4025) be a molecular state?”, Eur. Phys. J. C, 73, 2661.

Dubnicka, S., Dubnickova, A. Z., Ivanov, M. A., Korner, J. G. 2010. “Quark model description of the tetraquark state X(3872) in a relativistic constituent quark model with infrared confinement”, Phys. Rev. D, 81, 114007.

Dudek, J. J., Edwards, R. G., Peardon, M. J., Richards, D. G., Thomas, C. E. 2009. “Highly excited and exotic meson spectrum from dynamical lattice QCD”, Phys. Rev. Lett. 103, 262001.

Dudek, J. J., Edwards, R. G., Peardon, M. J., Richards, D. G., Thomas, C. E. 2010. “Toward the excited meson spectrum of dynamical QCD”, Phys. Rev. D, 82, 034508.

Ebert, D., Faustov, R. N., Galkin, V. O. 2006. “Masses of heavy tetraquarks in the relativistic quark model”, Phys. Lett. B, 634, 214-219.

Ebert, D., Faustov, R. N., Galkin, V. O. 2008. “Excited heavy tetraquarks with hidden charm”, Eur. Phys. J. C, 58, 399-405.

Ebert, D., Faustov, R. N., Galkin, V. O. 2009. “Mass spectra and Regge trajectories of light mesons in the relativistic quark model”, Phys. Rev. D, 79, 114029.

Eides, Michael I., Petrov, Victor Y., Polyakov, Maxim V. 2018. “Pentaquarks with hidden charm as hadroquarkonia”, Eur. Phys. C, 78, 36.

Eshraim, W. I., Janowski, S. 2013. “Phenomenology of the pseudoscalar glueball with a mass of 2,6 GeV”, J. Phys. Conf. Ser., 426, 012018.

Esposito, A. , Pilloni, A. , Polosa, A.D. 2016. “Multiquark Resonances”, Phys.Rept. 2016, 668, 1-97.

Fabian, G., Guthsche, T., Ivanov M., A., Körner, Jürgen G., Lyubovitskij Valery E., Santorelli, P. 2016. “Four-quark structure of Zc(3900), Zc(4430) and Xb(5568) states”, Phys. Rev D, 94, 094017.

Fabian, G., Guthsche, T., Ivanov M., A., Körner, Jürgen G., Lyubovitskij Valery E. 2017. “Zb(10610) and Zb(10650) decays in a covariant quark model”, Phys. Rev. D, 96, 054028.

Gal, A., Garcilazo, H. 2013. “Pion-assisted and dibaryons, PoS Hadron”, 2013, 091.

Garmash, A., et al., [Belle Collaboration], 2015. “Amplitude analysis of →Y(nS) at Phys. Rev. D, 91, 072003.

Gerasyuta, S.M., Matskevich, E.E. 2011. “Heavy dibaryons”, Int. J. Mod. Phys. E, 20, 2443-2462.

Gerasyuta, S.M., Matskevich, E.E. 2012. “Heavy baryonia”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/1203.6825.

Gershtein, S. S., Likhoded, A. K., Pronko, G. P. 2007. “Possible nature of Z+(4430)”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/0708.3997.

Gregory, E., Irving, A., Lucini, B., McNeile, C., Rago, A., Richards, C., Rinaldi, E. 2012. “Towards the glueball spectrum from unquenched lattice QCD”, JHEP, 1210, 170.

Guo, F. K., Meissner, Ulf. G., Nieves, J., Yang, Zhi. 2016. “Remarks on the Pc structures and triangle singularities”. Eur. Phys. A, 52, 318.

Guo, P., Yépez-Martínez, T., Szczepaniak, A. P. 2014. “Charmonium meson and hybrid radiative transitions”, Phys. Rev. D, 89, 116005.

Harris, D. 2008. “The charming case of X(3872”.

He J., Liu X., Sun Z.-F., Zhu S.-L. 2013. “ Zc(4025) as the hadronic molecule with hidden charm”, Eur. Phys. J. C, 73(11), 2635.

He, J., Chen, D.-Y. 2018. “Zc(3900)/Zc(3885) as a virtual state from πJ/ψ-D*D interaction”, Eur. Phys. J., C, 78, 94.

He Jun. 2017. “Understanding spin parity of Pc(4450) and Y(4274) in a hadronic molecular state picture”, Phys. Rev. D, 95, 074004.

Hedditch, J. N., Kamleh, W., Lasscock, B. G., Leinweber, D. B., Williams, A. G., Zanotti, J. M. 2005. “ exotic meson at light quark masses”, Phys. Rev. D, 72, 114507.

Hsiao, Y. K., Geng, C. Q. 2013. “Identifying Glueball at 3.02 GeV in Baryonic B Decays”, Phys. Lett. B, 727, 168-171.

Huang, H., Ping, J., Wang, F. 2014. “Dynamical calculation of the dibaryon candidates”, Phys. Rev. C, 89, 3, 034001.

Huang, H., Zhu, X., Ping, J. 2018. “Pc-like pentaquarks in hidden strange sector”, Phys. Rev. D, 97, 094019.

Huang, P.-Z., Chen, H.-X., Zhu, S.-L. 2011. “The Strong Decay Patterns of the 1-+ Exotic Hybrid Mesons”, Phys. Rev. D, 83, 014021.

Huang, T., Jin, H., Zhang, A. 1999a. “The 0^{++} and 0^{-+} mass of light quark hybrid in QCD sum rules”, Eur. Phys. J. C, 8, 465-471.

Huang, T., Jin, H.Y., Zhang, A. 1999b. “Determination of the scalar glueball mass in QCD sum rules”, Phys. Rev. D, 59, 034026.

Huang, Z.-R., Jin, H.-Y., Zhang, Z.-F. 2015. “New predictions on the mass of the light hybrid meson from QCD sum rules”, JHEP, 1504, 004.

Iddir, F., Semlala, L. 2008. “Hybrid states from constituent glue model”, Int. J. Mod. Phys. A, 23, 5229-5250.

Ikeno, N., Bayar, M., Oset, E. 2018. “Semileptonic decay of Bc- into X(3930), X(3940), X(4160)”, Eur, Phys. J., C, 78, 429.

Jaffe, R.L. 1977a. “Perhaps a Stable Dihyperon”, Phys. Rev. Lett. 38, 195.

Jaffe, R.L. 1997b. “Multiquark hadrons. I. Phenomenology of Q2Q-2 mesons”, Phys. Rev. D, 15, 267.

Jaffe, R.L. 1997c. “Multiquark hadrons. II. Methods”, Phys. Rev. D, 15, 281.

Janowski, S. 2013. “Quarkonium and Glueball Admixtures of the Scalar–Isoscalar Resonances and Acta Phys. Polon. Supp., 6, 899-904.

Jezabek, M., Praszatowicz, M. 1987. “Skyrmions and anomalies: proceedings”, World Scientific, 112, 485-491.

Jin, H.Y., Korner, J.G., Steele, T.G. 2003. “Improved determination of the mass of the light hybrid meson from QCD sum rules”, Phys. Rev. D, 67, 014025.

Karliner M., Nussinov, S., Rosner, J.L. 2017. “QQQQ states: masses, production, and decays”, Phys. Rev. D, 95, 034011.

Karliner, M., Rosner, L. 2017. “Discovery of doubly-charmed Ξcc baryon implies a stable (bbud) tetraquark”, Phys. Rev. Lett., 119, 202001.

Khrykin, A.S. 2014. “On the existence of the NN-decoupled dibaryon d1*(1956)”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/1402.0837.

Kim, H.-C., Kim, Y. 2009. “Hybrid exotic meson with in AdS/QCD”, JHEP, 0901, 034.

Kisslinger, L. S. 2009. “Mixed Heavy Quark Hybrid Mesons, Decay Puzzles, and RHIC”, Phys. Rev. D, 79, 114026.

Kisslinger, L. S., Henley, E. M. 2011. “QCD: The Lambda(1405) Lambda(1405) as a Hybrid”, Eur. Phys. J. A, 47, 8.

Kisslinger, L. S., Das, D. 2016. “Review of QCD, Quark-Gluon Plasma, Heavy Quark Hybrids, and Heavy Quark State production in p-p and A-A collisions”, Int. J. Mod. Phys. A., 31, 1630010.

Kleiv, R. 2014. “QCD Sum Rule Studies of Heavy Quarkonium-like State”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/1407.2292.

Kleiv, R.T., Steele, T.G., Zhang, A., Blokland, I. 2013. “Heavy-light diquark masses from QCD sum rules and constituent diquark models of tetraquarks”, Phys. Rev. D, 87, 125018.

Kochelev, N., Min, D.-P. 2006. “X(1835) as the lowest mass pseudoscalar glueball and proton spin problem”, Phys. Lett. B, 633, 283-288.

Kou, E., Pene, O. 2005. “Suppressed decay into open charm for the Y(4260) being an hybrid”, Phys. Lett. B, 631, 164-169.

Krokovny, P. 2013. “First observation of the in a Dalitz analysis of Y(10860)→Y(nS) Phys. Rev. D, 88, 052016.

Lee, I. W., Faessler, A., Gutsche, T., Lyubovitskij, V. E. 2009. “X(3872) as a molecular state in a potential model”, Phys. Rev. D, 80, 094005.

Lee, S.-H., Morita, K., Nielsen, M. 2008. “Width of exotics from QCD sum rules: Tetraquarks or molecules?”, Phys. Rev. D, 78, 076001.

Lee, S. H., Nielsen, M., Wiedner, U. 2009a. “ D_sD^* molecule as an axial meson”, J. Korean Phys. Soc., 55, 424.

Lee, S. H., Morita, K., Nielsen, M. 2009b. “Can the $\pi^{\pm}\chi_{c1}$ resonance structures be and molecules?”, Nucl. Phys. A, 815, 29-39.

LHCb Collaboration (Roel Aaij et al., 2014. “Observation of the resonant character of the Z(4430)- state”, Phys.Rev.Lett., 112, 222002.

Li, B. A. 2006. “A Possible glueball candidate X(1835)”, Phys. Rev. D, 74, 034019.

Li, X.-F., Zhang, A. 2014. “Scalar glueball in a soft-wall model of AdS/QCD, Chin. Phys. C, 38, 013102.

Liu, S.-Q., Chen, K., Liu, X., Liu, Y.-R., Zhu, S.-L. 2017. “Exotic tetraquark states with the qqQQ configuration”, Eur, Phys. J., C, 77,709.

Liu, X., Luo, Z.-G., Liu, Y.-R., Zhu, S.-L. 2009. “X(3872) and Other Possible Heavy Molecular States”, Eur. Phys. J. C, 61, 411-428.

Loan, M., Luo, X.-Q., Luo, Z.-H. 2006. “Monte Carlo study of glueball masses in the Hamiltonian limit of SU(3) lattice gauge theory”, Int. J. Mod. Phys. A, 21, 2905-2936.

Lü, C.-D., Meissner, U.-G., Wang, W., Zhao, Q. 2013. “Hunting for a scalar glueball in exclusive B decays”, Eur. Phys. J. A, 49, 58.

Ma, L., Liu, X.-H., Liu, X., Zhu, S.-L. 2014a. “Exotic Four Quark Matter: Z1(4475)”, Phys. Rev. D, 90, 037502.

Ma, L., Sun, Z.-F., Liu, X.-H., Deng, W.-Z., Liu, X., Zhu, S.-L. 2014b. “Probing the XYZ states through radiative decays”, Phys. Rev. D, 90, 034020.

Maiani, L., Piccinini, F., Polosa, A.D., Riquer, V. 2005. “Diquark-antidiquarks with hidden or open charm and the nature of X(3872)”, Phys. Rev. D, 71, 014028.

Maiani, L., Polosa, A.D., Riquer, V. 2007. “The Charged Z(4433): Towards a new spectroscopy”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/0708.3997.

Matheus, R.D., Narison, S., Nielsen, M., Richard, J.M. 2007. “Can the X(3872) be a 1++ four-quark state?”, Phys. Rev. D, 75, 014005.

Mathieu, V., Kochelev, N., Vento, V. 2009. “The Physics of Glueballs”, Int. J. Mod. Phys. E, 18, 1-49.

McNeile, C., Michael, C. 2006. “Decay width of light quark hybrid meson from the lattice”, Phys. Rev. D, 73, 074506.

Meng, C., Chao, K.-T. 2007. “Z+(4430) as a resonance in the channel”, http://arxiv.org/abs/hep-ph/0708.4222.

Meyer, C.A., Swanson, E.S. 2015. “Hybrid Mesons”, Prog. Part. Nucl. Phys. 82, 21-58.

Mizuk, R., Chistov, R. 2008. “Observation of two resonance-like structures in the mass distribution in exclusive decays”, Phys. Rev. D, 78, 072004.

Morningstar, C. J., Peardon, M. 1999. “The Glueball spectrum from an anisotropic lattice study”, Phys. Rev. D, 60, 034509.

Morningstar, C., Peardon, M. 2004. “Simulating the scalar glueball on the lattice”, AIP Conf. Proc., 688, 220-230.

Narison, S. 2009. “ light exotic mesons in QCD”, Phys. Lett. B, 675, 319-325.

O'Luanaigh, C. 2014. “LHCb confirms existence of exotic hadrons”.

Ochs, W. 2013. “The Status of Glueballs”, J. Phys. G, 40, 043001.

Ozdem, U., Azizi, K. 2017. “Magnetic and quadrupole moments of the Zc(3900) ”, Phys. Rev. D 96, no.7, 074030.

Ozdem, U., Azizi, K. 2018a. “Magnetic dipole moment of Zb(10610) in ligh-cone QCD”, Phys. Rev. D97, no.1, 014010.

Ozdem, U., Azizi, K. 2018b. “Electromagnetic multipole moments of the Pc+(4380) pentaquark in light-cone QCD”, Eur. Phys. J. C78, no.5, 379.

Page, P.R., Swanson, E.S., Szczepaniak, A.P. 1999. “Hybrid meson decay phenomenology”, Phys. Rev. D, 59, 034016.

Pakhlov, P. 2008. “Production of New Charmoniumlike States in at Phys. Rev. Lett., 100, 202001.

Park, W., Park, A., Cho, S., Lee, S. H. 2017. “Pc(4380) in a constituent quark model”, Phys. Rev. D, 95, 054027.

Qiao, C.-F., Tang, L., Hao, G., Li, X.-Q. 2012. “Determining Heavy Hybrid Masses via QCD Sum Rules”, J. Phys. G, 39, 015005.

Qiao, C.-F., Tang, L. 2014. “Interpretation of Zc(4025) as the hidden charm tetraquark states via QCD Sum Rules”, Eur. Phys. J. C, 74, 2810.

Rosner, J. L. 2007. “Threshold effect and peak”, Phys. Rev. D, 76, 114002.

Stotzer, R. W. 1997. “Search for the H-Dibaryon in Phys. Rev. Lett. 1997, 3646.

Sundu, H., Agaev, S. S., Azizi, K. 2018a. “The New a1(1420) State: Structure, Mass and Width”, Phys. Rev. D 97, no. 5, 054001.

Sundu, H., Agaev, S. S., Azizi, K. 2018b. “The Resonance Y(4660) As a Vector Tetraquark and Its Strong Decay Channels”, Phys. Rev. D 98, no. 5, 054021.

Sundu, H., Barsbay, B., Agaev, S. S., Azizi, K. 2018c. “Probing an Axial-Vector Tetraquark Zs Via Its Semileptonic Decay Zs → X (4274)lvl ”, Eur. Phys. J. A 54, no. 7, 124.

Swanson, E. S. 2004. “Short range structure in the X(3872)”, Phys. Lett. B, 588, 189-195.

Terasaki, K. 2007. “A New tetra-quark interpretation of X(3872)”, Prog. Theor. Phys., 118, 821-826.

Terasaki, K. 2011. “Tetra-quark mesons with exotic quantum numbers: Their production and related”, AIP Conf. Proc., 1388, 352-355.

The LHCb Collaboration (LHCb Collaboration), LHCb-CONF-2016-004, CERN-LHCb-CONF-2016-004.

Thomas, C. E., Close, F. E. 2008. “Is X(3872) a molecule?”, Phys. Rev. D, 78, 034007.

Tornqvist, N. A. 2004. “Isospin breaking of the narrow charmonium state of Belle at 3872 MeV as a deuson”, Phys. Lett. B, 590, 209-215.

Uehara, S. 2006. “Observation of a Candidate in Production at Belle”, Phys. Rev. Lett., 96, 082003.

Uehara, S., et al., [Belle Collaboration], 2009. “Observation of a charmonium-like enhancement in the process”, Phys. Rev. Lett. 104, 092001.

Voloshin, M.B. 2004. “Interference and binding effects in decays of possible molecular component of X(3872)”, Phys. Lett. B, 579, 316-320.

Wang, Q. 2014. “ Search for exotic state in e+e- annihilation”, Phys. Rev. D, 89, 114013.

Wang, X. L. 2007. “Observation of Two Resonant Structures in via Initial-State Radiation at Belle”, Phys. Rev. Lett., 99, 142002.

Wang, X., Sun, Y., Chen, D.-Y., Liu, X., Matsuki, T. 2014. “Simulating the charged charmoniumlike structure Zc(4025)”, Eur. Phys. J. C, 74, 2761.

Wang, Z.-G. 2014. “Reanalysis of the Y(3940), Y(4140), Zc(4020), Zc(4025) and Zb(10650) as molecular states with QCD sum rules”, Eur. Phys. J. C, 74, 2963.

Wang, Z.-G. 2017. “The magnetic moment of the Zc(3900) as an axial vector tetraquarks state with QCD sum rules”, Eur. Phys.j., C, 78,297.

Wang, Z.-G., Yan, Z.-H. 2018. “Analysis of the scalar, axialvector, vector, tensor doubly charmed tetraquark states with QCD sum rules”, Eur. Phys. J., C, 78, 19.

Xiao, C.-J., Chen, D.-Y. 2017. “Analysis of the hidden bottom decays of Zb(10610) and Zb(10650) via final state interaction”, Phys. Rev. D, 96, 014035.

Xing, Y., Tong, J., Zhu, R. 2018. “Weak decays of stable doubly heavy tetraquark states”, Phys. Rev. D, 98, 053005.

Yamaguchi, Y., Yasui, S., Hosaka, A. 2014. “Exotic dibaryons with a heavy antiquark”, Nucl. Phys. A, 927, 110-118.

Yang, K.-C. 2007. “Indications of the possible observation of the lowest-lying QCD state”, Phys. Rev. D, 76, 094001.

Yang, Y.-B., Gui, L.-C., Chen, Y., Liu, C., Liu, Y.-B., Ma, J.-P., Zhang, J.-B. 2013. “Lattice Study of Radiative J/ψ Decay to a Tensor Glueball”, Phys. Rev. Lett., 111, 091601.

Yao, W.-M. 2006. “Review of Particle Physics: Non-qq mesons”, Journal of Physics G, 33, 1-1232.

Yuan, C. Z. 2007. “Measurement of to Cross Section via Initial State Radiation at Belle”, Phys. Rev. Lett., 99, 182004.

Zhu, S.-L. 1999. “Some decay modes of the hybrid meson in QCD sum rules revisited”, Phys. Rev. D, 60, 097502.

Zhu, S.-L. 2005. “The Possible interpretations of Y(4260)”, Phys. Lett. B, 625, 212.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. KAZEM AZİZİ
Proje No:	115F183
Proje Başlığı:	Egzotik Hadronların Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	YASEMİN SARAÇ OYMAK, HAYRİYE SUNDU PAMUK
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	DOĞUŞ Ü. FEN EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2015 - 01/10/2018
Onaylanan Bütçe:	557040.0
Harcanan Bütçe:	328253.79
Öz:	Güçlü etkileşen kuark ve gluonlardan oluşan standart hadronlar, baryonlar ve mezonlardır. Bu etkileşmelerin alan teorisi, Kuantum Renk Dinamiği (KRD) dir. Bu yapılara ek olarak, son yıllarda, çeşitli kuark ve gluon kombinasyonlarından oluşabilecek parçacıklar olabileceği öne sürülmüş ve bazıları deneylerde gözlemlenmiştir. Bu yapılar genel olarak XYZ parçacıkları, hybridler, mezon molekülleri, dörtkuarklar ve beşkuarklar gibi egzotikler olarak bilinmektedir. Projenin temel amacı, bu tür parçacıkların fiziksel özelliklerini incelemek olmuştur. Proje kapsamında, egzotik parçacıkların spektroskopik özellikleri ile onların güçlü, elektromanyetik ve zayıf geçiş kanalları incelenmiş olup sonuçlar var olan deney dataları ile kıyaslanmıştır. Proje süresince, zaman zaman, Fermilab, LHCb, Belle gibi dünya çapında önemli laboratuvarlar tarafından yeni parçacıklar keşfedilmiş, grubumuz bu keşiflere reaksiyon gösterip yeni parçacıkların iç kuark-gluon organizasyonu ve kuantum sayılarını belirlemeye çalışmıştır. Bazen deneylerde bakılmaları için çeşitli öngörülerde de bulunulmuştur. Çalışmalarımız deneylerle yakın ilişki içerisinde olup, bazı deney sonuçlarına ışık tutmuştur. Örneğin, X(5568) parçacığı, hesaplarımız esnasında Fermilab tarafından keşfedilmiştir. Çalışmalarına daha önce başladığımızdan, bu parçacık ilk olarak grubumuz tarafından teorik olarak incelenmiş olup, kuantum sayıları belirlenip ona kimlik verilmiştir. Proje kapsamında yapılan kütle ve rezidü hesapları ve egzotik parçacıkların elektromanyetik, zayıf ve güçlü bozunum incelemeleri teorik literatüre katkı sağlamanın yanı sıra çeşitli deney sonuçlarının yorumlanmasında kullanılmıştır. İlgili parçacıkların özelliklerinin incelenmesi sonucu, iç yapıları ve kuantum sayıları belirlenip onlara kimlik verilmiştir. Hadronların bozunum özelliklerini temsil eden yapı faktörlerini hesaplamak için pertürbatif olmayan yöntemler gerekmektedir. Bu yöntemlerin en güvenilir ve uygulanabilirlerinden birisi KRD toplam kurallarıdır. Proje kapsamında yapılan çalışmalarda bu yöntem egzotik parçacıklara genişletilerek kullanılmıştır. Proje kapsamında 31 adet çalışma gerçekleştirilmiştir: 28 tanesi alanının saygın dergilerinde yayımlanmış olup üçü ise hakem değerlendirmesindedir. Proje kapsamında genç bilim insanları da yetiştirilmiştir. Bir yüksek lisans öğrencisi tezini bitirip doktora eğitimine başlamıştır. Bir doktora sonrası araştırmacı ise proje konusunda uzmanlaşmıştır.
Anahtar Kelimeler:	Egzotik Parçacıklar; KRD Toplam Kuralları; Güçlü, Elektromanyetik ve Zayıf Bozunumlar
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Open charm-bottom scalar tetraquarks and their strong decays (Makale - Diğer Hakemli Makale), 2- Application of the QCD light cone sum rule to tetraquarks: The strong vertices XbXb rho and XcXc rho (Makale - Diğer Hakemli Makale), 3- Charmed partner of the exotic X(5568) state and its properties (Makale - Diğer Hakemli Makale), 4- Width of the exotic X-b(5568) state through its strong decay to B-s(0)pi(+) (Makale - Diğer Hakemli Makale), 5- Mass and decay constant of the newly observed exotic X(5568) state (Makale - Diğer Hakemli Makale), 6- Strong Z(c)(+)(3900) -> J/psi pi(+); eta c rho(+)decays in QCD (Makale - Diğer Hakemli Makale), 7- Resonance X(5568) as an exotic axial-vector state (Makale - Diğer Hakemli Makale), 8- Treating Z(c)(3900) and Z(4430) as the ground state and first radially excited tetraquarks (Makale - İndeksli Makale), 9- Open charm-bottom axial-vector tetraquarks and their properties (Makale - İndeksli Makale), 10- Analysis of P-c(+)(4380) and P-c(+)(4450) as pentaquark states in the molecular picture with QCD sum rules (Makale - İndeksli Makale), 11- Exploring the resonances X(4140) and X(4274) through their decay channels (Makale - İndeksli Makale), 12- Exploring X(5568) as a meson molecule (Makale - İndeksli Makale), 13- New a(1)(1420) state: Structure, mass, and width (Makale - İndeksli Makale), 14- The structure, mixing angle, mass and couplings of the light scalar f(0)(500) and f(0)(980) mesons (Makale - İndeksli Makale), 15- Strong decay of P-c (4380) pentaquark in a molecular picture (Makale - İndeksli Makale), 16- Resonance Y (4660) as a vector tetraquark and its strong decay channels (Makale - İndeksli Makale), 17- Possible molecular pentaquark states with different spin and quark configurations (Makale - İndeksli Makale), 18- Probing an axial-vector tetraquark Z(s) via its semileptonic decay Z(s) -> X(4274)(l)over-bar nu(l) (Makale - İndeksli Makale), 19- Spectroscopic parameters and decays of the resonance Z(b)(10610) (Makale - İndeksli Makale), 20- Magnetic dipole moment of Z(b)(10610) in light-cone QCD (Makale - İndeksli Makale), 21- The electromagnetic multipole moments of the charged open-flavor Z((c)over-barq) states (Makale - İndeksli Makale), 22- The strong decays of the light scalar mesons f(0)(500) and f(0)(980) (Makale - İndeksli Makale), 23- The electromagnetic multipole moments of the possible charm-strange pentaquarks in light-cone QCD (Makale - İndeksli Makale), 24- Magnetic and quadrupole moments of the Z(c)(3900) (Makale - İndeksli Makale), 25- Hidden bottom pentaquark states with spin 3/2 and 5/2 (Makale - İndeksli Makale), 26- Testing the doubly charged charm-strange tetraquarks (Makale - İndeksli Makale), 27- Mass and residue of Lambda(1405) as hybrid and excited ordinary baryon (Makale - İndeksli Makale), 28- Electromagnetic multipole moments of the P-c(+) (4380) pentaquark in light-cone QCD (Makale - İndeksli Makale),

TÜBİTAK